

# AIC 2021

Mohammedia - Maroc

## Actes du XXXIV ème Colloque international de l'AIC

Dépôt Légal : 2021MO2928  
ISBN : 978-9920-9444-3-4

# AIC 2021

Changement climatique, Pénurie des ressources en eau, nexus  
eau/énergie et formes d'adaptation



# AIC 2021

Mohammedia - Maroc

## Actes du XXXIV ème Colloque international de l'AIC

### Changement climatique, Pénurie des ressources en eau, nexus eau/énergie et formes d'adaptation



Coordinateurs du colloque  
SALOUI Abdelmalik et KARROUK Mohammed-Said



# Changement climatique, Pénurie des ressources en eau, nexus eau/énergie et formes d'adaptation

*Actes du colloque  
organisé en distanciel à l'Université Hassan II de Casablanca  
F.L.S.H. de Mohammedia (Maroc)  
07 et 08 juillet 2021*

## Comité d'organisation

*Pr. Hayyar Awatif* (Présidente de l'université Hassan II de Casablanca)

*Pr. Ibn El Farouk Abdelhamid* (Doyen. FLSH – Mohammedia, Maroc)

*Pr. Gonegai Abdelkader* (Doyen. FLSH – Ben M'sik, Maroc)

*Pr. Saloui Abdelmalik* (FLSH – Mohammedia, Maroc)

*Pr. Karrouk M-S.* (FLSH – Ben M'sik, Maroc)

*Dr. Sebbar Abdel Ali* (DGM)

*Pr. Essami Abdel Majid* (FLSH – Mohammedia, Maroc)

*Pr. LAKHOUAJA El Houcine* (FLSH – Ben M'sik, Maroc)

*Pr. ESSALEK Bouchaib* (F.S.E.- Rabat. Maroc)

*Pr. Filali Abdel Hakim* (Faculté polydisciplinaire – Khouribga, Maroc)

*Pr. Ayyad Habib* (vice-doyen, FLSH – Mohammedia, Maroc)

## Editeurs scientifiques

Saloui Abdelmalik & Karrouk M-S.

Université Hassan II de Casablanca, Maroc

## En partenariat avec :



## Réalisation et mise en page des Actes :

Saloui Abdelmalik et Habib Ayad





## **Changement climatique, Pénurie des ressources en eau, nexus eau/énergie et formes d'adaptation**

**Coordonateurs scientifiques du colloque :**

**Abdelmalik Saloui & Mohammed-Said Karrouk**

*Les opinions défendues dans cet ouvrage n'engagent que les auteurs ; elles ne sauraient être imputées aux institutions auxquelles ils appartiennent ou qui ont financé leurs travaux.*

**Changement climatique, Pénurie des ressources en eau, nexus eau/énergie et formes d'adaptation**

Université Hassan II de Casablanca

Faculté des Lettres et Sciences Humaines - Mohammedia

Big print publication

Dépôt légal : 2021MO2928

ISBN 978-9920-9444-3-4

## **Introduction au 34<sup>ème</sup> colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie (2021, Casablanca)**

### **Intitulé du colloque :**

*Changement climatique, Pénurie des ressources en eau, nexus eau/énergie et formes d'adaptation*

Le 34<sup>ème</sup> colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie (A.I.C.) a été organisé pour la première fois à la faculté des Lettres et Sciences Humaines de Mohammedia (Université Hassan II de Casablanca - Royaume du Maroc) les 7 et 8 juillet 2021. La deuxième originalité de ce même colloque est sa tenue en mode distanciel à cause de la crise sanitaire mondiale liée à la pandémie COVID-19. En effet, le long de la période réservée à sa préparation, nous avons toujours souhaité l'organiser en présentiel mais la crise sanitaire en a décidé autrement.

Avant la tenue du colloque, les auteurs ont soumis leurs articles (résumés étendus) qui ont été évalués suite à un important travail de sélection par le comité scientifique : chaque article a été examiné par deux évaluateurs. Les articles retenus font objet de la publication au sein des présents actes.

L'équipe organisatrice du colloque est composée d'enseignants chercheurs climatologues qui travaillent sur des thématiques diversifiées. Celles-ci ont dicté le choix du thème principal du colloque "Changement climatique, pénurie des ressources en eau, nexus eau/énergie et formes d'adaptation". Ce thème permet d'évaluer les changements climatiques et leurs impacts sur la durabilité des ressources en eau tout en réfléchissant à l'alternative énergétique et aux mesures d'adaptation et de résilience aux extrêmes climatiques.

Pour répondre à cette problématique, de plus en plus préoccupante, le colloque a été organisé selon des thématiques qui sont communément présentées lors des précédents colloques annuels de l'A.I.C. : variabilité/changement climatique et adaptation, risques climatiques et pénurie d'eau, hydroclimatologie, climat urbain et microclimatologie, climat et santé, agroclimatologie et feu de forêts.

Nous tenons à remercier chaleureusement nos partenaires qui se sont impliqués positivement pour financer la tenue de ce colloque et la publication des ses actes.

Nous adressons aussi nos vifs remerciements à l'ensemble des membres du comité d'organisation qui s'étaient largement investis dans les préparatifs du colloque et la mise en forme du texte sous sa version finale.

Enfin, nous présentons nos remerciements à tous les auteurs pour leurs contributions scientifiques et leur engagement afin que les actes de ce colloque voient enfin le jour.

A la suite de l'appel à contribution pour ce colloque, le comité d'organisation a reçu deux cents deux (202) projets de communications. De ces derniers, soixante-dix-neuf (79) ont été programmés et soixante-seize (76) ont été reçus et se sont concrétisés en articles. Ces contributions témoignent de l'implication des chercheurs à mener des études scientifiques sur le thème choisi lors de ce 34<sup>ème</sup> colloque international de l'A.I.C.. Les contributions proviennent de 151 chercheurs provenant de 26 pays repartis sur les cinq continents.

On dénombre donc un total de scientifiques participants au colloque de 151 chercheurs : 76 auteurs et 75 co-auteurs

Les actes de ce colloque n'ont pas pu voir le jour sans la contribution active du comité scientifique international qui est composé de cinquante-cinq (55) membres. Nous les remercions vivement pour leur dévouement à relire de manière attentive les articles qui leurs ont été confiés. Sans eux ces actes n'auraient pas eu la qualité scientifique souhaitée.

Au bilan, un total de 37 travaux a été présenté sous forme de communications orales. Le même chiffre concerne aussi les présentations de Posters. En détail, nous retrouvons :

**Les communications orales** : programmées selon neuf axes. Chaque axe contenait un nombre de communications orales :

Les axes n°. 1 au n°. 4 : quatre communications chacun (soit un total de 16 communications) ;

Axe n°. 5 : Cinq communications

Les axes n°. 6 au n°. 9 : quatre communications chacun (soit un total de 16 communications) ;

**Les communications Posters** étaient programmées selon quatre axes. Chaque axe contenait un certain nombre de Posters :

L'axe n°. 1 : onze Posters ;

L'axe n°. 2 : douze Posters ;

L'axe n°. 3 : onze Posters ;

L'axe n°. 4 : trois Posters ;

Soit un total de 37 communications orales et de 39 Posters.

Tous ces travaux sont regroupés dans les Actes du colloque représentant un document dont le volume dépasse les 460 pages.

La première journée du colloque (07 juillet 2021) était inaugurée par l'allocution d'ouverture (session d'ouverture). Ils participaient à cette session, en plus du Président de l'A.I.C. et du doyen de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines de Mohammedia, Madame la Présidente de l'Université Hassan II de Casablanca, et Messieurs les Directeurs de la Météorologie Générale du Maroc et de l'Agence du Bassin Hydraulique de Bouregrag et de Chaouiya- Ben Slimane.

La session d'ouverture était suivie par une conférence plénière présentée par Pr. Annick Douguedroit.

Suite à cette conférence, les présentations orales se sont enchaînées, pendant les deux journées, selon trois ateliers parallèles.

Lors de la journée du 8 juillet, s'est également tenue l'assemblée générale de l'A.I.C. suite à laquelle un nouveau bureau exécutif de l'A.I.C. a vu le jour (et un nouveau président de l'Association a été élu : Pr Expédit Vissin du Bénin).

Pour le comité d'organisation  
Abdelmalik SALOUI

## Remerciements

L'Association Internationale de Climatologie (A.I.C.) a organisé son 34<sup>ème</sup> colloque annuel à la faculté des Lettres et Sciences Humaines de Mohammedia (Université Hassan II de Casablanca - Royaume du Maroc) les 7 et 8 juillet 2021.

L'équipe organisatrice du colloque tient à remercier chaleureusement tous les auteurs pour leurs contributions scientifiques et leur engagement afin que les actes de ce colloque voient enfin le jour.

Egalement, elle tient à remercier tous les membres du comité scientifique qui ont veillé, à chaque fois qu'il le fallait, sur la lecture, la correction et l'amélioration de la qualité des résumés proposés au colloque.

Elle tient aussi à remercier tous les partenaires qui se sont impliqués positivement pour financer la tenue de ce colloque et la publication de ses actes.

Un remerciement particulier est adressé à Monsieur le doyen de la faculté des Lettres et Sciences Humaines de Mohammedia (Pr. Abdelhamid Ibn El Farouk) qui, volontiers, a accepté de soutenir l'organisation du colloque dans cet établissement.

Il y'a lieu de rappeler que le soutien de la faculté des Lettres et Sciences Humaines de Mohammedia était à la fois financier, organisationnel et logistique.

Un sympathique regard de remerciement du comité d'organisation est adressé aussi au personnel administratif et technique de l'établissement pour leur disponibilité, leur sérieux et leur efficacité en termes de l'utilisation de la plateforme informatique.

Sans l'aide et le soutien de tous ces acteurs, le présent document (actes du colloque) ne sera pas à l'état où il est aujourd'hui.

Que toutes ces personnes et institutions trouvent ici l'expression de nos vifs et chaleureux remerciements.





## ***TABLE DES MATIERES***

### **CONFERENCE PLENIAIRE**

#### **CLIMAT(S) ET CHANGEMENT CLIMATIQUE**

Douguedroit A.....9

### **RÉSUMÉS ÉTENDUS**

#### **POLLUTION ATMOSPHERIQUE AUX PARTICULES FINES AU SUD DE PARIS EN 2020 : PENDANT et EN DEHORS DU CONFINEMENT DU COVID-19**

Abdmouleh M-A. et Dahech S. ....15

#### **APPLICATION D'UN MODÈLE SIG POUR LA CARTOGRAPHIE DU RISQUE POTENTIEL DE FEU DE FORÊTS : CAS DE LA FORÊT DE L'OUED RMILA (PROVINCE DE TAZA- MAROC)**

Aboubi Imane et Hanchane Mohamed.....21

#### **UNE FORME D'HABITAT VERNACULAIRE ADAPTÉE AUX CONDITIONS CLIMATIQUES DES OASIS MAROCAINES : LE CAS DES KSOUR et KASBAHS**

Adidi A. et Saloui A.....27

#### **COMPARAISON DES ÉMISSIONS DE GES PAR LA CULTURE DE L'ARACHIDE ET DE TROIS VARIÉTÉS DE MAÏS AU SUD-BENIN**

Adjahossouvidedji Naesse, Adjahossou B. Sedami, Djego Julien, Amadji G. Lucien et Boko  
Michel..... 34

#### **CARACTÉRISATION DES ÉVÈNEMENTS PLUVIOMÉTRIQUES AUTOMNAUX RESPONSABLES DES GRANDES INONDATIONS EN TUNISIE DEPUIS 1969 : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE**

Al Atrach Mohamed Mohsen et Nasrallah Wafa.....39

#### **ÉTUDE DES IMPACTS DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE SUR LES EAUX DE SURFACE DANS LE BASSIN VERSANT DU BANDAMA BLANC (CENTRE-NORD DE LA CÔTE D'IVOIRE)**

Amalaman Marc A., Nouaceur Zeineddine, Diomandebé I., Tra Bi Z. A. et Laignel Benoi.  
.....46

#### **ETUDE DU TAUX D'INCIDENCE ET DE PREVALENCE DE TROIS MALADIES LIÉES A L'EAU DANS LE BASSIN BENINOIS DU MONO**

Amoussou Yvon Lionel, Djaouga Mama, Kpokpo Roche, Late Enoc, Senou Rodrigue,  
Thomas Omer, Agbahungba Georges, Avahounlin Fernand et Vissin Expedit .....52

#### **DYNAMIQUE DES SAISONS CULTURALES DANS LA ZONE À CLIMAT TROPICAL GUINÉEN DU SUD-TOGO DE 1980 À 2018**

Badameli Pyloatina, Lemou Faya, Panesse Paalamwé et Kadouza Padabo.....57

#### **LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE CONTEMPORAIN AU MAROC ET SES ASPECTS SPATIO-TEMPORELS**

Bahou Abdellaziz, .....63

#### **ASSESSMENT OF EURO-CORDEX AND MED-CORDEX CLIMATE SIMULATIONS IN NORTHERN ITALY**

Baronetti A., Dubreuil V., Provenzale A. et Fratianni S. ....69

DANGER CLIMATIQUE D'INCENDIE DE FORÊTS AU XXI <sup>ÈME</sup> SIÈCLE EN TUNISIE : SÈCHERESSE ET ÉVÉNEMENTS DE SIROCCO DANS LES MODÈLES CLIMATIQUES. Belhadj Khedher Chiraz et Mouillot Florent.....	75
EVALUATION DE L'IMPACT DE LA SÈCHERESSE CLIMATIQUE SUR LA PRODUCTIVITÉ DE L'ÉLEVAGE DANS LA PROVINCE DE TAZA (MAROC) Belmahi Mohamed, Hanchane Mohamed et El Mouloudi M'hamed .....	79
A LA RECHERCHE DES INDICATEURS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LE BASSIN MONTAGNARD DE OUZOUZ : EXTRACTION ET ANALYSE DE PLUIES MAXIMALES JOURNALIÈRES (HAUT ATLAS - MAROC) Abdelmoumen Benchattou et Mohamed El Ghachi.....	84
TENDANCES ET VARIABILITÉ DES PLUIES EXTREMES AU MAROC SEPTENTRIONAL (1976-2016) : ANALYSE PAR DES INDICES CLIMATIQUES CALCULÉS Bouaiche A., Lotfi N., Chair M. et Karrouk M-S. ....	90
CARACTÉRISATION DE LA SÈCHERESSE CLIMATIQUE DE LA RÉGION CASABLANCA-SET TAT (MAROC) (1980/2018). Boubekri A., Saloui A. et Filali A. ....	96
ETUDE DU COMPORTEMENT MICROCLIMATIQUE D'UNE BOUCHE DE RAFRAÎCHISSEMENT EXPÉRIMENTALE Mailys Chaniel, Ghid Karam, Sophie Parison, Martin Hendel et Laurent Royon.....	102
FORMES D'ADAPTATION DES HABITANTS DES OASIS DU BASSIN VERSANT DE L'OUED DAOURA À LA PÉNURIE D'EAU : CAS D'OASIS DU TAFILALET (SUD-EST MAROCAIN) Chanyour Yassine, Obda Khalid et El Achari Ouafaa.....	109
“TIERCE FORÊT ” : GREENING A PARKING LOT Chaumont Maxime, Parison Sophie, Kounkou-Arnaud Raphaëlle, Long Frédéric, Bernik Andrej, Da Silva Marcos et Hendel Martin .....	115
LES ASPECTS HYDROCLIMATIQUES DANS LE BASSIN VERSANT DE SEBOU(MAROC)ET LA MODÉLISATION DES CRUES INONDABLES Chkhami Khalid, Janati Idrissi Mohamed, Yazami Ztait et Elyadari Seddiki.....	122
THE VARIABILITY OF PRECIPITATION AMOUNTS ALONG THE LOWER DANUBE. CASE STUDY: CĂLĂRAȘI-PĂTLĂGEANCA SECTOR (ROMANIA) Constantin (Oprea) D. M, Onțel I., Grigore E. et Ilea R.G. ....	128
IMPACTS DE LA PLUVIOMÉTRIE DE L'HIVERNAGE 2019 SUR LES CULTURES ET LES STRATÉGIES D'ADAPTATION DES PRODUCTEURS DANS LA COMMUNE DE MABO (RÉGION DE KAFFRINE, SENEGAL) Sambou Pierre Corneille, Yade Madiop et Diedhiou Yaya Mansour.....	134
ANALYSE DE LA VÉGÉTATION ET DE SON IMPORTANCE MICROCLIMATIQUE SUR LES PLACES PUBLIQUES DE LA VILLE DE TRES LAGOAS - BRÉSIL Diego Da Silva Borges et Mauro Hernique Soares Da Silva.....	140
CONSÉQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'USAGE DES RESSOURCES EN EAU DANS LES HAUTES PLAINES SÉTIFIENNES (EST DE L'ALGÉRIE): CAS DU BASSIN VERSANT DE L'OUED BOUSSELAM Djellouli Y., Bougherira A., Messner F., Louail A., Gharzouli R. et Missaoui K.....	146

2020, PREMIÈRE ANNÉE SANS GEL DANS LE CENTRE-VILLE DE RENNES ! Dubreuil V, Brabant C., Delaunay G., Quenol H., Nabucet J. et Amorim M.....	152
CLIMAT ET MALADIES DES TOMATES DANS LA RÉGION DU CAP BON (TUNISIE) : CAS DE MILDIOU El Hajri J., Haddad R. et Bouzid .....	158
CLIMAT ET MALADIES DES TOMATES DANS LA RÉGION DU CAP BON (TUNISIE) : CAS DE MILDIOU EL Orfi T., EL Ghachi M., Lebaut S. et Gille E. ....	164
EVALUATION DU CONTEXTE BIOCLIMATIQUE RECENT DES PERIMETRES IRRIGUES DU MOYEN ATLAS ET SES BORDURES (MAROC) A PARTIR DU QUOTIENT PLUVIOTHERMIQUE D'EMBERGER EL-Bouhali A., Lebaut S., Amyay M., Qadem A, Gille et Cotonnec A .....	170
LA VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DE LA POLLUTION PARTICULAIRE A SFAX : CAS DES CHANTIERS DE LA ROCADE DU KM 4 Euchi H. et Dahech S. ....	176
VARIABILITE DE LA SECHERESSE METEOROLOGIQUE SUR LA STEPPE ALGERIENNE Faci Mohammed, Bouarfa Saïd, Oubadi Miloud, Djoudi Warda et Farhi Yassine.....	182
LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET LE RISQUE D'INONDATION DANS LA PALINE DU GHARB Fathi M., Saloui A. et Karrouk M.S.....	188
SUIVI DE LA TENDANCE ÉVOLUTIVE DES PRÉCIPITATIONS ET SES IMPACTS SUR LA PRODUCTION D'EAU SUPERFICIELLE AU MAROC Fattah H., Karrouk M-S et Saloui A.....	193
COMBINATION AND EVALUATION OF DIFFERENT URBAN COOLING SOLUTIONS Frere M., Hendel M., Van Rompu J. et Royon L. ....	199
EFFET DE L'EXPOSITION AU SOLEIL ET AU VENT DOMINANT SUR LES TEMPÉRATURES ET PERCEPTION DE LA CHALEUR DANS LES QUARTIERS DU CENTRE-VILLE DE SFAX (CENTRE-EST DE LA TUNISIE) Ghribi Marwen et Dahech S.....	205
ANOMALIES DE PRÉCIPITATIONS AU SUD DU BRÉSIL : UNE ANALYSE PRÉLIMINAIRE DE LA SÉCHERESSE DE 2020 Goudard G. et Mendonça F. A. ....	211
ETUDE EXPLORATOIRE DE LA MIGRATION CLIMATIQUE AU SENEGAL Hamid M. et Reddad H. ....	217
ÉVALUATION DE LA SÉCHERESSE CLIMATIQUE ET DE SON IMPACT SUR LE PLAN D'EAU DU BARRAGE AL WAHDA (MAROC) Hanchane M., Addou R., Elkhazzan B. et Souab M. ....	223
EVALUATION DE L'IMPACT SUR LA TEMPÉRATURE DE SURFACE DE CERTAINS PROJETS EMBLEMATIQUES DE REAMENAGEMENT DANS L'AIR MET ROPOLITAINE DE CASABLANCA (MAROC) Hassani N., Lebaut S., Sghir S. et Drogue G. ....	228
IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES BESOINS HYDRIQUES DE L'AGRICULTURE DANS LES ZONES SUB SAHARIENNES Hassini N. et Benbouzid Z. ....	234

OPTIMISATION D'UN MODÈLE ATMOSPHÉRIQUE TRANSNATIONAL DE PRÉDICTION DE LA CONCENTRATION JOURNALIÈRE D'OZONE : INTÉGRATION DE PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES POUR UNE ÉVALUATION DE L'EXPOSITION À L'ÉCHELLE KILOMÉTRIQUE Honorine Gauthier-Manuel, Frederic Mauny, Mathieu Boilleaut, Marie Ristori, Sophie Pujol, Anne-Laure Parmentier et Nadine Bernard.....	240
EVENEMENTS HYDRO-PLUVIOMÉTRIQUES EXTREMES ET RISQUES D'INONDATIONS DANS LA CUVETTE-CONGOLAISE (RÉPUBLIQUE DU CONGO) DE 1960 À 2019 Ibiassi Mahoungou G., Mbilou Gampio U., Hanchane M. et Maniaka F.W. ....	246
CONTRIBUTION A L'ANALYSE DE LA VARIABILITE HYDRO CLIMATIQUE AU BASSIN DU NIGER : CAS DE LA STATION DE NIAMEY Illiassou Naroua, Hassoumi Djibo, Souley Issaka et Abdoul Madjid Ibrahima Abdou.....	252
CHANGEMENT CLIMATIQUE — LA SITUATION INTERNATIONALE A L'AUBE DE LA COP26 A GLASGOW Juvanon Du Vachat Regis .....	258
UTILISATION D'UN MULTI-MODELE COMME UN OUTIL DE PROSPECTIVE CLIMATIQUE DANS LA SAVANE DE LA COTE D'IVOIRE Kanga Kouakou Hermann Michel, Tra Bi Zamble Armand, Konan Bah Quentin, Dibi Kangah Pauline et Assi-Kaudjhis Joseph P. ....	264
CARTOGRAPHIE DU STRESS THERMIQUE AU SEIN D'UNE COURS D'ECOLE PARISIENNE : COUPLAGE DE MESURES MICROCLIMATIQUES FIXES et MOBILES Karam G., Chaniel M., Chaumont M., Hendel M. et Royon L. ....	270
SPATIALISATION DES TYPES DE BIOCLIMATS AU NIVEAU DE LA RÉGION DE FÈS-MEKNÈS (MAROC) À TRAVERS LES DONNÉES CHELSA ET PROJECTIONS FUTURES Kessabi R. et Hanchane M. ....	276
L'EFFET DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA PRODUCTION AGRICOLE DANS LES ZONES SEMI-ARIDES ET LES POSSIBILITES D'ADAPTATION, LE CAS DE LA PROVINCE DE SETTAT Khatrani Hamid et Sghir Said .....	282
IMPACT DE L'ÉVOLUTION PLUVIOMÉTRIQUE SUR LES ÉCOULEMENTS DE SURFACE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OTI AU TOGO Dambre Koungbanane, Henri S. Totinvodounon et Minkilabedjangbedja.....	288
MESURE ET DÉTECTION DES ÎLOTS DE CHALEUR ET DE FRAÎCHEUR EN MILIEU TEMPÉRÉ SEMI-CONTINENTAL : L'EXEMPLE DU TERRITOIRE DE METZ MÉTROPOLE Lebaut S., Hassani N. et Drogue G. ....	293
JOINT STUDY OF SPATIAL VARIABILITY OF TEMPERATURES AND WIND MACHINE PERFORMANCE IN THE QUINCY VINEYARD TO IMPROVE FIGHT AGAINST SPRING FROST EVENTS Le Cap C., Carlier J., Quenol H., Heitz D. et Buisson E. ....	299
CARACTÉRISATION DE LA SÉCHÉRESSE MÉTÉOROLOGIQUE- CAS DU BASSIN DE LA MOYENNE MOULOYA Lghabi Nezha, Lamaamri Mohamed, Ghazi Abdelkhalek et el Mamri Halima .....	305

L'INTÉGRATION DES ENJEUX D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES PROCESSUS DE PLANIFICATION ET D'AMENAGEMENT TERRITORIALE AU NIVEAU DE LA VILLE DE CASABLANCA (MAROC) Lotfi N., Bouaichea A., Chair M. et Karrouk M-S. ....	312
COMPORTEMENT THERMIQUE ET MICROCLIMATIQUE DE L'ARROSAGE D'UN REVÊTEMENT INNOVANT Parison Sophie, Chaniel Maïlys, Hendel Martin et Royon Laurent.....	318
LCZ - LOCAL CLIMATE ZONES, AIR TEMPERATURE AND POLLUTION IN CURITIBA (BRAZIL) Mendonça F., Anjos M., Roseghini W. F. F. et Leitoles G.....	324
VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS DANS LA REGION DE SFAX (TUNISIE) Mzoughi M., Feki M. et Dahech S. ....	330
FACTEURS ATMOSPHERIQUES RESPONSABLES DES FORTES PLUIES AUTOMNALES EN TUNISIE : CAS DES ÉVÈNEMENTS PLUVIEUX DE SEPTEMBRE ET DE NOVEMBRE 2020 Nasrallah W. et Al Atrach M-M. ....	336
IMPACT DE L'URBANISATION SUR LA TEMPERATURE DE SURFACE DE LA TERRE (LST) A MARRAKECH (MAROC) Nasraoui Rh. et Sghir S. ....	342
RENFORCEMENT DE LA RESILIENCE DES ECOSYSTEMES OASIENS DANS LE SUD TUNISIEN : CAS DE L'UTILISATION DES EAUX DE DRAINAGE POUR L'IRRIGATION DE LA CULTURE DE JONC DANS L'OASIS DE DOUZ Karbout N., Ardhaoui K. et Moussa M. ....	348
ESSAI DE MODELISATION DE LA CONCENTRATION DES PARTICULES DE LITHOMET EORES LIEES AU VENT DU KHAM SIN A DJIBOUTI VILLE. Nourayeh M. et Liban A. ....	353
L'IMPACT DES PROCESSUS NAO ET AMO SUR LA VARIABILITÉ DE L'UPWELLING AU LARGE DU MAROC Ouattab M., Charifi H., Moustabchir R., Amchghal M., Hilmi K. et El Filali A. ....	359
VALIDATION ET INTER-COMPARAISON DES BASES DE DONNEES SATELLITAIRES D'ESTIMATION DE RAYONNEMENT SOLAIRE INCIDENT SUR LA FAÇADE ATLANTIQUE D'AFRIQUE CENTRALE. Ouhechou A., Philippon N. et Morel B. ....	365
VARIATION SPATIALE DU CHAMP THERMIQUE DE LA VILLE DE LIMEIRA (SP), BRÉSIL Pascoalino A., Marandola Jr, E, Braga, L. C. et Aderaldo P. Í. C. ....	371
TENDANCE PLUVIOMETRIQUE DE LA SAISON PLUVIEUSE DANS LE TOGO CENTRAL ET SEPTENTRIONAL Pilabina Somiyabalo, Yabi Ibouaïma et Kola Edinam.....	377
SÉCURITÉ ALIMENTAIRE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE EN RÉGION AMORON'IA MANIA MADAGASCAR Randriamifidison R.F.A., Tsiavahananahary T.J., Rejo-Fienena F., Rene De Rolland L.A et Andriamampihantona F. ....	383

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES AMBIANCES THERMIQUES NOCTURNES EN SAISON CHAUDE DANS LA TUNISIE DU NORD Riahi Mustapha.....	389
ATTRIBUTION D'ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES : DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE ET PARTICIPATION À UN PROTOTYPE DE SERVICE D'ATTRIBUTION Yoann Robin, Agathe Drouin, Lola Corre, Aurélien Ribes et Pascal Simon.....	395
LA RELATION ENTRE LA STABILITÉ ATMOSPHERIQUE (MODELE PGT) ET L'ILOT DE CHALEUR A FLORIANOPOLIS (BRESIL) Rocha G., Dubreuil V. et Mendonça F.....	401
VARIABILITE DES PRECIPITATIONS PRINTANIERES EN RELATION AVEC L'ENSO EN MILIEUX OASIENS MAROCAINS Sadiki A. et Hanchane M. ....	407
EVALUATION OF SOLAR RADIATION DATA IN THE MOROCCAN CAPITAL CITY Zaim Salma, Arbaoui Asmae Aet Barhdadi Abdelfetah.....	413
L'AGRICULTURE INTELLIGENTE COMME FORME D'ADAPTATION AVEC LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU MAROC Saloui A. et Adidi A .....	419
MODELISATION DE L'ILOT DE CHALEUR (ICU) SUR LA VILLE DE CASABLANCA Sebbar A., Hsaine M., Idrissi Azami Gh., Fougrache H., Hanchane M. et Badri W. .....	425
VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DE L'OZONE TROPOSPHERIQUE A BIZERTE Sellami M, Dahech S. et Charfi S. ....	431
CARACTERISATION DES TEMPERATURES DIURNES ET NOCTURNES EXTREMES DANS LE SUD FORESTIER IVOIRIEN ENTRE 1961 ET 2014 Sohous.O., N'da K. C., et Dibi Kangah A. P. ....	437
EVALUATION DE NOUVEAUX INDICATEURS CLIMATIQUES POUR LE SECTEUR ÉOLIEN EN FRANCE Soubeyroux J.-M., Capo J., Tocquer F., Parrant M., Bresteaux, M., Nurel, R. et Guerin, N .....	442
LES CHANGEMENTS DES TEMPERATURES A BEYROUTH ET LEURS RELATIONS AVEC LES TYPES DE CIRCULATION ATMOSPHERIQUE Traboulsi M., Tolika K., Anagnostopoulou Ch. et Maherass P.....	448
LA VARIABILITE HYDRO-CLIMATIQUE ET LEURS IMPACTS SUR LE SYSTEME HYDROLOGIQUE DU MOYEN SEBOU (PRE-RIF) -MAROC Yazami Ztait M., Ouali Alami F-Z., Taleb A., Bouaiche A. et Chkhami Kh. ....	454







## CLIMAT(S) ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

DOUGUEDROIT A.

*UMR 7300 ESPACE (CNRS), Aix-Marseille Université. Technopôle de l'environnement Arbois – Méditerranée. BP 80, Bâtiment Laennec, Avenue Louis Philibert 13545 Aix-en-Provence Cedex 04. France.*

### Résumé:

*La définition du climat moyen, souvent appelé tout simplement le climat, sera abordée à partir d'un exemple, celui de la Montagne Suisse, pour en montrer à la fois l'intérêt et les simplifications. Nous évoquerons la typologie des différents climats, les topo-climats à partir de nos travaux sur l'évolution des températures de l'Extême sud-est de la France et les îlots de chaleur urbains d'après la littérature. C'est à partir des publications de l'IPCC (International Panel on Climate Change) que sera présenté le changement climatique actuel suivi d'une part son évolution depuis la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, l'époque du "Petit âge glaciaire" replacée elle-même dans la période historique et d'autre part une évocation des hypothèses de sa possible évolution au cours de ce siècle.*

**Mots-clés :** *Topo-climats, Îlots de chaleur urbains, Changement climatique actuel, Proche passé climatique, Hypothèses d'avenir.*

**Key-words :** *Topo-climates, Urban heat islands, Present climate change, Near climate change, Future hypotheses.*

### 1 Introduction

Cette présentation, qui se limite à des aspects thermiques du climat des terres émergées, pourrait faire office d'introduction sommaire à nombre des présentations de ce colloque. Dans la première partie, je vais aborder, à partir d'un exemple publié récemment sur le niveau moyen du 0°C dans les montagnes suisses, la question des difficultés rencontrées pour estimer les moyennes qui agglomèrent une diversité de climats dans la représentation d'un climat moyen. Elle sera suivie de la présentation des différents types de climats thermiques des terres émergées à échelle infra-régionale, appelée aussi locale. Dans la seconde partie nous passerons à l'évolution de la moyenne de tous ces climats locaux à l'échelle des terres émergées utilisée pour estimer la température moyenne de l'ensemble de ces dernières et son évolution récente appelée « le changement climatique ».

### 2 Typologie et caractéristiques des climats dits « locaux ».

Dans un article très récent sur la ligne altitudinale moyenne du zéro degré dans les Alpes suisses (S. C. Scherrer et al., 2021), une ligne moyenne sinueuse des données mesurées selon l'altitude est transformée en ligne décroissant régulièrement et estimée mensuellement grâce à un modèle statistique complexe. La comparaison de l'évolution des valeurs moyennes mensuelles entre 1864 et 2019 calculées en écarts par rapport à 1981-2010 montre une surestimation de ces derniers pendant la saison froide. La nécessité de faire intervenir un programme complexe, dont le résultat ne donne pas totalement satisfaction, est associée à la prise en compte de différents types de climats dépendant les uns de la relation température-topographie, les « topo-climats », et les autres de l'influence humaine dont les concentrations en espaces urbanisés crée les « îlots de chaleur urbains ».

#### 2.1 Les topo-climats : définition.

Les différents topo-climats sont représentés sur la Fig. 1 : dans un espace thermiquement homogène leur définition repose sur la relation entre la température et les formes du relief qui commandent la quantité d'énergie solaire reçue le jour et l'accumulation relative d'air froid en fin de nuit. (Douguedroit A., 2019).

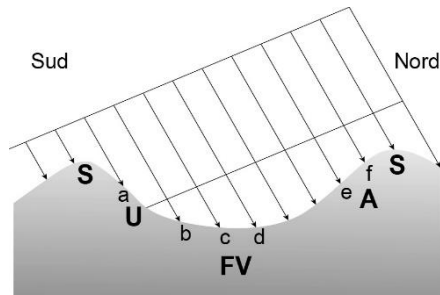


Fig. 1 : Les différents topo-climats associés à la montagne. Nous donnons ici comme exemple les noms locaux des Alpes françaises. A-B : versant sud (Adret), E-F : versant nord (Ubac), C-D : Fond de vallée et S : Sommet ou Ligne de crête..

## 2.2 Le cas de l'Extrême sud-est de la France

L'extrême sud-est français, espace thermiquement homogène, permet de caractériser certains de ces différents topo-climats. Seuls Adrets et Fonds de vallée sont représentés dans l'intérieur de la région (Fig. 2 et 3).

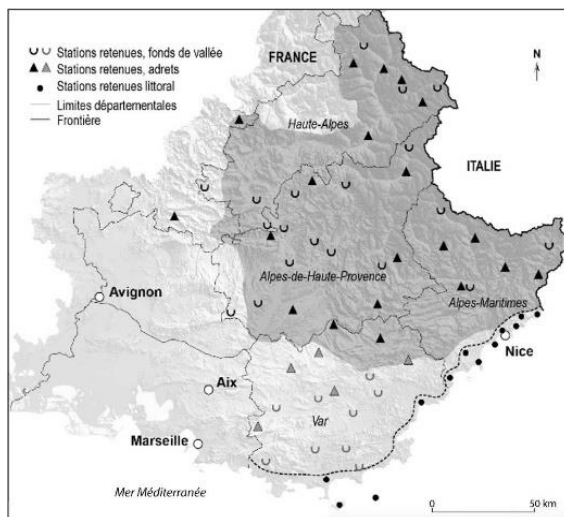


Fig. 2 (à gauche) : L'extrême sud-est français avec la localisation des stations représentatives de trois topo-climats : Adrets, Fonds de vallée et Littoral (dont nous parlerons ultérieurement). Deux topo-climats, les Ubacs et les Crêtes manquent ici, faute de stations représentées.

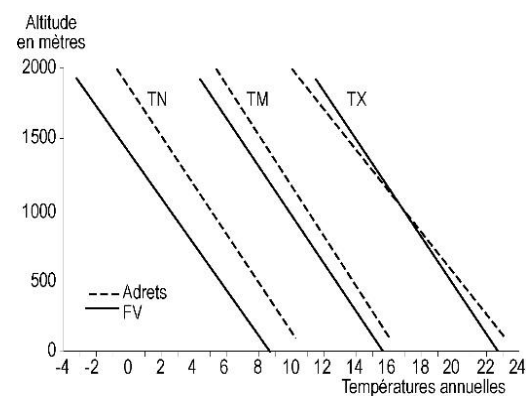


Fig. 3 (à droite) : Comparaison entre les moyennes annuelles 2011-2017 des Adrets et des Fonds de Vallée de l'extrême sud-est français, avec TX : Températures maximales, TN : Températures minimales et TM : Températures moyennes.

La comparaison entre les distributions altitudinales des températures des Adrets et des Fonds de Vallée confirme que les différences entre leurs températures tiennent au rôle des accumulations d'air froid nocturne dans les seconds avec une différence moyenne des minima dans l'Extrême sud-est français de l'ordre de  $2^{\circ}\text{C}$ , ce qui induit une différence des températures moyennes autour de  $1^{\circ}\text{C}$ . Les Alpes suisses du nord et le Jura français présentent la même caractéristique mais très prononcée, donnant lieu à des inversions (Joly D. et Richard Y., 2019). Ce sont ces inversions épaisses qui provoquent la sinuosité dans la ligne du  $0^{\circ}\text{C}$  dont il a été question plus haut et rendent nécessaire la création d'un modèle complexe pour tenter de rendre cette ligne aussi linéaire que possible (S. C. Scherrer et al., 2021).

Les températures maximales des crêtes et sommets sont du même ordre que celle des Adrets de même altitude alors que les températures minimales sont plutôt un peu plus élevées que celles des Adrets, sans doute à cause d'un renouvellement plus rapide de l'air froid.

Ces définitions des topoclimats présentés pour le cas d'un ensemble montagneux aux sommets les plus élevés dépassant 3000 mètres d'altitude ne doit pas laisser penser qu'ils sont spécifiques des montagnes. Elles s'appliquent à tout relief, même avec des dénivellations faibles. Par exemple, les accumulations nocturnes dans les fonds de vallée sont une caractéristique générale associée à des creux, même dans les reliefs sans importante dénivellation (Beltrando G., Quenol H., Monteiro A. et Maciel A., 2004).

### 2.3 Définition d'un nouveau topoclimat : celui des littoraux

L'extrême sud-est français a permis de définir un cinquième topoclimat, celui du littoral, contact entre le continent et la mer (Fig. 2). Sa caractéristique principale qui permet de le définir est l'influence de la mer qui se reconnaît par les différences de température avec l'Intérieur (Fig. 4) : il est moins chaud de jour et plus chaud la nuit, influencé par la présence de la mer dont on reconnaît les traits caractéristiques des écarts de température terre-mer. L'écart est plus important de nuit que de jour, sous l'effet du rayonnement solaire. Cet écart n'est pas limité au niveau de la mer; il se poursuit en altitude lorsqu'existe un relief surplombant directement la mer comme le montre le cas du Mt Agel (1148m d'altitude) à Eze (Douguédroit, 2019).

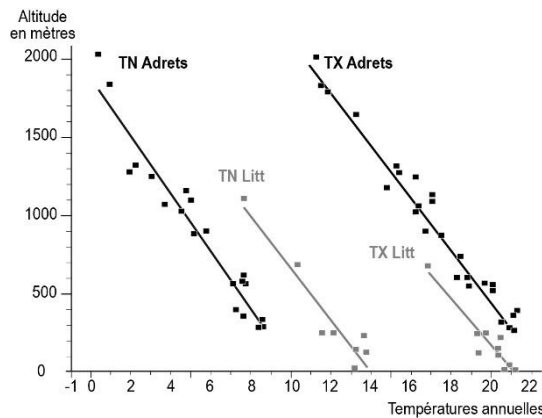


Fig. 4 : Différence entre les températures maximales et minimales des Adrets et du Littoral de l'Extrême sud-est de la France (Douguédroit, 2019).

Ce topoclimat littoral n'est pas limité à la Mer méditerranée. Il concerne tous les littoraux en eau libre, les mers ainsi que, sur les terres émergées, les contacts entre la terre et les lacs et bords des rivières. Les littoraux englacés forment un autre type de contact.

Tous ces topoclimats ont pour caractéristique commune de concerner des espaces soit vides de population permanente soit occupés par de petits groupes de population permanente, les villages. Ces espaces sont en général, appelés « ruraux ».

### 2.4 Les autres climats « locaux ».

Les concentrations de population génèrent, quant à elles, des aires thermiques, les « Ilots de chaleur urbain » au réchauffement spécifique supérieur à celui des espaces « ruraux » qui les entourent. Cette notion d'« Ilots de chaleur urbain » est bien connue depuis le siècle dernier (Landsberg H. E., 1981, Yoshino M., 1987). L'écart thermique avec l'extérieur de l'îlot de chaleur urbain croît, en règle générale, avec la population. Alors que les villes grossissent en taille, elles jouent un rôle croissant dans l'augmentation des gaz à effet de serre sur place et par les besoins et déplacements de leur populations.

Des méthodes d'estimation des différences de température entre les îlots de chaleur urbain et leur environnement autres que les relevés de température sous abri sont apparues récemment, comme l'utilisation des images satellites (Peng S. et al., 2012).

Leur étude n'entre pas dans notre propos, en dépit du rôle important que ces « Îlots de chaleur urbains » jouent dans le « changement climatique ».

### **3. Le changement climatique**

Les premiers mois de l'année 2021 sont marqués par 2 publications internationales qui font le point sur le réchauffement climatique, l'une publiée du WMO (World Meteorological Administration) le 27 mai 2021 insiste sur l'augmentation de la température moyenne mondiale depuis 1981 : +1,1°C (à 0.1°C près) par rapport aux valeurs de la période pré-industrielle (moyenne 1850-1900). Les 9 années les plus chaudes de la période sont postérieures à 2004 et les 6 dernières années, 2015–2020, ont été les plus chaudes de la série avec 2016, année la plus chaude (moyenne >0,56°C à la moyenne 1981-2019) (WMO, 2021).

Lors de la visioconférence, nous avons présenté des figures de plusieurs rapports du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ; IPCC ou International Panel on Climate Change en anglais) que les conditions mises pour leur reproduction (la totalité de chaque image et de son commentaire) ne nous permettent pas de reprendre ici faute de place. Nous avons eu l'autorisation, sous conditions, de reproduire la Fig 5 (voir page 5) extraite de Global Warming of 1.5°C (Masson-Delmotte V. et al., In Press). Elle représente l'évolution de la température moyenne de la surface du globe de 1960 à 2017.

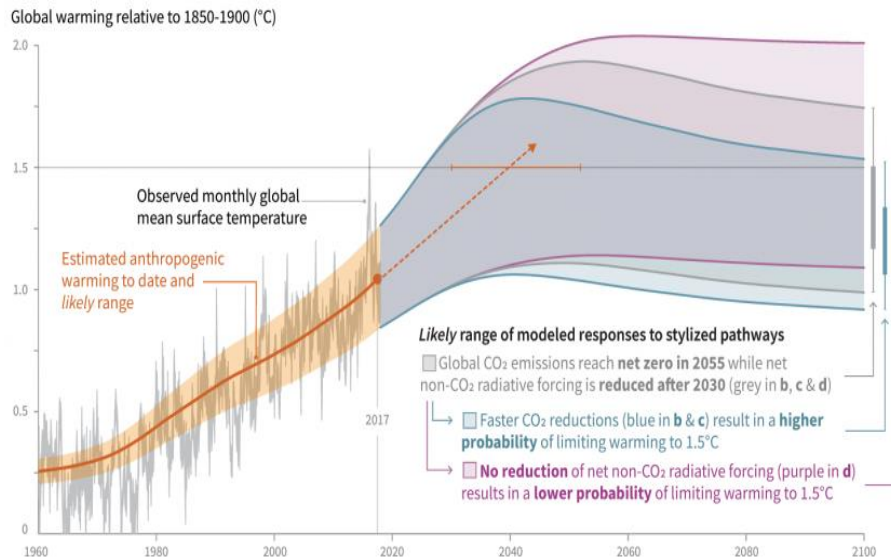
La température moyenne mondiale est qualifiée d'anthropogénique. Pour comprendre la justification de cette expression il convient de rappeler que le niveau de référence de l'augmentation de la température estimée par l'IPCC renvoie à la période allant de 1860-1900 à maintenant (voir la figure 10.1, a à f, du Rapport AR5, IPCC 2013) présentée seulement pendant la visio-conférence. Sur cette figure la courbe moyenne de la température mondiale (en a) est associée à son forçage naturel (en b) et à son forçage anthropogénique (en c). Le forçage naturel est celui de l'énergie reçue du soleil qui, en dépit de quelques oscillations, ne varie pas de façon statistiquement significative. C'est pourquoi il est admis que la variation de la température moyenne mondiale est, jusque vers 1950-60, sous la dépendance primordiale des apports thermiques de la radiation solaire dont elle est très proche. Ensuite la courbe présente une rapide accélération alors que les apports en calories venus du soleil sont statistiquement constants ; elle est en relation avec celle de la quantité de gaz à effet de serre envoyés dans l'atmosphère. La figure 10.1 (a à f) du Rapport AR5 (IPCC 2013) présentée pendant la visio-conférence montre bien cette rupture.

Au rythme actuel du réchauffement, son prolongement après 2017 ferait atteindre l'augmentation de la moyenne mondiale, sous-entendu depuis la période pré-dustrielle de 1860-1900, de 1.5°C avant 2040. Ce niveau d'augmentation de 1.5°C renvoie aux décisions de l'Accord de Paris (signé en 2015 avec ratifications à partir de 2016) au cours duquel 191 pays officiellement reconnus par l'ONU s'étaient engagés à tendre, de préférence et le plus tôt possible, vers une augmentation de la température moyenne mondiale limitée à 1.5°C suivie d'une stabilisation à cette valeur jusqu'en 2100.

La partie droite de la Fig 5, a montre différentes hypothèses d'évolutions des quantités de gaz à effet de serre rejetés dans l'atmosphère et leur effet sur la variation de la température moyenne mondiale.

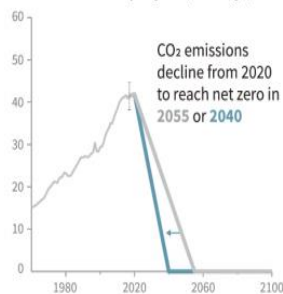
## Cumulative emissions of CO<sub>2</sub> and future non-CO<sub>2</sub> radiative forcing determine the probability of limiting warming to 1.5°C

### a) Observed global temperature change and modeled responses to stylized anthropogenic emission and forcing pathways



### b) Stylized net global CO<sub>2</sub> emission pathways

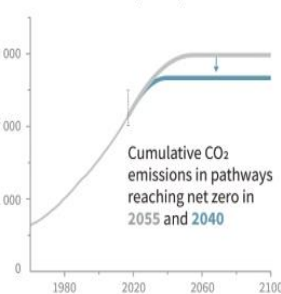
Billion tonnes CO<sub>2</sub> per year (GtCO<sub>2</sub>/yr)



Faster immediate CO<sub>2</sub> emission reductions limit cumulative CO<sub>2</sub> emissions shown in panel (c).

### c) Cumulative net CO<sub>2</sub> emissions

Billion tonnes CO<sub>2</sub> (GtCO<sub>2</sub>)



Maximum temperature rise is determined by cumulative net CO<sub>2</sub> emissions and net non-CO<sub>2</sub> radiative forcing due to methane, nitrous oxide, aerosols and other anthropogenic forcing agents.

### d) Non-CO<sub>2</sub> radiative forcing pathways

Watts per square metre (W/m<sup>2</sup>)

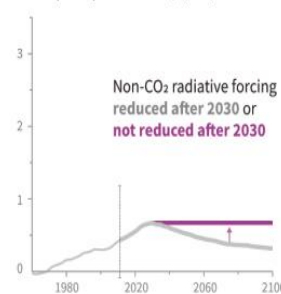


Fig 5 : Panel a: Observed monthly global mean surface temperature (GMST, grey line up to 2017, from the HadCRUT4, GISTEMP, Cowtan–Way, and NOAA datasets) change and estimated anthropogenic global warming (solid orange line up to 2017, with orange shading indicating assessed likely range). Orange dashed arrow and horizontal orange error bar show respectively the central estimate and likely range of the time at which 1.5°C is reached if the current rate of warming continues. The grey plume on the right of panel a shows the likely range of warming responses, computed with a simple climate model, to a stylized pathway (hypothetical future) in which net CO<sub>2</sub> emissions (grey line in panels b and c) decline in a straight line from 2020 to reach net zero in 2055 and net non-CO<sub>2</sub> radiative forcing (grey line in panel d) increases to 2030 and then declines. The blue plume in panel a shows the response to faster CO<sub>2</sub> emissions reductions (blue line in panel b), reaching net zero in 2040, reducing cumulative CO<sub>2</sub> emissions (panel c). The purple plume shows the response to net CO<sub>2</sub> emissions declining to zero in 2055, with net non-CO<sub>2</sub> forcing remaining constant after 2030. The vertical error bars on right of panel a show the likely ranges (thin lines) and central terciles (33rd – 66th percentiles, thick lines) of the estimated distribution of warming in 2100 under these three stylized pathways. Vertical dotted error bars in panels b, c and d show the likely range of historical annual and cumulative global net CO<sub>2</sub> emissions in 2017 (data from the Global Carbon Project) and of net non-CO<sub>2</sub> radiative forcing in 2011 from AR5, respectively. Vertical axes in panels c and d are scaled to represent approximately equal effects on GMST. {1.2.1, 1.2.3, 1.2.4, 2.3, Figure 1.2 and Chapter 1 Supplementary Material, Cross-Chapter Box 2 in Chapter 1}.

In Allen, M.R., O.P. Dube, W. Solecki, F. Aragón-Durand, W. Cramer, S. Humphreys, M. Kainuma, J. Kala, N. Mahowald, Y. Mulugetta, R. Perez, M. Wairiu, and K. Zickfeld, 2018: Framing and Context. In Masson-Delmotte, V et alii. In Press.

### 3 Conclusion

La vitesse de l'accroissement actuel d'origine anthropogénique de la température moyenne mondiale s'est accélérée depuis le début de ce siècle alors que cette année 2021 est accompagnée de phénomènes dits « exceptionnels » aussi bien sur le plan des très fortes chaleurs que des importantes chutes de pluie. Mais de tels phénomènes resteront-ils exceptionnels ou le deviendront-ils de moins en moins ? Le climat serait-il en train de s'emballer ?

L'IPCC (ou GIEC en Français) a jugé suffisamment inquiétante l'évolution actuelle du climat mondial pour mettre sur son site, une année avant la date prévue, 2022, pour le texte définitif du 6<sup>ème</sup> Rapport un texte « In Press » sur les « Bases physiques » du climat (Masson-Delmotte et al. In Press).

### 4 Bibliographie

Douguédroit A., 2019, La modélisation topoclimatique de la température et son application à l'Extrême Sud-est de la France. 34<sup>ème</sup> Colloque Annuel de l'Association Internationale de Climatologie. Thessalonique (Grèce).

Joly D., Richard Y., 2019. Topographic descriptors and thermal inversions amid the plateaus and mountains of the Jura (France). *Theoretical and Applied Climatology*, 138, 639–65.

IPCC 2013. *Climate Change 2013. The physical Science Basis. Contributions of Working Group 1 to the Assessment Report of the IPCC* (Stoker T.F., Qinn G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nabels A., Xia Y., Bexwend M., Midgley P.-M. (eds). Cambridge University Press, United Kingdom and New-York, NY, USA, 1585 p.

Landsberg H. E., 1981, *The urban climate*. International Geophysics Series, Vol. 28, Academic Press. New-York.

Masson-Delmotte, V., Zhai P., Pörtner H.-O., Roberts D., Skea J., Shukla P.R., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R., Connors S., Matthews J.B.R., Chen Y., Zhou X., Gomis M.I., Lonnoy E., Maycock T., Tignor M., and Waterfield T. (eds.). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. In Press.

Peng S., Shilong P., Ciais P., Friedlingstein P., Otle C., Bréon F.-M., Huijuan N., Liming Z., and Myneni R.B. (2012) Surface Urban Heat Island Across 419 Global Big Cities. *Environ. Sci. Technol.*, 46, 12, 6889-6890. <https://doi.org/10.1021/es301811b>.

Quenol, H., Monteiro, A., Beltrando G., et Maciel A., 2004, Mesures climatiques aux échelles fines (météorologiques et agronomiques) et variabilité spatiale du gel printanier dans le vignoble de Vinho Verde (Portugal). *Micro scales meteorological and agronomical measurements and spatial variability of spring frost in Vinho Verde vineyard (Portugal)*. *Norois*, 117-132. <https://doi.org/10.4000/norois.826>.

WMO. *The State of the Global Climate 2020*. 20 Avril 2021. Provisionnal Report.

Yoshino M.M., 1975. *Climate in a small area. An introduction to local meteorology*. University of Tokyo Press, Tokyo. 549p.

## **POLLUTION ATMOSPHERIQUE AUX PARTICULES FINES AU SUD DE PARIS EN 2020 : PENDANT ET EN DEHORS DU CONFINEMENT DU COVID-19**

Abdmouleh M-A. et Dahech S.

Université de Paris, UFR GHES, UMR 8586 du CNRS (PRODIG), France, [abdmouleh.mohamedali@yahoo.com](mailto:abdmouleh.mohamedali@yahoo.com); [salem.dahech@gmail.com](mailto:salem.dahech@gmail.com)

**Résumé :** Ce travail a pour objectif d'analyser les variations spatiotemporelles du niveau de la pollution de l'air aux PM<sub>2.5</sub> et PM<sub>10</sub> sur l'aile sud de l'agglomération parisienne, le long du boulevard périphérique en 2020, pendant et en dehors des confinements. Nous avons enregistré plusieurs dépassements de la norme préconisée par L'organisation Mondiale de la Santé (OMS) durant les deux périodes de confinement aux stations Airparif de boulevard Est et boulevard d'Auteuil. Malgré une baisse de la densité du trafic routier, les conditions atmosphériques stables justifient ces dépassements. Les résultats issus des campagnes de mesures semi-itinérantes, au 13<sup>ème</sup> arrondissement de Paris, montrent que les concentrations en PM<sub>2.5</sub> et PM<sub>10</sub>, pendant et en dehors des confinements, varient en fonction de la densité du trafic routier et des conditions météorologiques.

**Mots clés :** COVID-19, Paris, PM<sub>2.5</sub> et PM<sub>10</sub>, temps

**Abstract :** The objective of this work is to analyze the spatiotemporal variations in the level of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> air pollution on the south part of Paris along the ring road during and outside containment periods. We recorded several pollution peaks during the two containment periods, at the Boulevard Est and Boulevard d'Auteuil Airparif stations. Despite a decrease in road traffic density, the stable atmospheric conditions justify these exceedances. The results of the mobile survey in the 13<sup>th</sup> arrondissement of Paris show that PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> concentrations, during and outside confinement, vary according to road traffic density and weather conditions.

**Key word :** Air Quality, COVID-19, Paris

### **Introduction**

La pollution de l'air est considérée comme un tueur silencieux ; ses impacts néfastes sur la santé humaine sont incontestables (OMS, 2020). La résolution des problèmes liés à la pollution atmosphérique dans les villes en croissance est devenue une préoccupation majeure à cause de la forte augmentation du trafic routier dans les zones urbaines densément peuplées, de l'industrialisation croissante, et de la forte consommation d'énergie. Ces problèmes s'aggravent quand les moyens de surveillance de la qualité de l'air et les politiques de réduction des émissions polluantes sont insuffisants voir parfois défailtants (Kumar et al., 2015, Mihai et al., 2019). La qualité de l'air ne dépend pas uniquement des polluants atmosphériques provenant de sources plus ou moins connues ; elle est largement impactée par les conditions météorologiques et climatiques. En effet, certaines situations météorologiques particulières comme les situations anticycloniques, avec des inversions thermiques la nuit et le matin, sont responsables des pics de pollution de l'air (Roussel, 1993).

En Île-de-France le transport routier est le principal émetteur de la pollution de l'air avec 56 % des émissions de NOx et de 35 % des émissions de PM<sub>2,5</sub> (Airparif, 2016). L'Association de la surveillance de la qualité de l'air en région Ile-de-France (Airparif) estime que trois millions de franciliens, résidant à proximité des principaux axes routiers, sont susceptibles d'être exposés à des niveaux de pollution atmosphérique dépassant les seuils critiques (Airparif, 2018).

En 2020, le monde entier a été touché d'une manière foudroyante par la pandémie du COVID 19 y compris la France, à partir du mois de janvier. Cette pandémie pourrait impacter indirectement la pollution de l'air dans les grandes villes. La pandémie du COVID-19 a considérablement limité les transports en ville. En effet, pendant les deux épisodes de confinement décodés en France (au printemps et en automne), une adoption généralisée de politiques de travail à distance et des fermetures temporaires d'entreprises et de certains commerces ont limité les déplacements habituels de la population. Cette étude examine comment ces changements soudains dans les modèles de circulation pourraient affecter les concentrations des particules fines (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>), au Sud de Paris en fonction des types de temps. A travers ce travail nous souhaitons, dans un premier temps, étudier la variation



temporelle des  $PM_{10}$  et des  $PM_{2.5}$  sur l'aile sud de l'agglomération parisienne le long du boulevard périphérique pendant et en dehors des confinements en 2020. Dans un deuxième temps, nous comparons les dépassements des seuils recommandés par l'OMS pendant et en dehors des confinements et identifions les types de temps associés à ces pics.

### 1. Zone d'étude, méthodes et données

La région Île-de-France, au nord de la France, est une source de dynamisme économique à l'échelle nationale, européenne et mondiale (Camors., et *al.*, 2016). Suivant le dernier rapport de l'Insee, l'Île-de-France compte 12 174 880 habitants. La région concentre diverses activités industrielles, tertiaires avec un trafic routier dense en raison des multiples déplacements de la population et des marchandises qui y convergent, notamment vers sa partie centrale : Paris intra-muros. La qualité de l'air ne cesse pas de s'améliorer à Paris ; toutefois les particules fines demeurent parmi les polluants problématiques émis par les sources mobiles et fixes. Ainsi notre choix a porté sur l'étude des  $PM_{10}$  et  $PM_{2.5}$ . Nous utilisons les données horaires fournies par Airparif pour deux stations implantées près du boulevard périphérique : Auteuil et Paris Est respectivement au 16ème et 12ème arrondissement de Paris (fig.1).

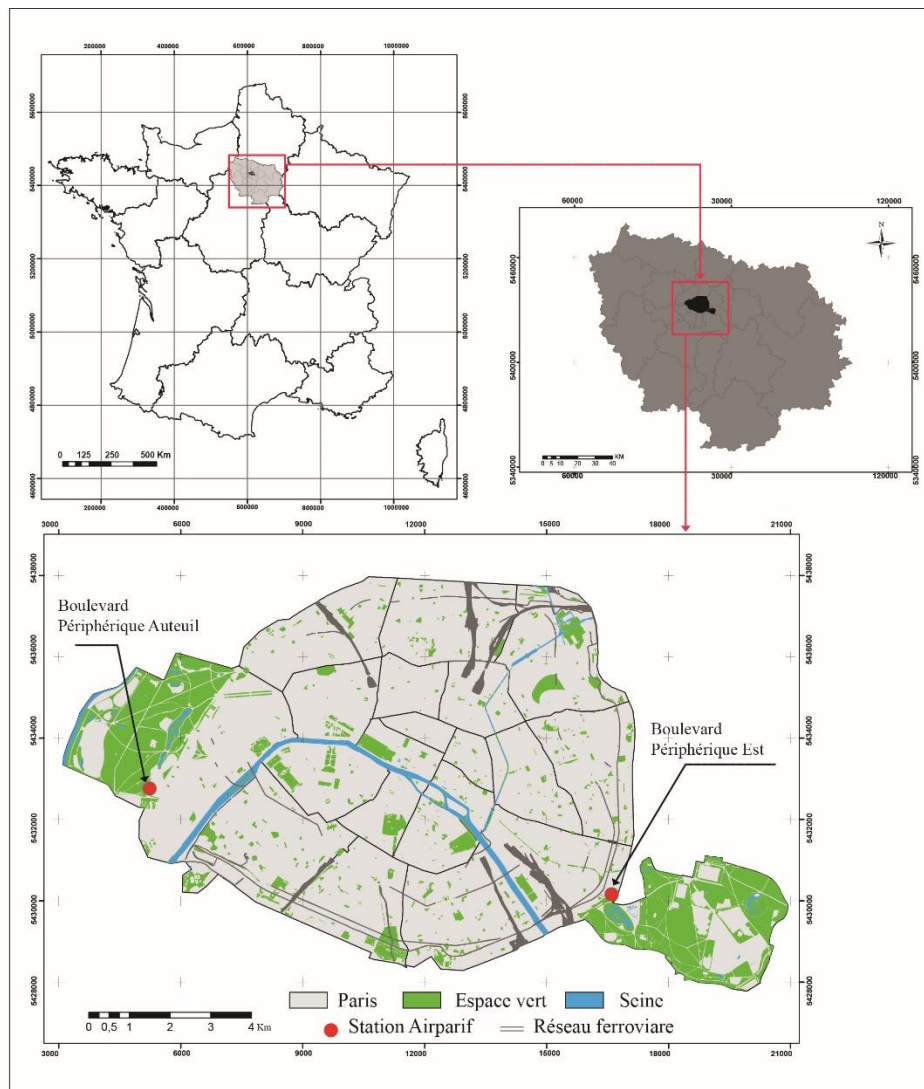


Figure 1. Localisation de la zone d'étude et des stations d'Airparif (source : [www.data.gouv.fr](http://www.data.gouv.fr)).

En complément, nous avons réalisé des campagnes de mesures itinérantes au 13ème arrondissement de Paris pendant et en dehors du confinement automnal. Pendant ce dernier, 15 campagnes de mesures sont réalisées moyennant des stations portables « Aeroqualseries 500

versions pro » pour couvrir 30 points de mesure à proximité du boulevard périphérique pendant les deux périodes de pointe du trafic routier. Les mesures réalisées sont de type semi- itinérantes du 03/11/2020 au 26/11/2020 avec un arrêt de 5 minutes par point.

## 2. Variation temporelle des PM<sub>10</sub> et des PM<sub>2,5</sub> sur l'aile sud de Paris

Les concentrations moyennes quotidiennes des PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> calculées en 2020 montrent une forte variabilité spatiotemporelle. Si la plupart des enregistrements sont inférieurs à la norme préconisée par l'OMS, des dépassements ponctuels sont enregistrés pendant les deux confinements comme en situation normale (hors confinement). Sur le plan spatial, les données enregistrées dans les deux stations sont fortement corrélées. En effet, la relation entre les moyennes quotidiennes de chacun des deux polluants par station est forte, positive et significative avec  $r=0,89$  pour les PM<sub>2,5</sub> et  $r=0,94$  pour les PM<sub>10</sub>. Les moyennes quotidiennes des PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> pour l'année sont 14 et 26  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  à Boulevard Est et 13 et 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  à Boulevard Auteuil. Cette moyenne cache une variabilité temporelle (fig.2). En effet, le coefficient de variation atteint environ 50% dans les deux stations. A l'échelle hebdomadaire, nous avons calculé les moyennes pour 3 périodes : le premier confinement, du 17/03/2020 au 11/05/2020, le deuxième confinement allant du 31/11/2020 au 15/12/2020, ainsi que toute l'année 2020 (toutes situations confondues). Les concentrations des PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> baissent pendant les weekends notamment le dimanche, en raison d'un trafic routier moins dense. Les concentrations moyennes quotidiennes sont comparables pendant les jours ouvrables de la semaine.

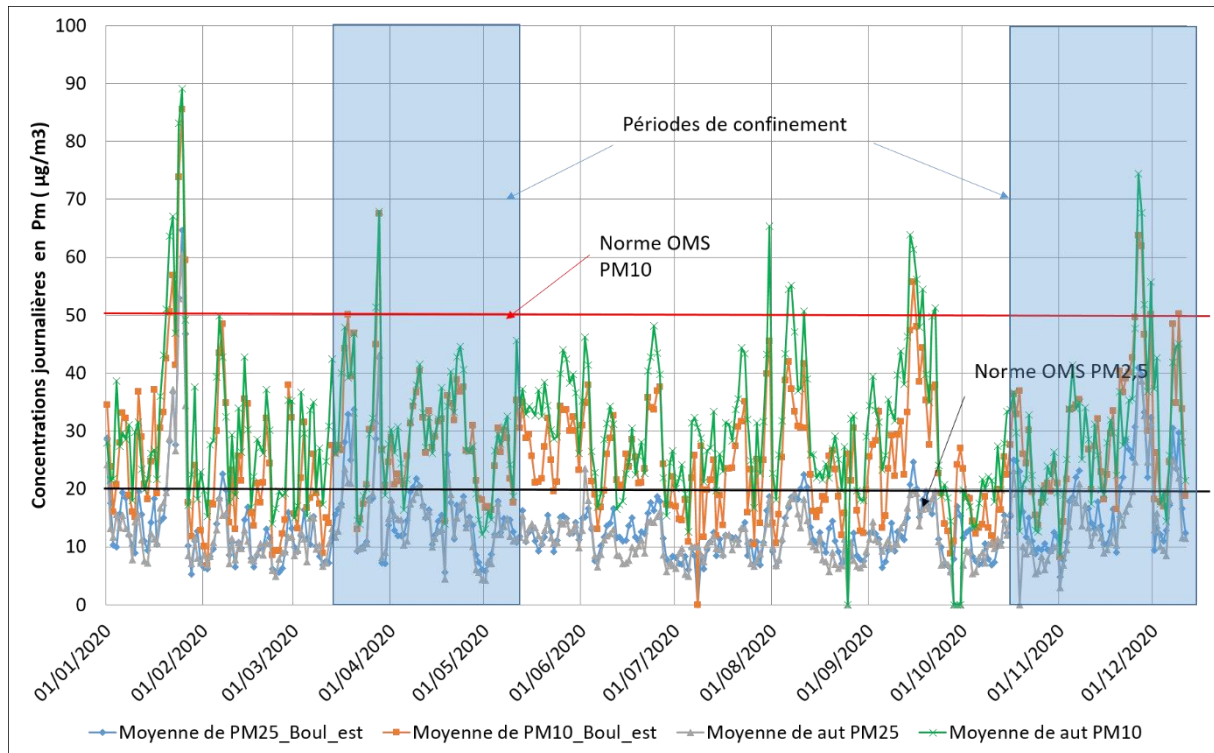


Figure 2. Concentrations quotidiennes des PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> sur l'aile sud de l'agglomération parisienne en 2020 dans les deux stations Boulevard périphérique Est et boulevard Auteuil (données Airparif).

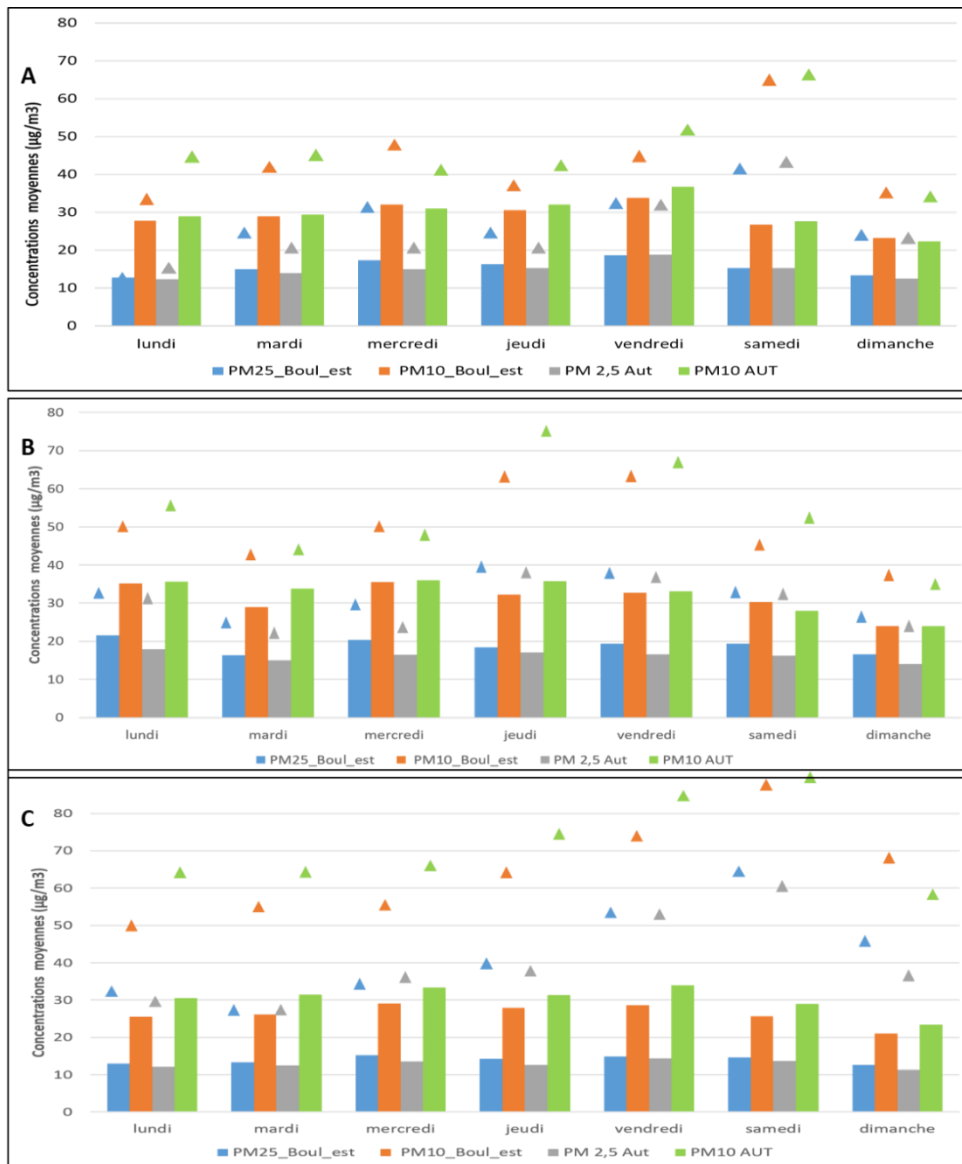


Figure 3. Variation hebdomadaire des concentrations moyennes et maximales en  $PM_{2.5}$  et  $PM_{10}$  sur l'aile sud de l'agglomération parisienne en 2020 pendant le premier et le deuxième confinement (A et B) et durant toute l'année (C) (données Airparif pour les deux stations Boulevard périphérique Est et boulevard Auteuil)

Durant l'année 2020, toutes situations météorologiques confondues (Fig.3 C), la moyenne des concentrations quotidiennes est d'environ  $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à boulevard Est et baissée légèrement à boulevard Auteuil durant les jours ouvrables aussi bien que le samedi. Une baisse d'environ  $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$  est observée le dimanche dans les deux stations. Les  $PM_{10}$ , quant à elles, sont plus élevées à boulevard Auteuil ou la moyenne quotidienne varie de  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  le lundi à  $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$  le vendredi ; le weekend, une légère baisse est observée le samedi ( $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) qui se confirme le dimanche ( $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). La même tendance est observée à Paris Est. Pendant les deux périodes de confinement le régime hebdomadaire n'a pas changé. Si les valeurs moyennes pendant le premier confinement (fig.3A) sont comparables à la situation moyenne (fig.3C), les concentrations des  $PM_{2.5}$  et  $PM_{10}$  ont connu une hausse d'environ  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les premiers et  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les deuxièmes (fig.3B). Cette hausse peut s'expliquer par des conditions météorologiques favorables à la forte concentration des polluants est le caractère moins strict du deuxième confinement. En effet, le trafic routier a baissé de 70% pendant le premier confinement contre 30% pendant le deuxième (<https://opendata.paris.fr>). En dehors des moyennes hebdomadaires, les valeurs maximales absolues sont plus élevées en dehors des

deux confinements. Elles montrent, toutefois, des dépassements des seuils recommandés par l'OMS aussi bien en dehors que pendant les périodes de confinement.

### 3. Dépassements des seuils recommandés par l'OMS pendant et en dehors des confinements

En 2020, les dépassements de la norme journalière fixée à  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $\text{PM}_{2.5}$  et  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $\text{PM}_{10}$  sont plus nombreux pour les  $\text{PM}_{2.5}$  dans les deux stations (fig.4). En effet, nous avons calculé 43 dépassements à boulevard Est et 30 à boulevard Auteuil pour les  $\text{PM}_{2.5}$  contre 13 à boulevard Est et 22 à boulevard Auteuil pour les  $\text{PM}_{10}$ . Une bonne partie de ces dépassements a eu lieu pendant les deux confinements et particulièrement le deuxième. Nous recensons, dans les deux stations, un total de 18 dépassements au premier contre 27 au deuxième pour les  $\text{PM}_{2.5}$  et 4 contre 9 pour les  $\text{PM}_{10}$ . Les pics sont légèrement plus élevés à Paris Est. Pendant le premier confinement, les concentrations maximales ont été enregistrées le 28 mars par temps anticyclonique caractérisé par un haut géopotential en altitude et la migration au nord de l'anticyclone Subtropical qui a atteint l'Islande. Un vent faible du secteur septentrional et un ciel clair ont été observés. Des situations d'inversion thermique ont été également enregistrées en région parisienne d'après le radiosondage de Trappes et attestées par des bancs de brouillard épais qui ont persisté jusqu'à 17h. Au deuxième confinement, les pics de PM ont été enregistrés durant un long épisode anticyclonique allant du 20 au 30 novembre avec des valeurs maximales le 26 novembre marqué par un vent très faible (inférieur à 2m/s) et une inversion thermique. En somme, les situations radiatives favorables à l'accumulation des PM s'étalaient sur 15 jours au premier confinement et sur 16 jours au deuxième.

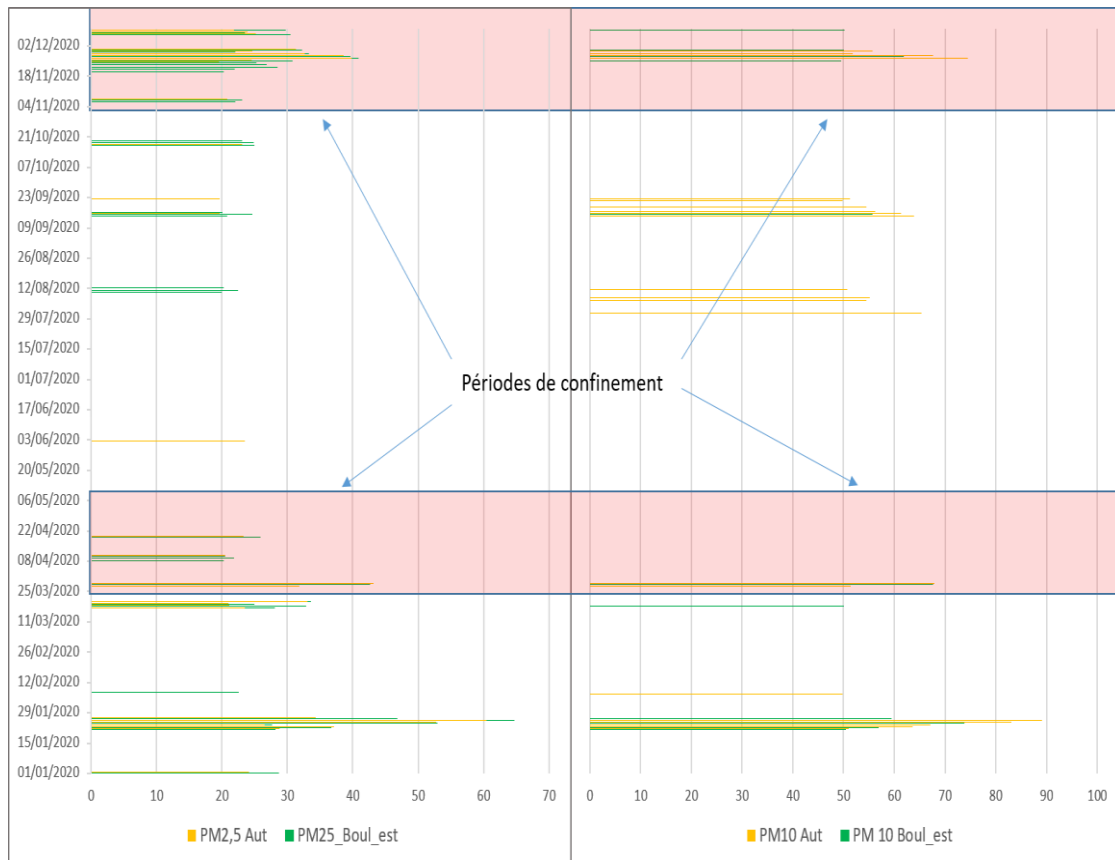


Figure 4: Dépassements à l'échelle annuelle du seuil recommandé par l'OMS pendant et en dehors des confinements pour les  $\text{PM}_{2.5}$  et  $\text{PM}_{10}$  dans les deux stations Boulevard Est et boulevard Auteuil (données Airparif).

Les mesures mobiles par capteurs portables confirment que le niveau de la pollution de l'air pendant la deuxième phase du confinement dépasse parfois les seuils recommandés par l'OMS.

Les mesures réalisées le matin (de 8h à 10h) et le soir (de 17h à 19h). Les résultats issus des campagnes de mesures confirment la corrélation qui existe entre la densité du trafic routier, le bruit et la pollution de l'air aux particules fines. Le matin, nous avons relevé des valeurs moyennes comprises entre 14 et 22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $\text{PM}_{2.5}$  et de 20 à 28  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $\text{PM}_{10}$ . Le soir, les concentrations oscillent de 14 à 22 pour les  $\text{PM}_{2.5}$  et de 24 à 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $\text{PM}_{10}$  à la porte d'Italie. A la porte d'Ivry, nous avons enregistré entre 17 et 22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $\text{PM}_{2.5}$  et de 16 à 28  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $\text{PM}_{10}$  le matin et entre 14 à 22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $\text{PM}_{2.5}$  et de 19 à 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $\text{PM}_{10}$  le soir. Les résultats montrent également une variabilité des concentrations en fonction des types de temps. Même pendant le confinement du Covid-19, certains épisodes de pollution aigüe sont rencontrés par temps radiatif comme fut le cas le 26 novembre à la porte d'Ivry où les concentrations ont atteint 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $\text{PM}_{10}$  et 50 pour les  $\text{PM}_{2.5}$  pendant la session matinale avec un nombre de 835 voiture/5 minutes.

### **Conclusion :**

Malgré une légère baisse de la pollution aux particules fines pendant le premier confinement suit à une baisse considérable de la densité du trafic routier, des pics dépassant 65  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour le  $\text{PM}_{2.5}$  et 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour le  $\text{PM}_{10}$  sont enregistrés par temps radiatif. Ces résultats concordent avec ceux de Brunet Y et al, (2020) concernant le premier confinement. Les pics des particules qui ont été observés sont émises par le trafic routier et le chauffage au bois sachant que les températures ont été légèrement supérieures à la normale pendant les deux confinements. Les concentrations en PM ont été plus élevées pendant le deuxième confinement, caractérisé par un trafic routier plus intense que le premier, et a connu un long épisode de temps radiatif favorable aux fortes concentrations des polluants.

### **Bibliographie**

- Airparif., 2016. Surveillance et information sur la qualité de l'air à Paris en 2016. Rapport Airparif. 12p.
- Airparif., 2018. Bilan de la qualité de l'air Année 2018. SURVEILLANCE ET INFORMATION EN ÎLE-DE-FRANCE. 92p.
- Camors C., Dezenaire F., Cyrille G., Renouvel S., Roger S., Soulard O., 2016 « Économie numérique : 80 % des établissements franciliens en cœur d'agglomération », Note rapide n° 710 ; « Économie numérique : une dynamique d'emploi portée par les non-salariés », Note rapide n° 711, IAU îdF, mars 2016.
- Mihaita A.S., Dupont L., Chery O., Camargo M., Cai C., 2019. Evaluating air quality by combining stationary, smart mobile pollution monitoring and data-driven modelling. *Journal of Cleaner Production*, Vol 221, 398-418. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.179>.
- Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., ... Britter, R., 2015. The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment International*, 75, 199–205. doi:10.1016/j.envint.2014.11.019
- Roussel I., 1993. Climat et qualité de l'air. *Cahier de géographie physique, Université des Sciences et Technologies de Lille*, N° 9, 33-46.
- World Health Organization (2020) Coronavirus disease (COVID-2019) situation reports. Geneva: World Health Organization. Retrieved March 23, 2020 from (<https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/situation-reports/>). opens in new tab).

## APPLICATION D'UN MODÈLE SIG POUR LA CARTOGRAPHIE DU RISQUE POTENTIEL DE FEU DE FORÊTS : CAS DE LA FORÊT DE L'OUED RMILA (PROVINCE DE TAZA-MAROC)

Aboubi Imane et Hanchane Mohamed

USMBA - Fès, Faculté des Lettres et Science Humaines Dhar El Mehraz-Fès; Laboratoire "Territoire Patrimoine et Histoire» ; Email : imaneaboubisaddik@gmail.com

**Résumé :** La commune rurale de Bouchfaâ, concernée par cette étude, est dotée d'un immense et remarquable patrimoine forestier qu'il faut protéger et préserver. Cependant, ces écosystèmes naturels sont soumis à des incendies de forêts qui sont responsables de dégâts très importants. C'est dans cette optique, qu'on a donc décidé d'utiliser le modèle SIG de Dagorne-modifié pour définir les zones sensibles à l'aléa de feu de forêts en combinant des informations sur la topo-morphologie, la combustibilité des formations forestières et les facteurs d'éclosion qui sont définis par les pistes. Selon cette méthode, nous visons à délimiter les zones potentiellement sensibles aux feux de forêts. Une base de données sur les incendies de forêts au niveau de la zone est utilisée pour valider les résultats obtenus.

**Mot clés :** Incendie de forêt, Risque, Modélisation, SIG, Bouchfaâ (taza)

**Abstract :** The rural commune of Bouchfaâ, concerned by this study, has an immense and remarkable forest heritage that must be protected and preserved. However, these natural ecosystems are subject to forest fires which are responsible for very significant damage. It is with this in mind, that we therefore decided to use the Dagorne-modified GIS model to define areas sensitive to the forest fire hazard by combining information on the topo-morphology, the combustibility of the formations, forest and the hatching factors which are defined by the tracks. According to this method, we aim to delimit areas potentially sensitive to forest fires. An area-level forest fire database is used to validate the results obtained.

**Key words:** Forest fire, Risk, Modeling, SIG, Bouchfaâ (Taza)

### Introduction

Les incendies de forêts à l'échelle de la Province de Taza menacent toutes les formations forestières. Leur occurrence ait lieu tous les mois de l'année avec une fréquence plus élevée en saison sèche, allant de juin à septembre (Hanchane, 2007). En termes de leur fréquence d'occurrence, on remarque que les incendies de forêts sont assez fréquents dans la Commune de Bouchfaâ même si leur intensité reste relativement faible. La partie Est de Cette commune est connue par une grande richesse floristique de type xérophyte, une présence humaine assez forte et un terrain très accidenté (Hanchane et Janati, 2012). Toutes ces conditions naturelles et humaines constituent des composantes importantes qui peuvent augmenter aussi bien la fréquence que l'intensité de l'incendie. Cette situation nous a amenés à appliquer le modèle de Dagorne et *al.* (1994) en l'adoptant aux particularités de la zone d'étude.

Ainsi, la présente étude traite la modélisation et la cartographie des zones potentiellement sensibles au risque de feu de forêts de l'Oued Rmila (Commune de Bouchfaâ) qui fait partie du Moyen Atlas Oriental où règne un climat de type méditerranéen. Cette forêt appartient à l'étage bioclimatique subhumide et humide, à variantes tempérée à froide (Hanchane et Janati, 2012). Elle est caractérisée par une végétation très diversifiée qui joue des rôles environnementaux et socio-économiques importants. Cependant, elle est souvent soumise à des incendies de forêts qui sont responsables de dégâts très importants au niveau des formations de chêne vert et de chêne liège et des surfaces boisées par le pin d'Alep.

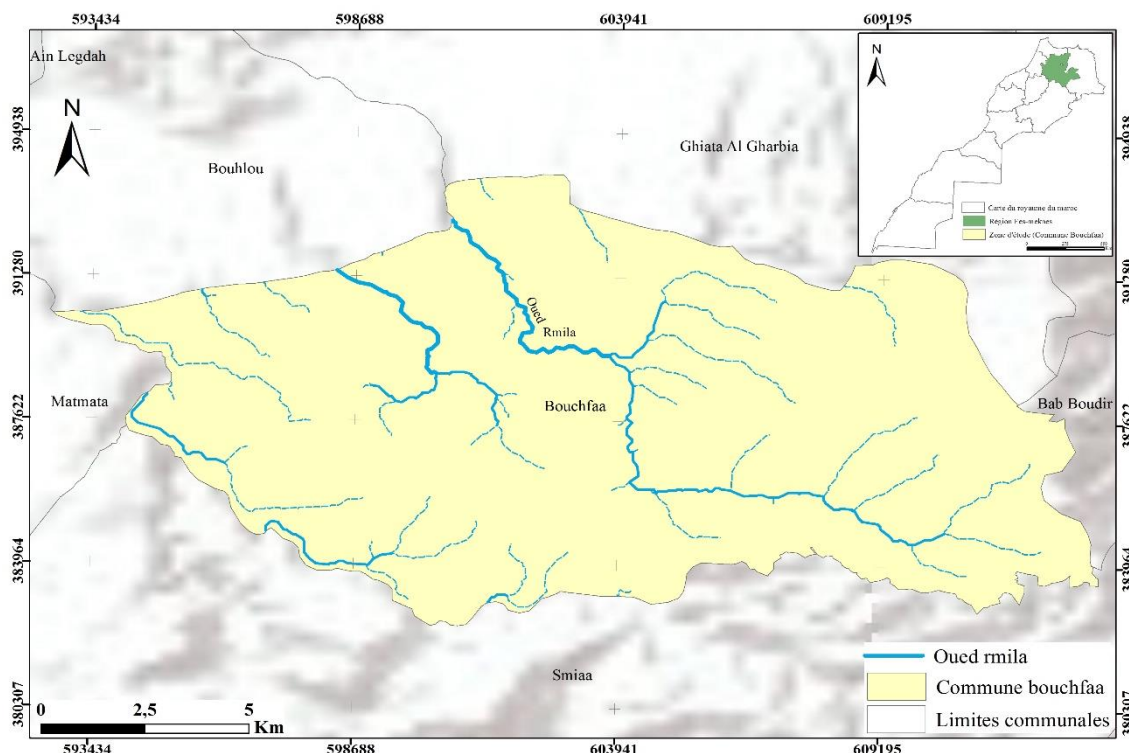
Le modèle de Dagorne-modifié s'appuie sur un Système d'Informations Géographique (SIG) qui tient compte des paramètres ayant un lien avec l'éclosion et la propagation des feux de forêts : indice topomorphologique (pente, exposition des versants et altitude), indices de combustibilité et d'inflammabilité du couvert végétal et indice de présence humaine pour tenir compte du risque d'éclosion du feu. Celui-ci est élaboré en utilisant l'information cartographique des pistes. En effet, selon les données historiques relevées par la Direction Provinciale des Eaux

et Forêts et de la Lutte contre la Désertification de Taza, nous avons montré que les pistes et les sentiers sont un bon indicateur de l'éclosion puisque la quasi-totalité des feux et des départs de feux sont situés à leur proximité (Hanchane et Janati, 2012). Le but spécifique de la présente étude est d'établir une carte de l'aléa de feu de forêts et la valider par les données réelles. Notre objectif s'inscrit dans le cadre de mise en place d'un système d'aide pour un aménagement forestier (prévention, lutte, équipement de terrain...) en fonction du risque potentiel prédit selon les paramètres physiques et humains.

## 1. Présentation de la commune de Bouchfâa

La commune rurale de Bouchfâa appartient à la province de Taza, cercle d'Oued Amlil. Elle s'étend sur une superficie de 161 Km<sup>2</sup> et se compose de 23 douars suivant le recensement de 2004. Elle est limitée au nord par les communes rurales (C.R) Ghiata El gharbia et Bouhlou, au sud par la C.R de Smiâa, à l'est par la C.R de Bab boudir et à l'ouest par la C.R de Matmata. Elle est située entre les longitudes 4° 17' et 4° 10' Est et les latitudes 34° 30' et 34° 6' Nord (carte1).

Grâce à sa situation géographique sur les plaines nord des montagnes du moyen Atlas et de son climat méditerranéen, la commune de Bouchfaâ est dotée d'un couvert forestier diversifié. C'est un site écologique et touristique caractérisé par une densité importante de plantes de différentes espèces. La superficie de sa couverture forestière est d'environ 9483ha. Il renferme plus de 600 espèces d'arbres dont 60 espèces rares. Les principales formations végétales sont la chênaie verte, la subéraie, la zénaie (*Quercus canariensis*), la cédraie et la tetraclinaie (DPEFLCD de Taza et IFN, 2014). Dans certains versants on rencontre des formations artificielles de *Pinus halpensis*.



Carte 1. Localisation géographique de la commune rurale de Bouchfâa

## 2. Données et Méthodes

L'évaluation cartographique vise à appliquer un modèle SIG pour délimiter les zones potentiellement sensibles aux feux de forêts selon les paramètres physique et anthropique qui influencent l'éclosion, la propagation et l'intensité d'un feu. Dans ce travail, les trois paramètres

à modéliser sont la topographie (pente, exposition des versants et altitude), la végétation (combustibilité et inflammabilité) et l'action anthropique *via* la cartographie des pistes qui sont des bons indicateurs des départs de feux (Hanchane et Janati, 2012). Ce modèle SIG s'est inspiré de celui élaboré par Dagorne et *al.* (1994) et adapté à la zone d'étude en introduisant des informations sur les pistes et les sentiers. Une base de données réelles d'incendies de forêts, enregistrées au cours de la période 2010-2020, est utilisée pour valider le résultat obtenu. Le modèle SIG est établie selon l'équation suivante :

$$\mathbf{IR = 5IC + 2IH + IM}$$

où : IR: Indice de risque de feu ; IC: l'indice de combustibilité, adopté par l'ex. CEMAGREF ; IH : représente l'indice d'occupation humaine (dans notre cas, les pistes et les sentiers); IM : représente l'indice topo-morphologique.

L'étude a nécessité une base de données numérique et vectorielle exploitables en cartographie automatique :

- Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) nous a permis de faire ressortir les données suivantes : les pentes, l'orientation des versants et l'altitude ;
- La stratification du couvert végétal selon l'Inventaire Forestier National 2014 (IFN) fournies par la Direction Régionale des Eaux et Forêt de Taza ;
- Série de données de la période (2010-2020) d'enregistrements des incendies de forêts de la commune de Bouchfâa qui a été fournie par la Direction Régionale des Eaux et Forêt de Taza. Cette base de données répond aux questions suivantes : les points incendiés géoréférenciés, la superficie brûlée (ha) et les espèces incendiées.

### 3. Résultats et Discussion

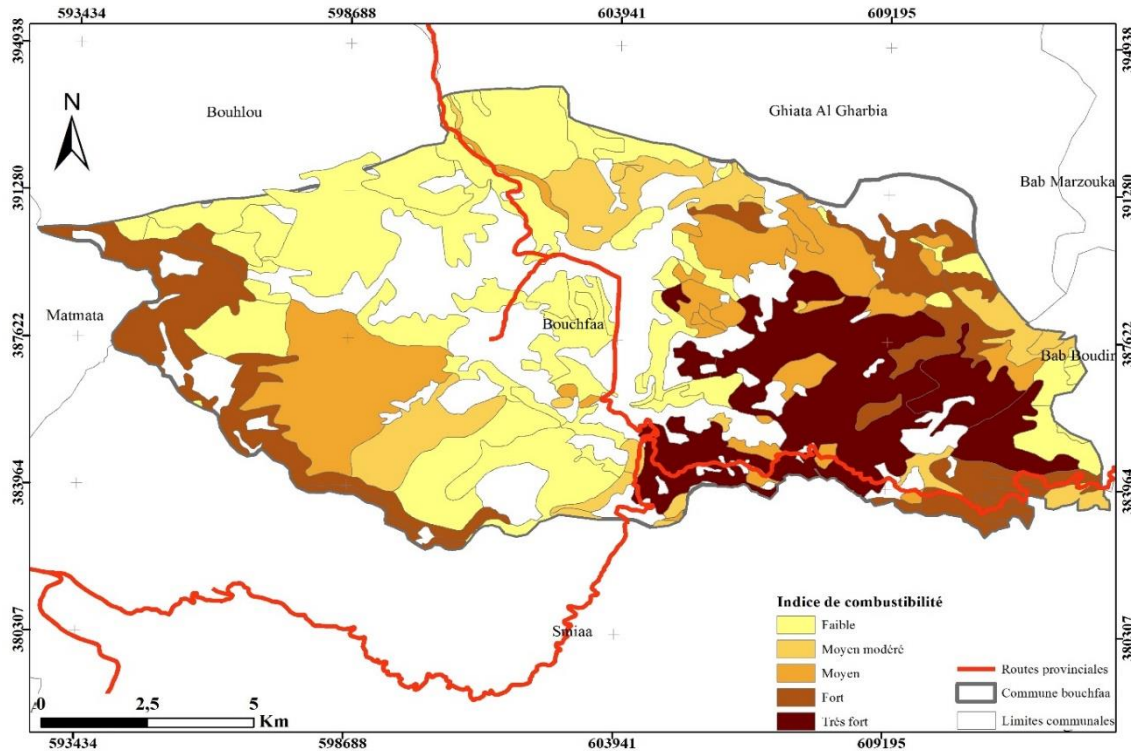
#### 3.1. Indice de combustibilité (Ic)

Il est établi à partir de la stratification de l'Inventaire Forestier National (IFN, 2014) qui distingue différents types de peuplements (Jappiot, 1999). Et à partir des images satellitaires, on a déterminé la continuité et la densité de couvert végétale (BV : la biomasse du couvert végétal). En l'absence de données sur le degré de combustibilité des espèces forestières marocaines, nous avons utilisé les données produites par l'IRSTEA (ex-CEMAGREF) (Alexandrian et al.,1984) qui donnent les notes de combustibilité (comprises entre 1 et 9) des principales espèces de la végétation méditerranéenne française (E1 : ligneux hauts, E2 : ligneux bas et herbacés). Ainsi, l'indice de combustibilité est calculé selon la formule empirique suivante :

$$\mathbf{IC=39+2,3*BV *(E1+E2-7,18)}$$

La carte de l'indice de combustibilité (carte 2) est définie selon 5 classes, allant de 1 à 5, qui décrivent le degré de combustibilité. Le résultat obtenu montre que 60% des formations forestières ayant un indice de combustibilité fort et très fort (Chêne vert, Chêne liège, thuya, Chêne zeen). Ces formations se localisent principalement à la partie Est et à un degré moindre, à l'Ouest de la commune de Bouchfaâ. Il est à noter que la partie de la zone d'étude est limitrophe du parc national de Tazzeka dont le but principal est de protéger la cédraie et quelques espèces endémiques.





Carte 2: Indice de combustibilité

### 3.2. Indice topomorphologique (It)

A partir du modèle numérique du terrain, on a extrait la carte des pentes, d'exposition des versants et de l'altitude. L'indice topomorphologique est le produit de la superposition de ces trois cartes. Nous avons retenu quatre classes topo-morphologiques en fonction du risque qu'elles représentent. Cet indice traduit les terrains potentiellement sensibles au feu. On considère que les versants exposés au sud et à l'est, présentant une pente forte et situés à une haute altitude sont les plus potentiellement sensibles au feu. La base de données de la carte de l'indice topomorphologique montre que 20% de la surface ont des conditions peu favorables au déclenchement de feu, suivie par les conditions moyennement favorables avec 40%, et finalement les zones favorables et très favorables représentent 40%.

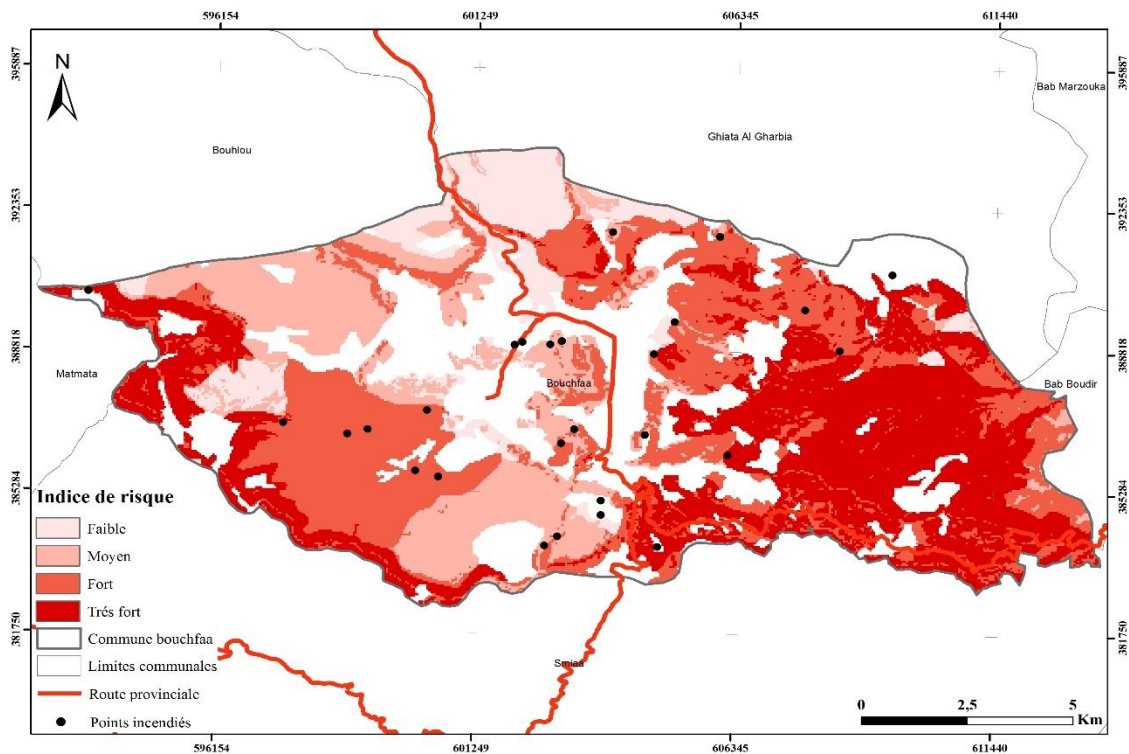
### 3.3. Indice d'occupation humain (IH)

Il décrit la probabilité d'éclosion probable en fonction de la distance aux pistes. Il a été montré que la majorité des départs de feu de la commune se produisent autour des pistes (Hanchane et Janati, 2012). Plus on s'éloigne de la piste et plus la probabilité d'éclosion diminue. Ceci a été mis en évidence grâce à l'établissement de zones d'influences « zones tampons ou Buffers » dans ArcGis (Jappiot, 1999). Ces dernières sont décrites selon 4 classes comprises entre 100 et 1000 m.

### 3.4. Indice de risque potentiel de feu de forêts

Trois couches sont superposées pour la réalisation de l'indice de risque de feu, tels que l'indice de combustibilité, l'indice humain et l'indice topomorphologique. La carte du risque potentiel de feu de forêts (carte 3) montre que les zones à risque fort et très fort sont les plus dominantes avec un pourcentage de 60% par rapport à l'ensemble du territoire. Les zones présentant un risque moyen et faible occupent 40% de la zone d'étude. Dans la phase de validation de ce modèle SIG, en se basant sur les données historiques d'incendies de forêts de la période 2010-2020, les résultats montrent que 80% des feux sont situés les zones à risque potentiel d'un niveau fort et très fort, et 20% sur les zones d'un niveau de risque moyen à faible.

**Carte 3 : Risque potentiel de feu de forêts dans la commune de Bouchfaâ**



### Conclusion

La forêt de l'Oued Rmila (commune de Bouchfaâ) compte parmi les forêts les plus menacées par les incendies de forêts au niveau de la province de Taza. Les espèces les plus exposées à ce risque sont le chêne vert, le chêne liège, le chêne zeen et le cèdre. Le parc national de Tazzeqa, situé à la limite partie est de la zone d'étude est aussi menacé par ce fléau. Dans un objectif d'aménagement forestier à une échelle locale, comme c'est le cas de cette étude, le but est d'établir un zonage prioritaire pour la prévention des incendies de forêts. Pour cela, un modèle SIG de Dagonne-modifié a été adopté. Ce dernier tient compte d'un ensemble de paramètres : type de combustible, pente, expositions, altitude et pistes.

Le résultat d'application de SIG sur la commune de Bouchfaâ a défini 4 niveaux de risque : très fort, fort, moyen et faible. Sa validation à l'aide d'une série de données de 10 ans (2010-2020) a donné des résultats satisfaisant. Les valeurs réelles les plus extrêmes sont effectivement situées sur une zone à risque fort.

Au terme de ce travail, on recommande une généralisation ce modèle sur l'ensemble du massif forestier du Moyen Atlas tout en intégrant des données relatives aux moyens de luttés et en actualisant la carte des peuplements forestiers et des pistes.

## Bibliographie

Alexandrian, D. Binggeli, F., 1984. L'écologie prend le maquis : forêt, biomasse, énergie, compost. Edisud, 14 p.

Dagorne A., Duché Y., Castex J.M., Ottavi J.Y., Dallier C., et Anne C. 1994. Protection des forêts contre les incendies & Système d'information géographique: Application à la commune d'Auribeau sur Siagne (Alpes Maritimes). *Revue forêt méditerranéenne* t. **XV**, n°4, octobre, 409-420pp.

Faleh, A., Lakhouaja, H., Sadiki, A., Chaaouan, J. 2012. SIG, Télédétection et Evaluation de Risque d'incendie de Forêts, Exemple du massif forestier Khezana (Province de CHAOUENE). *Papeles de Geografía*, num. **55-56**, 37-48 pp. Universidad de Murcia Murcia, España.

Jappiot, M., 1999. Evaluation et cartographie du risque d'incendie de forêt à l'aide d'un SIG: exemple d'un massif forestier du sud de la France. Atelier "Les bases de données sur les feux de forêts en région méditerranéenne, utilisations et enseignements" 27 avril – 1er mai 1999, Tétouan, Maroc, 143 – 148 pp.

Hanchane, M et Janati, I. A. 2012. SIG et modélisation du risque de feu de forêts dans la forêt de Bab Azhar (Taza-Maroc). Pub des actes du colloque « *GIS-Users* ». Ed. Laboratoire Ressources Naturelles et Environnement (FPD-Taza).

Hanchane, M. 2007. Evaluation du risque d'incendies de forêts dans la Province de Taza. In. Colloque International « Dynamiques territoriales: des potentialités et développement durable » tenu du 19 au 21 avril 2007 à la FLSH de Dhar Mehraz (Fès) (Communication orale).

## UNE FORME D'HABITAT VERNACULAIRE ADAPTÉE AUX CONDITIONS CLIMATIQUES DES OASIS MAROCAINES : LE CAS DES Ksour ET KASBAHS

ADIDI A<sup>1</sup>. et SALOUI A<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> I.N.A.U., RABAT, MAROC

<sup>2</sup> UH2-CASABLANCA, MAROC, saloui.abdelmalik@gmail.com

**Résumé en français :** *Constituant un patrimoine vernaculaire du Sud Est marocain et un savoir-faire ancestral, les Ksour et Kasbah connaissent un processus de dégradation à cause de la conjugaison de plusieurs facteurs dont certains relèvent des comportements de la population des ksour et kasbah elle-même et d'autres, des conditions environnementales globales de ces constructions (le climat désertique). Ces dernières connaissent un processus d'altération et de décomposition touchant leur fondement socio-économique, leur identité et originalité architecturale, mettant ainsi en danger, leur existence même. Aujourd'hui, se pose la question de l'adaptation, de la réhabilitation et de valorisation de ce patrimoine vernaculaire face aux changements climatiques actuelles.*

**Mots clefs :** *Ksours – Kasbah – changements climatiques - réhabilitation*

**Summary :** *Constituting a vernacular heritage of South East Morocco and an ancestral know-how, the Ksour and Kasbah are experiencing a process of degradation due to the combination of several factors, some of which relate to the behavior of the population of the ksour and kasbah itself and to others, from the overall environmental conditions of these constructions, the latter undergo a process of alteration and decomposition affecting their socio-economic basis, their identity and architectural originality, thus endangering their very existence. Today, the question arises of the rehabilitation and enhancement of this vernacular heritage adapted to oasis climatic conditions.*

**Keywords :** *Ksours - Kasbah - climate change - rehabilitation*

### INTRODUCTION

Les Ksour et Kasbah qui constituent un patrimoine vernaculaire du sud marocain et un savoir-faire ancestral connaissent un processus de dégradation à cause de la conjugaison de plusieurs facteurs dont certains relèvent des comportements de la population des ksour et kasbah elle-même et d'autres, des conditions environnementales globales de ces constructions. Ces dernières connaissent un processus d'altération et de décomposition touchant leur fondement socio-économique, leur identité et originalité architecturale, mettant ainsi en danger, leur existence même.

Certaines des formes d'adaptation de ces bâtis avec le climat désertique local se manifestent surtout à deux niveaux : la technique architecturale et les matériaux de constructions.

Face au climat très rude et très austère, les autochtones adoptaient des formes de construction en nid de fourmis pour éviter le froid d'hiver et la canicule d'été : ksours et kasbahs.

Les matériaux de construction sont toujours offerts par le milieu naturel direct : le pisé et les roseaux. Ce sont là des matériaux très isolants et très hermétiques. Ils sont les seuls en mesure de protéger la population contre la rigueur du milieu sahraoui.

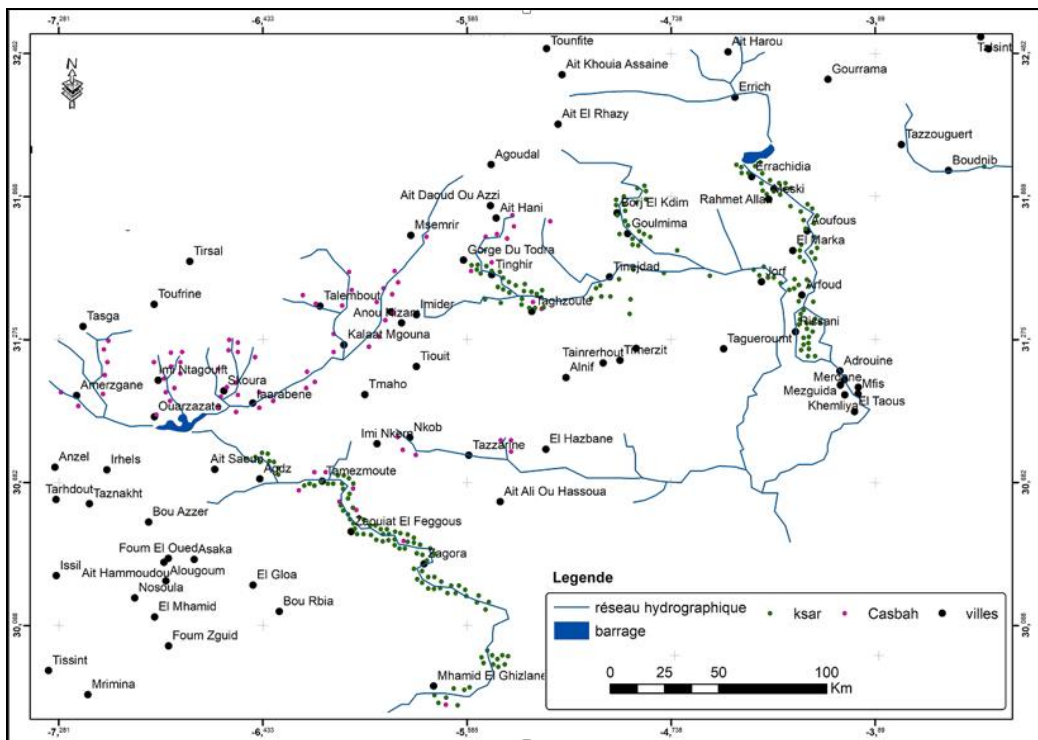
L'état de ces constructions est devenu plus alarmant avec les impacts des changements climatiques que connaît la région. Il nécessite ainsi une intervention volontariste et urgente de tous les acteurs tant à l'échelle locale qu'à l'échelle nationale, voire internationale.

Considérant les impacts éventuels du climat actuel et future, cette communication essaie de proposer une alternative en mesure de conserver / protéger ce patrimoine menacé de destruction.

### 1 - Les Ksours et kasbahs (KK) : une conception architecturale et urbanistique originale

Les ksour et kasbah, forme d'habitat traditionnel séculaire témoignant de l'ingéniosité des Marocains à s'adapter à l'environnement des oasis marqué par la sévérité des conditions climatiques et la rareté des ressources hydriques et des terres arables, constituent une partie non

négligeable du parc logement national. Ils se démarquent par leur architecture vernaculaire et par les techniques et matériaux de construction locaux utilisés (carte n°. 1).



Carte n°. 1 : Distribution des Kasba et des Ksour dans les vallées présahariennes

Les Ksour et Kasbah possèdent des caractéristiques architecturales et sociologiques originales, c'est une création fonctionnelle et artistique de l'homme local qui témoigne de son savoir-faire en terme du rapport climat / habitat, résultat de l'accumulation d'un héritage historique qui reflète les la maîtrise des matériaux de construction et la conception architecturales. Sauf qu'au cours des dernières décennies, ce patrimoine a commencé à perdre de son statut en raison de facteurs humains et naturels (le changement climatique).

La localisation de ce patrimoine sépare l'intérieur du Maroc, et le monde islamique à l'est et le Maroc, et les bassins des fleuves du Sénégal et le Niger au sud lui a permis de jouer des rôles importants à travers l'histoire du Maroc. Ces entités urbanistiques se caractérisent par leurs bâtiments compacts entourés d'énormes murs, mais la forme morphologique de ce patrimoine culturel varie d'une oasis à l'autre qui varie entre 1.40 m et 1.80 m. Ils sont construits avec des matériaux solides entourés de hautes tours.

Il est à noter que chaque ksar ou kasbah est une pièce unique et originale, par conséquent il est hasardeux de dresser une typologie de ces édifices. L'habitat ksourien de Figuig (N-E du Maroc) se caractérise par son ancienneté et donc par son originalité. Tout au long des siècles passés, la population de l'oasis, a créé avec des matériaux locaux, une architecture vernaculaire parfaitement adaptée à la chaleur et à la rareté en eau de l'écosystème oasien. Les maisons ksouriennes occupent des surfaces modestes, mais possèdent un voire deux étages ainsi qu'un toit-terrasse. Muni d'un portique, celui-ci permet d'achever le murissement des dattes et de profiter du soleil l'hiver tout en restant à l'abri des vents froids (photos de 1 à 4).

Les murs extérieurs des maisons sont généralement percés d'une simple porte d'entrée et parfois, d'une fenêtre pour vue d'un grillage en fer forgé, signe que la maison possède un Tanesrit. Traditionnellement construits en brique crues, parfois consolidés par un soubassement de pierre, ces murs sont parfaitement adaptés aux foudades du climat saharien. Bioclimatiques avant l'heure, ils constituent un excellent isolant thermique qui protège de la chaleur caniculaire

l'été et du froid glacial l'hiver. L'environnement bâti de l'homme n'a jamais été et n'est toujours pas commandé par les spécialistes (architecte, urbaniste, etc.).



Photo n°. 1 : La Kasbah de Taourirt à Ouarzazate



Photo n°. 2 : la kasbah d'Amerhidil



Photo n°. 3 : Entrée à la kasbah du Caïd  
Abderrahmane



Photo n°. 4 : Ksar Ait Ben Haddou

## 2 – la dynamique du climat dans les zones des Ksour et kasbahs : climat oasien

L'étude du climat de la région des oasis est basée sur un réseau de sept stations synoptiques<sup>1</sup>. La période des mesures s'étale de 1990 à 2018. Les éléments du climat étudiés sont les précipitations et les températures max et min (les mesures quotidiennes).

L'analyse de cette base de données est aboutie au résultat suivant :

---

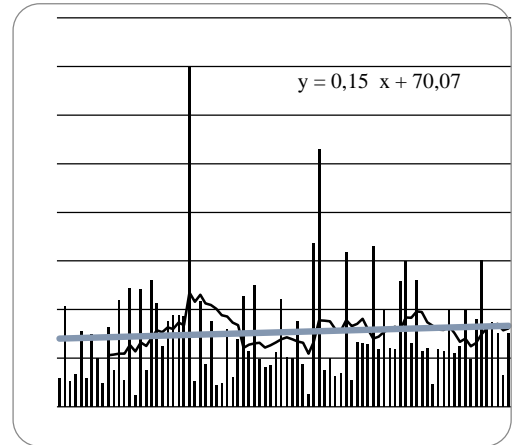
<sup>1</sup> Les stations de mesures sont celles d'Ouarzazate, Er-Rachidia, Zagora, Tata, Erfoud, Rissani et Agdz

- Le climat de la région est très sec ; les précipitations annuelles dépassent rarement 150 mm, alors que les moyennes des températures maximales dépassent les 30 °C. Les températures dépassent en valeur absolue 48 ° C. pendant juillet et aout.

- Les précipitations s'enregistrent souvent entre les mois de mars et juin ;

- Les températures annuelles moyennes avoisinent souvent 18° C, alors que les moyennes des min fleurent les 10 °C et celles des max 32 °C. (Graphe n°.1).

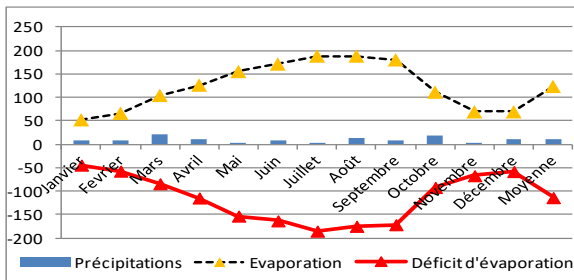
- Le graphe n°. 1 montre la tendance presque nulle des volumes des précipitations annuelles : +0.005 mm/an.



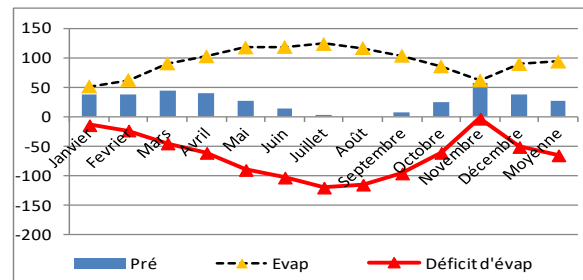
Graphe n°. 1 : la répartition et la dynamique des précipitations annuelles à Zagora (mm)

- Nous avons montré dans une étude antérieure que la période des pluies est réduite à quatre mois au lieu de neuf (de novembre à février), et que les précipitations tendent vers une augmentation pendant la saison d'hiver et vers une diminution pendant les saisons transitoires. Cette dynamique climatique explique les périodes de sécheresse de plus en plus longues, et les précipitations hivernales de plus en plus abondantes. Donc, plus de périodes de sécheresse de longues durées, et plus d'inondations pendant l'hiver (Saloui, 2000).

- La zone souffre d'un déficit hydrique tout au long des années ((Graphes n°. 2 a et b).

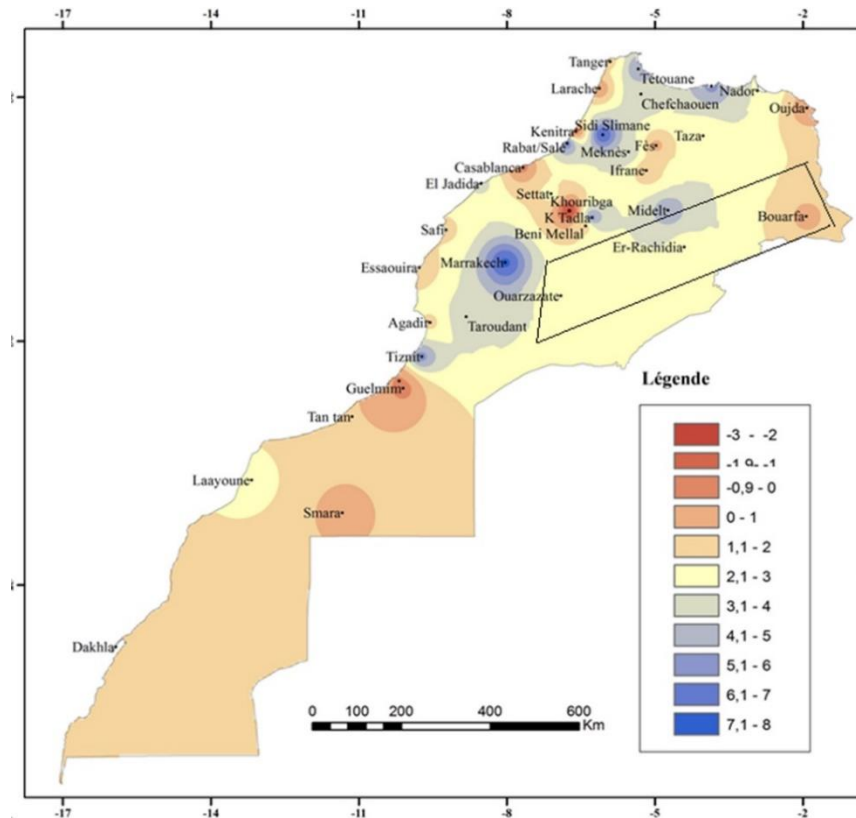


Graphe n°. 2 a : Bilan hydrique à Er-Rachidia



Graphe n°. 2 b : Bilan hydrique à Er-Rachidia Zagora

- Le déficit en eau avoisine les 200 mm/mois à Er-Rachidia et 150 mm/mois à Zagora.
- Les précipitations futures augmenterons dans une proportion variant entre 0 et 1 mm/an (carte n°. 3 : la tendance des précipitations annuelles)



Carte n°. 2 : la tendance des précipitations annuelles selon la méthode de Kendal

### 3- un patrimoine en péril

Constituant un patrimoine vernaculaire du Sud Est marocain et un savoir-faire ancestral, les Ksour et Kasbah connaissent un processus de dégradation à cause de la conjugaison de plusieurs facteurs dont certains relèvent des comportements de la population des ksour et kasbah elle-même et d'autres, des conditions environnementales globales de ces constructions, ces dernières connaissent un processus d'altération et de décomposition touchant leur fondement socio-économique, leur identité et originalité architecturale, mettant ainsi en danger, leur existence même.

Selon des études très récentes<sup>2</sup>, les KK sont des milieux très vivants et souffrants ; les 3/4 des 4000 KK recensés au Maroc, sont abandonnés et se trouvent dans un état de dégradation avancée.

Le reste des KK, compte environ 250 000 logements. Il subit la dégradation du cadre bâti et de l'espace vivrier, manque d'infrastructures et d'équipements de base, et connaît une précarisation croissante de sa population (tableau n°. 1) :

- L'aire d'intervention, concerne 7 provinces, abrite près de 494 ksour et Kasbah occupés. Ces KK sont habités par **24 760** ménages et près de **163 000 habitants**.
- Près de **31.2%** des ménages ont quitté les KK au cours de 15 dernières années : 2004-2018, ce taux est de 12.7% entre seulement 2014 et 2018.

<sup>2</sup>CERKAS : Centre de Conservation, de restauration et de réhabilitation des ksour et kasbah des zones atlasiques et sub-atlasiques



Tableau 1 : Répartition des KK occupés selon le nombre de ménages qu'y habitent

	Moins de 10	de 10 à 50	de 51 à 100	de 101 à 200	Plus de 200	Total
ErRachidia	14	81	35	25	9	164
Figuig	13	17	9	3	3	45
Midelt	15	7	1	0	1	24
Ouarzazate	22	0	0	0	1	23
Tata	10	7	7	4	3	31
Tinghir	63	14	3	3	1	84
Zagora	47	46	17	10	3	123
<b>Total</b>	<b>184</b>	<b>172</b>	<b>72</b>	<b>45</b>	<b>21</b>	<b>494</b>

Source : Recensement des autorités locales, 2018

#### 4. Les facteurs de dégradation des ksour et kasbah sont les suivants

Comme cela ressort du diagnostic, la dégradation des ksour et kasbah est le résultat de la combinaison de plusieurs facteurs que nous rappelons comme suit :

La base économique de l'aire des KK est faible et dépend essentiellement des activités primaires (62%), de commerce (16%) et de l'artisanat (11%) à faible rendement, avec un taux de chômage de 27%. De grandes potentialités de développement existent, mais mal exploitées faute de manque d'investissements ;

L'attractivité économique de la zone des KK est devenue très faible et se répercute sur le niveau de développement, l'emploi et la stabilité de la population ;

Une partie importante de la population des KK dépend des ressources provenant des transferts solidaires des membres de leurs familles (42%), ou d'un chef de ménage installé dans d'autres villes (47%) ;

L'émigration a transformé radicalement la démographie des KK : peu de jeunes actifs et une majorité des vieux inactifs ;

L'émigration a rendu plusieurs maisons vacantes (37%) ce qui a accéléré leur dégradation par manque d'entretien ;

Les KK ont perdu leurs fonctions internes et externes. Ils ne se trouvent plus sur les grands circuits économiques.

Les politiques publiques ont participé à la marginalisation de ces KK qui se trouvent dans un territoire qui chevauche entre trois grandes Régions, marquées par une forte pauvreté. L'ensemble de ce territoire connaît un faible développement en comparaison au reste des territoires du Maroc.

Les KK constituent réellement une richesse et un héritage national digne d'être promu au rang de patrimoine culturel universel ; il convient de les préserver et valoriser dans le cadre d'une stratégie nationale globale et intégrée mettant l'être humain et le territoire au centre.

#### Conclusion

Les KK constituent réellement une richesse et un héritage national digne d'être promu au rang de patrimoine culturel universel. Que ce soit l'architecture, le design, l'esthétique ou les matériaux de construction utilisés ces constructions symbolisent un savoir et un savoir-faire ancestral qu'il convient de préserver et valoriser dans le cadre d'une stratégie nationale globale et intégrée mettant l'être humain et le territoire au centre.

Les KK, aujourd'hui menacés de dégradation suite aux impacts des changements climatiques, représentent un bon créneau pour le développement de la Région. Ce patrimoine est sérieusement menacé par une température de plus en plus chaude, par une fréquence de plus en plus élevée de courtes périodes hivernales, par des précipitations plus concentrées, et donc par des inondations plus fréquentes.

Menacé dans un avenir proche de soif, d'inondations et de canicule, et ensuite par l'émigration, le patrimoine des oasis trouve menacé de disparition.

Les KK souffrent des impacts des changements climatiques. Mais, en tant que territoires désertiques, ils souffrent plus des interventions irrationnelles de l'Homme.

Seule une stratégie qui vise à améliorer les conditions de vie des populations des KK à travers l'amélioration de leur niveau d'équipement, le développement des activités génératrices de revenus, mais aussi la restauration et la réhabilitation du cadre bâti, serait en mesure d'affronter les péripéties des changements climatiques.

### **Références bibliographiques**

Merah A., Bendebili I., 2016 : *Communicate About the Authenticity of Architectural Heritage: The Case of the Ksar of Temacine, South East of Algeria*, Valorisation, Strategies and Communication to Preserve Territorial Authenticity, Communiquer, 6

Ben Rhouma A., 2016, Les trésors du sud Tunisien : Visite de Ksour à Tataouine, Huffpost Maghreb,.

Pinta P., 2007 : Libye Des cités antiques aux oasis du Sahara. Editions Olizane, Suisse.

Naji S., 2001 : Art et Architecture Berbères du Maroc, Edisud, France.

Naji S., 2013 : Le Ksar d'Assa : Sauvegarde d'un Port du Maroc Saharien, DTGSN, Maroc.

Saloui A., 2000 : Etude des précipitations et des bilans hydrique au Maroc, Ed. Najah, Casablanca.

# COMPARAISON DES ÉMISSIONS DE GES PAR LA CULTURE DE L'ARACHIDE ET DE TROIS VARIÉTÉS DE MAÏS AU SUD-BENIN

<sup>1)</sup>Adjahossou Videdji Naesse, <sup>2)</sup>Adjahossou B. Sedami, <sup>2)</sup>Djégo Julien, <sup>2)</sup>Amadji G. Lucien, <sup>2)</sup>Boko Michel

<sup>1)</sup>*École Nationale Supérieure des Biosciences et Biotechnologies Appliquées (ENSBBA) de l'Université Nationale des Sciences Technologies Ingénierie et Mathématiques (FAST/UNSTIM) 01 BP 2417 Cotonou Bénin, [vidnae@yahoo.fr](mailto:vidnae@yahoo.fr) ou [adjahossou.naesse@unstim.bj](mailto:adjahossou.naesse@unstim.bj)*

<sup>2)</sup>Université d'Abomey-Calavi ; 01 BP 526 Cotonou, Bénin

**Résumé** – L'agriculture, qui est une activité contribuant pour environ 13 % des émissions mondiales de Gaz à Effet de Serre (GES), croît avec la démographie. L'objectif de cette recherche est de comparer les émissions de GES par des cultures céréalières et celles de légumineuses. Dans ce cadre, il a été comparé les émissions liées à la production de trois variétés de maïs et une variété d'arachide. Pour déterminer les quantités de GES émises, la méthode définie par le GIEC a été utilisée (GIEC, 2006). Il a été calculé les émissions de N<sub>2</sub>O liées à la production, l'utilisation de l'engrais, les émissions de CO<sub>2</sub> liées à sa fabrication et à son transport. Il ressort de ces travaux de recherche que les variétés de maïs ont produit en moyenne 0,27 teqCO<sub>2</sub> par hectare et 0,07 teqCO<sub>2</sub> par tonne de parties comestibles. On peut observer que l'arachide a généré respectivement de 1,7 et 3,8 fois plus de GES que le maïs. Cela pourrait indiquer que, au Sud-Bénin, le coût environnemental, sur le critère émissions de GES, de la production de légumineuses est plus élevé que celui du maïs.

**Mots clés** : Émissions de GES, agriculture, maïs, arachide

**Abstract** - Agriculture, which is an activity that contributes about 13% of global greenhouse gas (GHG) emissions, is growing with population size. There is either an intensification or an extensification of cropping systems with preferences for certain crops. The objective of this research is to compare GHG emissions from cereal and legume crops. In this context, the emissions from the production of three varieties of maize and one variety of groundnut were compared. To determine the quantities of GHG emitted, the method defined by the IPCC (2006) was used. N<sub>2</sub>O emissions from fertiliser production and use, CO<sub>2</sub> emissions from fertiliser manufacture and transport were calculated. From this research, it can be seen that maize varieties produced an average of 0.27 teqCO<sub>2</sub> per hectare and 0.07 teqCO<sub>2</sub> per tonne of edible parts. It can be observed that groundnut generated 1.7 and 3.8 times more GHG than maize respectively. This could indicate that the environmental cost of legume production is higher than that of maize

**Keyword** : GHG emissions, agriculture, southern Benin

## Introduction

La combinaison de la monoculture, la motorisation et la mécanisation, l'usage des engrais chimiques et des produits phytosanitaires, la sélection des plantes cultivées, l'irrigation et le drainage des sols, la sélection des animaux d'élevage et le recours à l'alimentation artificielle du bétail ont impulsé l'agriculture vers des rendements plus élevés (Griffon, 1999). La production a été ainsi améliorée sans augmentation des surfaces cultivées. Ces avancées ont néanmoins des effets néfastes sur l'environnement, notamment la salinisation et ou l'acidification des sols, la lixiviation dans les champs, la pollution des nappes phréatiques, la perte de matière organique dans les sols, la création de phénomène d'accoutumances des insectes... Cette agriculture implique aussi directement ou indirectement, une consommation importante d'énergie fossile et alimente significativement les émissions additionnelles de Gaz à Effet de Serre (GES). Les dégâts environnementaux par l'emploi à outrance, d'engrais chimiques et de pesticides risquent donc d'annuler le bénéfice des accroissements de productivité qui leur sont imputables (Brundtland, 1987). Il est donc important que cette tendance soit ralentie pour que les objectifs de la Convention de Kyoto et les recommandations de la COP21 à Paris soient atteints. Pour ce faire, il importe d'étudier les systèmes de culture ou de production afin de déterminer les moins polluants. C'est dans ce cadre que des expérimentations ont été faites pour évaluer les quantités de GES émis par divers systèmes de cultures. Cette communication ne s'intéresse qu'à la comparaison des émissions liées à la production de l'arachide et du maïs.

## 1. Milieu d'étude

La Commune d'Abomey-Calavi est située au sud du département de l'Atlantique et est limitée au nord par la commune de Zè, au sud par l'océan Atlantique, à l'est par les communes de Cotonou et de Sô-Ava, et à l'ouest par les Communes de de Ouidah et de Tori-Bossito (Figure 1). C'est la commune la plus grande du département dont la superficie représente 20 % de celle du département. Elle s'étend sur une aire de 539 km<sup>2</sup> représentant 0,48 % de la superficie nationale du Bénin (Adam *et* Boko, 1993).

La commune d'Abomey-Calavi dispose d'un réseau hydrographique non négligeable.

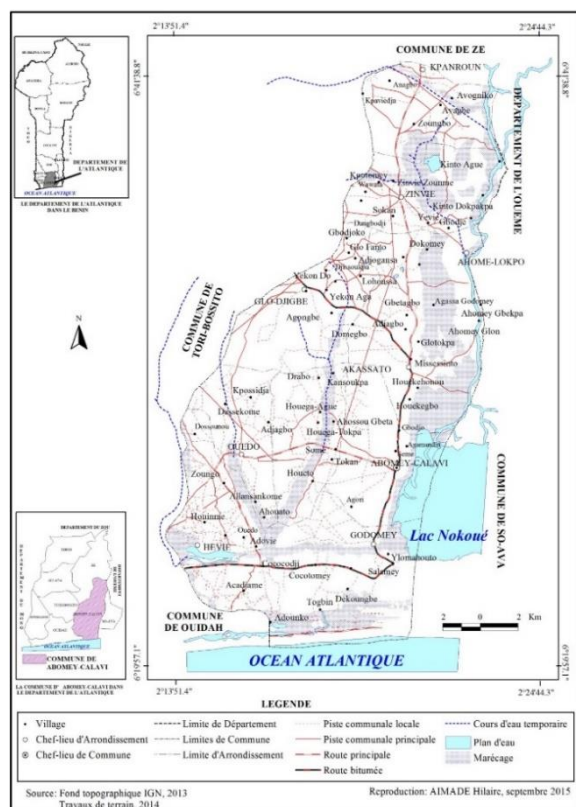


Figure 1 : Situation géographique de la commune d'Abomey- Calavi

## 2. Matériel végétal

L'expérimentation a été conduite sur une ferme agricole située à Kpotomey (Figure 1).

### 2.1. Expérimentation

Une variété locale d'arachide (*Arachishypogea*) du groupe "spanish" dont le cycle végétatif est de 90 jours, a été semée avec une densité de 11,1 plants/m<sup>2</sup>. Trois variétés de maïs ont été produites à savoir : TZEEW (Tropical Zea Extra Early White) à port érigé et ayant un cycle de 80 jours ; DMR-ESRW (DownlyMiddeResistentEarlyStreak White) à port semi-retombant ayant un cycle de 120 jours et Obatanpa, dont le cycle est de 105 jours (Adjahossou, 2012).

### Détermination des quantités de GES émises par les systèmes de cultures

Pour déterminer les quantités de GES émises, la méthode définie par le GIEC (2006) a été utilisée. L'utilisation d'engrais induit des émissions d'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O), y compris les émissions indirectes de N<sub>2</sub>O dues à l'ajout de l'azote aux sols par dépôt ou lixiviation. Les émissions directes et indirectes de N<sub>2</sub>O dues à l'utilisation d'engrais minéral azoté ont été

déterminées. Les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la fabrication de l'engrais et à son transport ont également été prises en compte.

### 2.2.1. Calcul des émissions directes de N<sub>2</sub>O

Pour calculer les émissions directes de N<sub>2</sub>O, on a :

$$N_2O_{\text{Direct}} - N = N_2O - N_{\text{inputs}}$$

Le potentiel de réchauffement de 1 tonne d'oxyde nitreux est de 298.

### 2.2.2. Calcul des émissions indirectes de N<sub>2</sub>O

\* Pour le calcul des émissions indirectes, il a été calculé les émissions liées au lessivage de l'azote et à la déposition au sol de l'azote préalablement volatilisé selon l'équation qui suit:

$$N_2O_{\text{Direct}} - N = (N_2O_{(L)} - N) + (N_2O_{\text{ATD}} - N)$$

L'équation suivante, a permis de calculer les émissions liées au lessivage de l'azote (N<sub>2</sub>O<sub>(L)</sub> - N):

$$N_2O_{\text{ATD}} - N = [(F_{\text{SN}} * \text{Frac}_{\text{GASF}}) + (F_{\text{ON}} * \text{Frac}_{\text{GASM}})] * EF_4$$

\* Pour calculer les émissions liées à la déposition au sol de l'azote préalablement volatilisé (N<sub>2</sub>O<sub>ATD</sub> - N), l'équation suivante a été appliquée:

$$N_2O_{(L)} - N = [(F_{\text{SN}} + F_{\text{ON}} + F_{\text{CR}}) * \text{Frac}_{\text{LEACH-(H)}}] * EF_5$$

### 2.2.3. Calcul des émissions lors de la fabrication de l'engrais en usine

\* Azote minéral

A ces émissions, il faut ajouter les émissions résultant de la fabrication des engrais azotés. On estime que pour produire une tonne d'azote sous forme ammoniacale, il faut environ 1 tep sous forme de gaz naturel, ce qui correspond à une émission de 2,4 t de CO<sub>2</sub>. La fabrication d'une tonne d'ammonitrate est accompagnée d'une émission de 5 kg de N<sub>2</sub>O soit une émission de 4,228 teqCO<sub>2</sub> (Migliore, 2007).

Nous avons l'équation suivante :

$$CO_2 - C_{N \text{ minéral}} = (F_{N \text{ minéral}} / 1000) * (2,4 + 4,228)$$

\* Phosphore

Pour l'obtention d'une tonne d'engrais phosphorique, il faut 18,3 tonnes équivalent pétrole sous forme de pétrole

$$CO_2 - C_{\text{phosphore}} = [18,3 * (F_{\text{phosphore}} / 1000) / 42] * 3,2$$

\* Potassium

$$CO_2 - C_{\text{Potassium}} = [11,6 * (F_{\text{potassium}} / 1000) / 42] * 3,2$$

\*Transport

$$CO_2 - C_{\text{transport}} : [2,5 * \text{distance parcourue} * 133 / 1000000 * (\text{quantité de N minéral} + \text{quantité de phosphore} + \text{quantité de potassium}) / 1000]$$

## 3. Résultats

Le Tableau I indique la quantité de GES produite en  $\text{teqCO}_2/\text{ha}$ .

Tableau I : Quantité de GES émise par unité de matière sèche produite et par système de cultures

Systèmes de cultures	GES produit en $\text{teqCO}_2/\text{ha}$
Arachide	0,46
Maïs TZEEW	0,25
Maïs Obatanpa	0,27
Maïs DMR ESRW	0,28

Source : Adjahossou, 2012

Les maïs en culture, ont produit en moyenne 0,27  $\text{teqCO}_2/\text{hectare}$  par production de biomasse regroupant les grains, les épis et la paille. On peut observer que la production de l'arachide a généré 0,46  $\text{teqCO}_2/\text{ha}$  par production de biomasse constituer des gousses et des fanes.

Le tableau II quant à lui, présente la quantité de GES émise en produisant une tonne de parties comestibles.

Tableau II : Quantité de GES émise par tonne de parties comestibles et par système de cultures

Systèmes de cultures	GES en $\text{teqCO}_2/\text{tonne de parties comestibles}$
Arachide	0,26
Maïs TZEEW	0,08
Maïs Obatanpa	0,06
Maïs DMR ESRW	0,06

Source : Adjahossou, 2012

Pour produire une tonne d'arachide, il a fallu émettre 0,26  $\text{teqCO}_2$  alors que cette valeur n'est que de 0,07  $\text{teqCO}_2$  en moyenne pour la même quantité de production de maïs. On peut observer que l'arachide a généré 0,26  $\text{teqCO}_2$  par tonne de graines d'arachide. Il en ressort donc que la production d'une tonne d'arachide induit 3 à 4 fois plus de GES que celle du maïs.

#### 4. Discussion

L'émission de GES en agriculture est en partie liée aux intrants utilisés et au métabolisme des plantes. En effet les apports d'engrais organiques sont reconnus pour leurs effets stimulateurs et activateurs de l'activité biologique du sol ; ils accroissent et, par conséquent, stimulent la production de  $\text{N}_2\text{O}$  (Lessard *et al.*, 1996 ; Rochette *et al.*, 2000 ; Chantigny, 2001). Ces amendements apportent du carbone et de l'azote. Une partie de cet azote étant déjà sous forme minérale ( $\text{NH}_4^+$ ), il y a des émissions très élevées de  $\text{N}_2\text{O}$  dès les premières pluies suivant l'apport. Toutefois, des émissions immédiates de  $\text{N}_2\text{O}$  peuvent aussi survenir (Lessard *et al.*, 1996 ; Rochette *et al.*, 2000). En outre, les légumineuses, grâce au rhizobium, fixent l'azote atmosphérique dans le sol, augmentant ainsi, le stock d'azote lessivé et la quantité de  $\text{N}_2\text{O}$  émise. Cela pourrait indiquer que le coût environnemental de la synthèse des protéines et ou des lipides est plus élevé que celui des glucides. Ce qui n'est pas surprenant dans la mesure où, de la photosynthèse à la synthèse des protéines et des lipides, les mécanismes sont plus complexes que dans le cas des glucides et consomment par conséquent plus d'énergie et génèrent plus de  $\text{CO}_2$ . Cette émission pourrait être réduite si la quantité résiduelle de l'azote produit par les légumineuses était utilisée par des plantes en association, notamment des céréales.

## Conclusion

La production agricole contribue aux émissions de GES mais cette contribution dépend du système de cultures, des espèces mises en culture, de l'agencement de ces espèces et des conditions environnementales. Ce travail préliminaire a montré que la production de l'arachide, qui est une légumineuse, produit plus de trois fois plus de GES que le maïs, quelle que soit la variété, qui est une céréale. Il serait donc intéressant d'associer légumineuses et céréales qui ont un important besoin en azote afin les quantités excédentaires d'azote qui pourraient être source de pollution, soient valorisées.

## Références bibliographiques

- Adam S.K. et Boko M., 1993. Le Bénin. Edicef. Paris, France, 97p.
- Adjahossou V.N., 2012. Intensification des systèmes de cultures traditionnels et préservation de l'environnement en Afrique de l'Ouest : le cas du Bénin. Thèse de Doctorat unique, Option Environnement Santé Développement, Université d'Abomey-Calavi, 279p.
- Brundtland, G.H., 1987. Notre avenir à tous. Rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'ONU. Oxford : University Press., 349p.
- Chantigny M., 2001. Émissions de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) En agriculture, contribution des Amendements organiques, des Fertilisants minéraux et du labour. In Changements climatiques : comprendre pour mieux agir ! ; 65<sup>e</sup> Congrès de l'ordre des agronomes du Québec.
- GIEC., 2006. Lignes directrices pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Chapitre 11 : Émissions de N<sub>2</sub>O des sols gérés, et émissions de CO<sub>2</sub> dues au chaulage et à l'application d'urée, 60 pages.
- Griffon, M., 1999. *Développement durable et agriculture : la révolution doublement verte. Cahiers Agricultures* 8 : 259-267.
- Lessard, R., Rochette, P., Gregorich, E.G., Pattey, E., Desjardins, R. L., 1996. Nitrous oxide fluxes from manure-amended soil under maize. *Journal of environmental quality*, 25 (6) : 1371-1377.
- Migliore, S., 2007. Bilans Environnementaux de la luzerne déshydratée, du soja, du colza et du blé : Comparaisons, avec le soja, de diverses combinaisons de cultures comprenant de la luzerne déshydratée et du colza ou du blé. Mémoire de Master 2 Professionnel BIO-GEO, Espace et Milieu Paris 7 réalisé à l'INRA Unité MONA Ivry, 131 p.
- Rochette, P., van Bochove E., D. Prévost, Angers, D., Côté, A. D. et Bertrand, N., 2000. Soil carbon and nitrogen dynamics following application of pig slurry for the 19th consecutive year: II- N<sub>2</sub>O fluxes and mineral nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64 : 1396-1403.

# CARACTÉRISATION DES ÉVÈNEMENTS PLUVIOMÉTRIQUES AUTOMNAUX RESPONSABLES DES GRANDES INONDATIONS EN TUNISIE DEPUIS 1969 : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Al Atrach Mohamed Mohsen<sup>1</sup> et Nasrallah Wafa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de la Manouba/U.R «BICADE», (alatrach\_mm@hotmail.fr)

<sup>2</sup> Université de la Manouba/U.R «BICADE», (nasrallah\_wafa@ymail.com)

**Résumé** - Caractérisation des événements pluviométriques automnaux responsables des grandes inondations en Tunisie depuis 1969 : approche méthodologique

*En Tunisie, les mois d'automne des années 1969, 1982, 1995, 2003, 2007, 2009, 2011, 2016, 2018, 2019 et récemment 2020 sont marqués par la chute de fortes pluies le plus souvent diluviennes qui ont causé des inondations catastrophiques dans toutes les régions du Nord, du Centre et du Sud de la Tunisie.*

*Ces événements se distinguent par des chutes de pluies intenses voire même exceptionnelles : Les cumuls pluviométriques enregistrés dépassent les normales pluviométriques mensuelles. Les situations atmosphériques y responsables interviennent le plus souvent les mêmes caractéristiques dans les différentes régions tunisiennes exposées aux inondations. Les dégâts qui en résultent menacent l'homme et son environnement.*

*Dans cette étude, les dimensions de l'aléa fortes pluies de ces événements dans les régions tunisiennes seront présentées dans un premier lieu (au niveau des records pluviométriques enregistrés) ; et dans un second lieu on abordera les caractéristiques des circulations atmosphériques ainsi que les critères météorologiques et aérologiques qui y sont responsables. Cette contribution est d'un grand intérêt dans le domaine de la prévision, de la gestion et plus particulièrement de l'alerte précoce au risque inondation.*

**Mots clés** : fortes pluies, automne, atmosphère, Tunisie

**Abstract** - Characterization of the fall pluviometric events responsible for the major floods in Tunisia since 1969 : methodological approach

*In Tunisia, the autumn months of 1969, 1982, 1995, 2003, 2007, 2009, 2011, 2016, 2018, 2019 and recently 2020 are marked by the fall of heavy rains, most often torrential, which caused catastrophic floods in all regions of the North, Center and South of Tunisia. These events are distinguished by intense or even exceptional rainfall : The accumulated rainfall recorded exceeds the normal monthly rainfall. The atmospheric situations responsible have most of the time the same characteristics in the different Tunisian regions exposed to flooding. The resulting damage threatens Human being and his environment.*

*In this study, the dimensions of the heavy rains hazard of these events in the Tunisian regions will be presented first (at the level of recorded rainfall records); and in a second place we will approach the characteristics of atmospheric circulation as well as the meteorological and aerological criteria which are responsible for it. This contribution is of great interest in the field of forecasting, management and more particularly early warning of flood risk.*

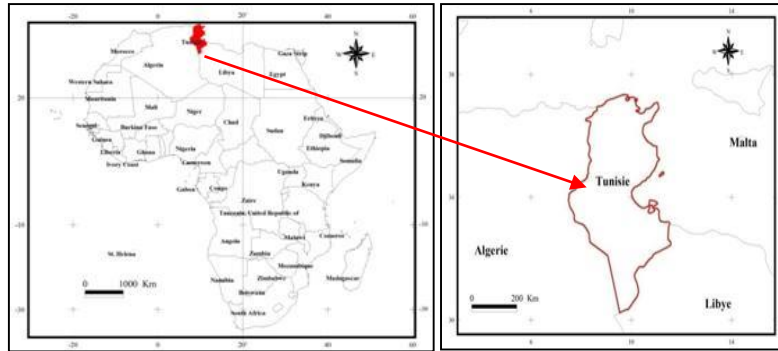
**Keywords** : heavy rains, autumn, atmosphere, Tunisia

## Introduction

La Tunisie est un pays situé au nord d'Afrique et ouvert sur la mer méditerranée, sur sa rive sud (Fig. 1). Les pluies exceptionnelles de forte intensité, dans ce pays, ne sont pas rares et peuvent être présentes précocement dès la saison d'automne. Au sein de cette saison, les mois de septembre et celui d'octobre ont été marqués par la chute des quantités très importantes de pluies à l'origine des grandes déluges pluviométriques les plus mémorables : septembre et octobre 1969, octobre 1982, septembre 1995, septembre 2003, octobre 2007, septembre 2009, octobre 2011, septembre 2016, septembre et octobre 2018, octobre 2019 et septembre 2020. Les abats des eaux précipités, qui dépassent énormément les normales mensuelles, sont attribués à un type de circulation atmosphérique typique et caractéristique de cette période de l'année qui se définit par le "retour d'est" (Henia et El Melki, 2015 et Dallel, 2015).

Les cumuls et records pluviométriques liés à ce phénomène pendant les mois de septembre et octobre de ces années, les mécanismes atmosphériques de la troposphère en Tunisie constitueront le point d'intérêt du présent travail.





**Fig. 1** : Localisation de la Tunisie

## 1. Données

Pour mener ce travail, nous avons eu recours à plusieurs données : on signale, d'abord, les données pluviométriques, à différents pas de temps, disponibles dans l'Institut National de la Météorologie et les normales mensuelles des pluies offertes dans le site "<https://fr.climate-data.org/>". D'autres données, qui caractérisent l'analyse synoptique des situations atmosphériques responsables des fortes pluies, sont puisées des cartes de pression atmosphérique en surface et en altitude des sites "<https://www.meteo60.fr>", <http://old.wetterzentrale.de>. Enfin, les données radiosondes du site "<http://weather.uwyo.edu>", et les diagrammes « Skew-T » réalisés à partir des données du site "<https://www.ncei.noaa.gov>".

## 2. Cumuls des pluies et rapports aux normales pluviométriques mensuelles

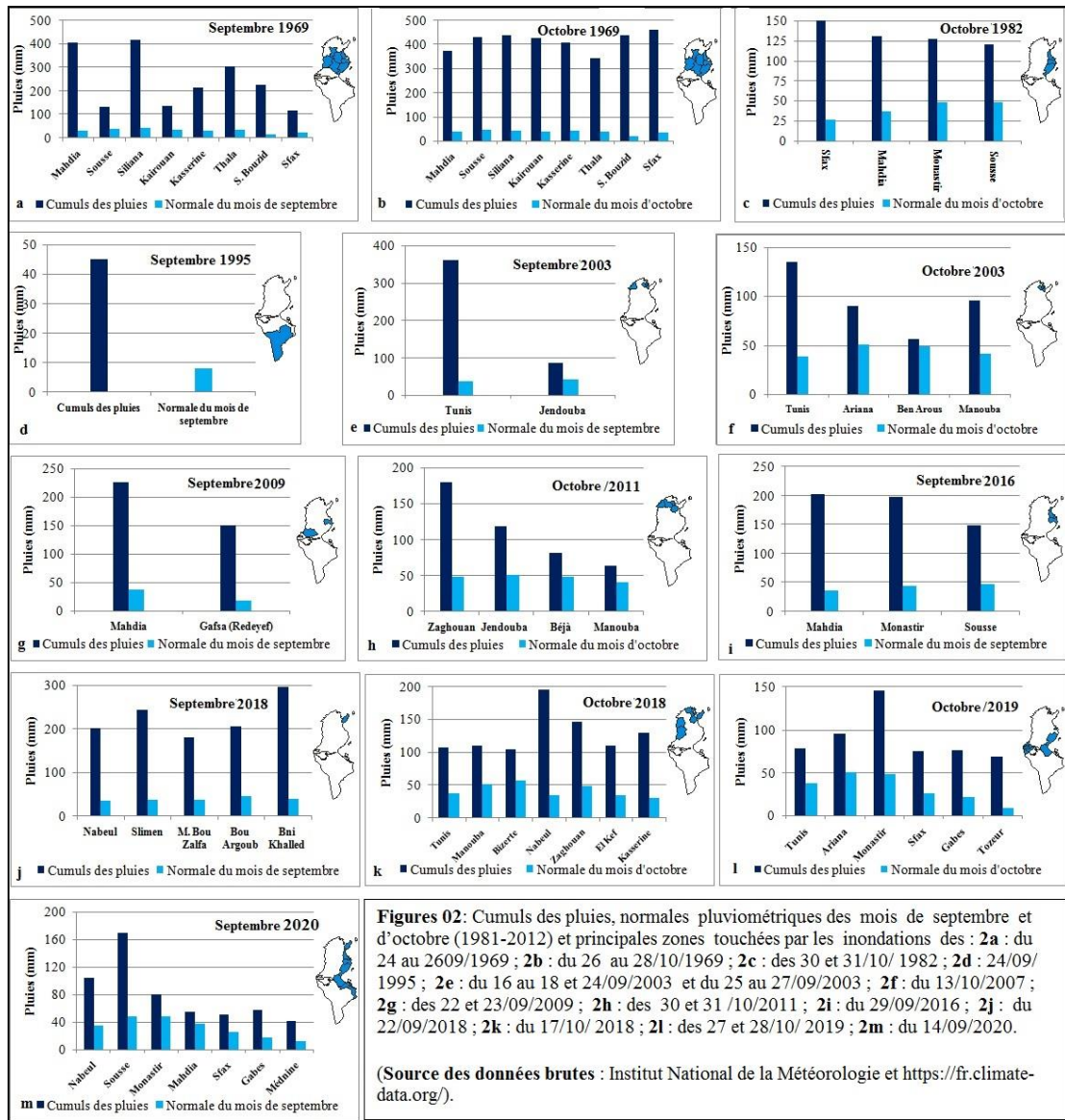
Les pluies furent exceptionnelles et de très forte intensité. Des pluviométries mensuelles dépassèrent par endroits les 700 mm (El Djem à Mahdia avec 782 mm) voire même les 800 mm (Makther à siliana avec 58 mm) pendant les mois de septembre et d'octobre de l'année 1969 (Fig. 2/a et 2/b). Des cumuls pluviométriques ont dépassé les 200 mm par jour : Mahdia (226 mm) le 23/09/2009 et (202 mm) le 29/09/2016 (Fig. 2/g et 2/i), et BniKhaled (297 mm) au Cap bon le 22/09/2018 (Fig. 2/j).

Pendant ces événements, les rapports des cumuls des pluies à la normale des mois de septembre et d'octobre semblent très importants (Tab.1). Les 16, 17, 18 et 24 septembre 2003, les abats des eaux précipitées (360 mm) à Tunis ont atteint environ 10 fois la normale de septembre (38 mm) ; Fig. 2/e. L'excédent des pluies du 22 septembre 2018 au Cap bon oscille entre 486% à Menzel Bou Zalfa et 743% à BniKhaled (Fig.2/j).

**Tab. 01.** Rapports des cumuls des pluies aux normales mensuelles du mois de septembre et d'octobre.

Dates	Région	Gouvernorats	Max. pluviométrique	Normale mensuelle	Rapport (%)
30/10/1982	Sud-est	Sfax	152	26	584.61
24/09/1995	Sud-est	Tataouine	45	08	562.50
13/10/2007	Nord-est	Tunis	184	51	362.74
23/09/2009	Centre-est	Mahdia	226	37	610.81
30/10/2011	Nord-est	Zaghouan	180	48	375.00
29/09/2016	Centre-est	Mahdia	202	37	545.94
17/10/2018	Nord-est	Nabeul	195	35	575.14
27/10/2019	Centre-est	Monastir	146	48	304.16
14/09/2020	Centre-est	Sousse	169	48	352.08

(Source : INM et <https://fr.climate-data.org/>)



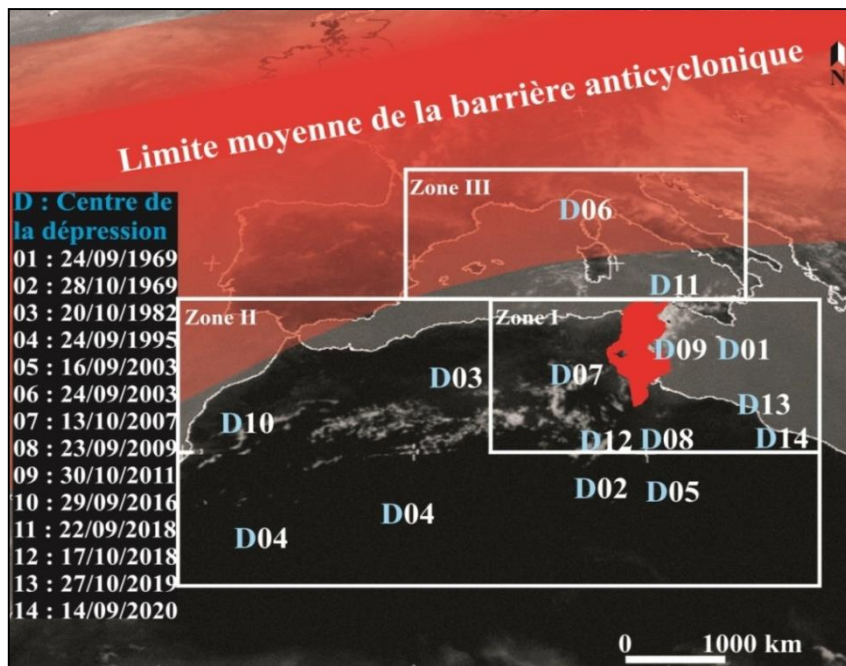
### 3. Centres de pression en surface et en altitude

#### 3.1. En surface du sol

Une zone de hautes pressions sous forme d'une dorsale traduisant un prolongement au sol du l'anticyclone des Açores de l'Atlantique tropicale vers l'Europe de l'est (Fig. 3). Cette dorsale couvre la quasi-totalité de la Méditerranée occidentale et déborde parfois les trois pays du Maghreb, le Maroc, l'Algérie et la Tunisie. Elle bloque souvent la circulation zonale directe d'ouest : de l'air Polaire maritime (Pm) va être remplacé par l'air polaire continental (Pc) plus froid de secteur Est sur la Tunisie.

Une dépression peu creuse (pas moins de 1005 hPa) prenant naissance :

- Soit au large des côtes orientales du pays, entre les golfes de Hammamet et de Syrte ou le long des frontières avec l'Algérie à l'ouest (zone I) ;Fig. 3.
- Soit d'origine Saharienne qui progressent vers la Tunisie du secteur Sud-est (zone II).
- Soit au bassin occidental de la Méditerranée (zone III). Il s'agit de la dépression du golfe de Gênes qui peut, parfois, s'évoluer vers le Sud-est en liaison avec l'avancée de la dorsale anticyclonique s'étendant de l'Atlantique vers l'est de l'Europe (Henia et El Melki, 2015).



**Figure3.** Limites des zones des lieux des dépressions en surface.

(Sources des cartes de référence : <https://www.meteo60.fr/aller-plus-loin/archives-cartes/preiso/bracknell>, <http://old.wetterzentrale.de/topkarten/fsrea2eur.html>).

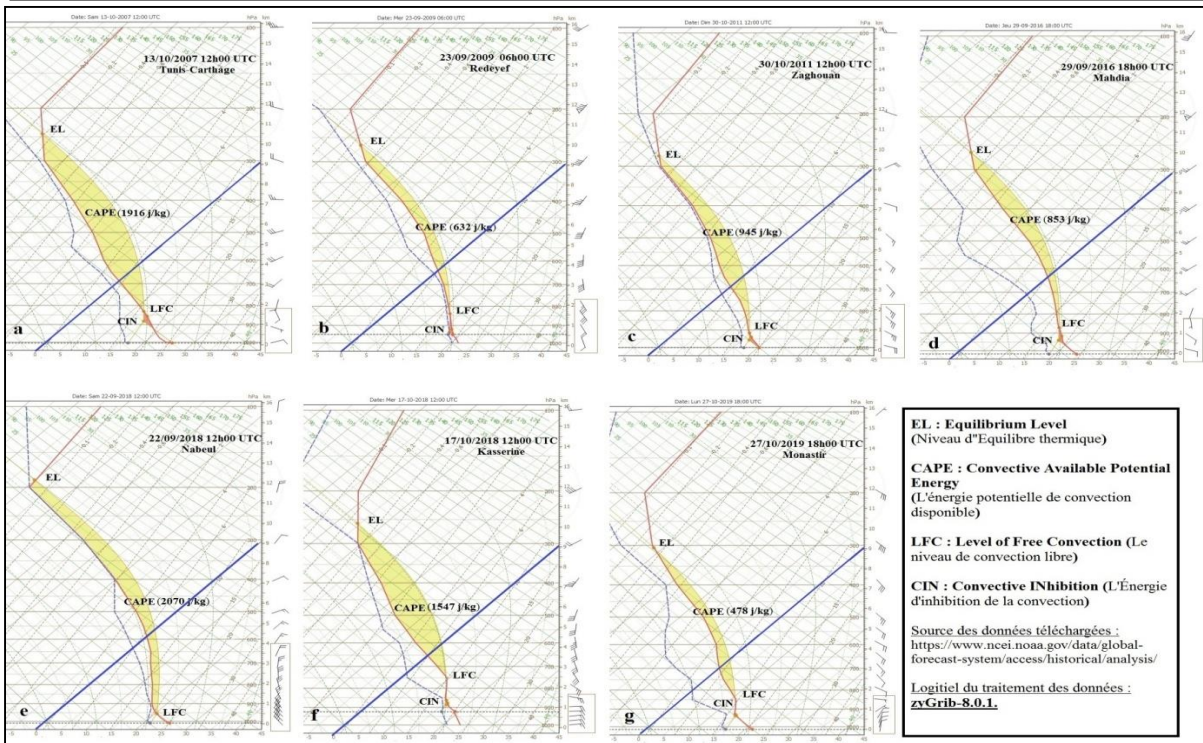
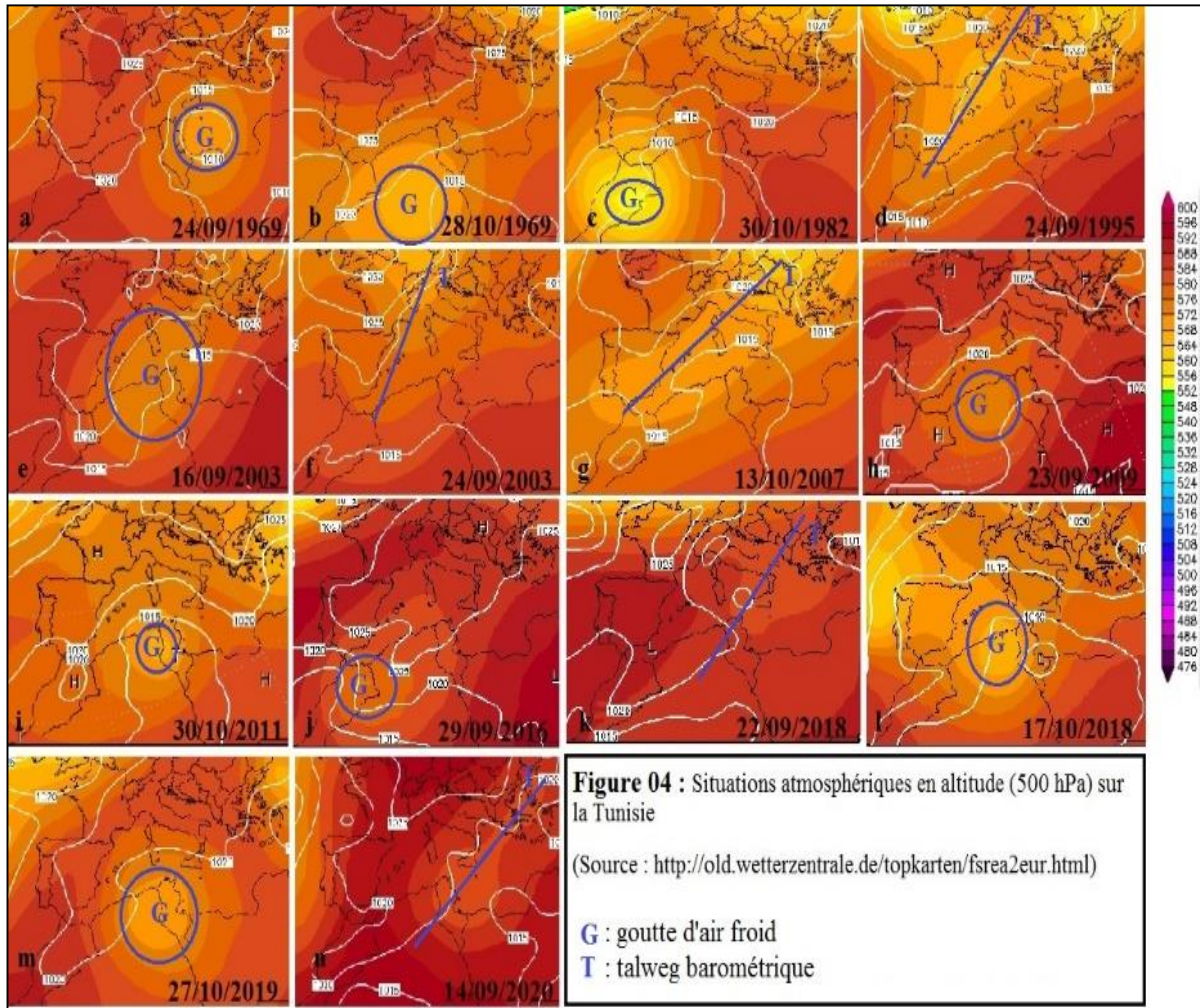
### 3.2. En altitude

Les situations en altitude reprennent généralement celles de la surface. En effet, une crête barométrique très puissante (562 à 584 décamètres) surmonte en grande partie la dorsale anticyclonique au sol. Une invasion de l'air froid, coiffant plus au moins les dépressions en surface, à travers une vallée planétaire s'étire de l'est de l'Europe vers la Méditerranée occidentale et la Tunisie du côté est (Fig.4/d, f, g, k et n). Souvent, cette vallée barométrique se termine, partiellement ou totalement, par un détachement d'une goutte d'air froid (Fig.4/a, b, c, e, h, i, j, l et m). En automne, 73% des pluies à risque sont fortement liées en altitude à des gouttes d'air froid (Dallel, 2015).

### 4. Caractères aérologiques de la troposphère

La dépression en surface du sol, quel que soit sa position, converge l'air chaud et sec saharien (Tc) et l'air froid d'origine polaire continental (Pc) qui s'humidifient, se réchauffent par la base et deviennent instables après leurs passages sur la Méditerranée. Le contournement de l'air autour de la dépression dans le sens antihoraire se traduit par des flux d'est ou du nord-est sur la Tunisie (Fig. 5/a, b, c, d, e, f, et g). Les ascendances de l'air instable demeurent très importantes et sur presque toute l'épaisseur de la troposphère (12 km le 22/09/2018 ; Figure 5e). En altitude, le mouvement ascendant se trouve exacerbé par la présence de la goutte froide (Henia et El Melki, 2015). Cette dernière assure la giration de l'air en altitude avec une vitesse très importante où les ascendances thermoconvectives peuvent atteindre rapidement les hautes couches de la troposphère. Ces propriétés sont très opportunes à la formation des cellules orageuses pluvieuses et des nuages d'orages (Cb) très épais qui se développent

généralement entre le niveau de convection libre (LFC) et le niveau d'équilibre thermique (EL) ;  
 Fig. 5/a, b, c, d, e, f, et g.



Le tableau 02 résume les critères météorologiques synoptiques et aérologiques de l'atmosphère des chutes des pluies responsables des inondations d'automne en Tunisie.

Mois	Dates	Situation météorologique sur l'ensemble de la Tunisie											
		En surface			En altitude (500 mb)		Aérologie de la troposphère						
		T.mx (°C)	P. (hPa)	P. au centre (hPa)	T.mn (°C)	Altitude moyenne (gp/m)	LFC		CAPE (J/Kg)	EL			
							hPa	Km		hPa	Km		
Septembre	24/09/1969	>0°C	26	< 1015	1010	??	5680	Non disponible					
	24/09/1995		22		1010	-23		5840	881	1.1	330	317	09
	16/09/2003 *		28		1007	-13		5760	907	01	235	333	8.5
	24/09/2003		30		1014	-19		5840	703	03	847	213	11.7
	23/09/2009		26		1010	-17		5760	833	1.7	632	265	10
	29/09/2016		26		1015	-10		5800	871	1.2	853	265	10
	22/09/2018		27		1013	-9		5840	957	0.45	2070	178	12.5
	14/09/2020		27		1011	-22		5840	754	2.4	96	493	5.5
Octobre	28/10/1969	>0°C	24	< 1015	1015	??	5720	Non disponible					
	20/10/1982		22		1015	-14		5720	751	2.4	1339	233	10.5
	13/10/2007		26		1011	-20		5760	831	1.3	1916	245	10.6
	30/10/2011		21		1009	-15		5800	917	0.8	945	278	9.5
	17/10/2018		25		1007	-16		5680	862	2.5	1547	258	10.8
	27/10/2019		22		1015	-18		5680	873	1.2	478	303	9.2

Tableau 02. Critères météorologiques synoptiques et aérologiques de l'atmosphère des chutes des pluies responsables des inondations d'automne en Tunisie

\* faute des lacunes, on a utilisé les données du 17/09/2003 à 00h00

(Sources des données : <https://www.meteo60.fr/aller-plus-loin/archives-cartes/preiso/bracknell>,

<http://old.wetterzentrale.de/topkarten/fsrea2eur.html>, <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> et

<https://www.ncei.noaa.gov/data/global-forecast-system/access/historical/analysis/>).

## Conclusion

Il ressort de cette étude de synthèse que les événements pluviométriques traités ont présenté les grands déluges pluviométriques automnaux vécus en Tunisie en 1969, 1982, 1995, 2003, 2007, 2009, 2011, 2016, 2018, 2019 et 2020. Le comportement de l'atmosphère et l'état aérologique de la troposphère interviennent le phénomène de "retour d'est" où les précipitations débordent abondamment sur la Tunisie orientale et centrale. Ce type de circulation met en jeu une structure de la troposphère très peu fréquente sur ces régions, caractérisée par la présence de l'air froid sur une très grande épaisseur de la troposphère (Henia et El Melki, 2015).

## Bibliographie

- Al atrach M.M. et Fehri N. (2019) - Les fortes pluies et les inondations du 17 octobre 2018 dans la région de Kasserine au centre-ouest de la Tunisie. *XXXII<sup>ème</sup> Colloque International de l'AIC*, Thessaloniki, Grèce, pp. 127-132.
- Abdelkhalek A., 2015 : Les très fortes pluies à risques dans la Tunisie centrale : cas de l'événement du 22 et 23 septembre 2009. *In Contribution à l'étude des aléas et des risques climatiques en Tunisie*, FSHS, pp. 61-66.
- Dallel J., 2015 : Les pluies à risques en Tunisie. *In Contribution à l'étude des aléas et des risques climatiques en Tunisie*, FSHS, p. 33-59.
- El Melki T., 2014 : Climatologie dynamique de la Tunisie. *FLAH de la Manouba*, 438 p.
- Fehri N. et Samaâli H., 2009 : Les inondations catastrophiques du 13 octobre 2007 dans le secteur de sabbelet ben Ammar entre aléa climatique et responsabilité anthropique (grand Tunis – Tunisie), *ResearchGate*, 18 p.
- Fehri N. et Zahar I., 2003 : Étude de l'impact de l'extension et de la densification du tissu urbain sur les coefficients de ruissellement dans le bassin versant des oueds El-Ghrich et El-Greb (Tunis) par l'application de la méthode SCS aux événements de septembre 2003. *Physio-Géo*, pp. 61-79.
- Henia L. et El Melki T., 2000 : Circulation de « Retour d'Est » et pluies diluviennes sur la Tunisie orientale. *In Publications de l'AIC*, vol. 13, pp. 120-127.

# ÉTUDE DES IMPACTS DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE SUR LES EAUX DE SURFACE DANS LE BASSIN VERSANT DU BANDAMA BLANC (centre-nord de la Côte d'Ivoire)

Amalaman Marc A. <sup>1,2</sup>, Nouaceur Zeineddine<sup>2</sup>, DiomandeBeh I. <sup>1</sup>, Tra Bi Z. A. <sup>1</sup>, Laignel Benoit<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Université Alassane Ouattara de Bouaké, UFR- CMS, Tel : +33751453558 / +225 59677164 ; E-mail: [marcauriola@gmail.com](mailto:marcauriola@gmail.com) - Université de Rouen, UMR CNRS 6143 M2C Place Emile-Blondel, 76821 Mont-Saint-Aignan cedex France, [marc-auriol.amalaman@univ-rouen.fr](mailto:marc-auriol.amalaman@univ-rouen.fr)

<sup>2</sup>Université de Rouen, UMR CNRS 6228 IDEES Rue Lavoisier, 76821 Mont-Saint-Aignan cedex France, [zeineddine.nouaceur@univ-rouen.fr](mailto:zeineddine.nouaceur@univ-rouen.fr)

<sup>1</sup>Maître de Conférences, Université Alassane Ouattara de Bouaké, UFR- CMS, TEL +225 09 96 99 17 / +225 03 46 53 69 ; E-mail: [beh.ibrahimdiomande@gmail.com](mailto:beh.ibrahimdiomande@gmail.com)

<sup>1</sup>Université Alassane Ouattara de Bouaké, UFR- CMS, Tel : +225 47 20 64 15 ; E-mail : [zambtra@yahoo.fr](mailto:zambtra@yahoo.fr)

<sup>2</sup>Université de Rouen, UMR CNRS 6143 M2C Place Emile-Blondel, 76821 Mont-Saint-Aignan cedex France, [benoit.laignel@univ-rouen.fr](mailto:benoit.laignel@univ-rouen.fr)

**Résumé :** Le bassin versant du Bandama blanc est situé dans le centre-nord de la Côte d'Ivoire et possède une grande partie localisée en zone septentrionale ivoirienne. Les ressources hydriques de cette vaste unité morphologique représentent un apport important pour l'agriculture et l'approvisionnement en eau potable. La grande variabilité climatique et la durée des périodes sèches ont un impact sur la disponibilité des eaux de surface. Cette situation a accentué les pénuries d'eau potable dans le bassin de la Loka, un sous bassin versant du Bandama blanc. L'objectif de ce travail est d'évaluer l'impact de la variabilité climatique sur les eaux de surface (lacs et fleuves) dans le bassin versant du Bandama blanc grâce à deux méthodes de travail. D'une part, une analyse décennale de la pluviométrie sur 18 postes de mesures sur la période 1980-2019 (recherche de tendance et de cycle) et l'utilisation de l'Indice Standardisé de Précipitation (SPI) sur la période (2001-2002) et celle de (2017-2018). D'autre part, une analyse diachronique sur des images satellites Landsat (2002) et Sentinel 2 (2018) en appliquant le Normalised Difference Water Index (NDWI). Les résultats montrent l'occurrence d'une pluviométrie assez abondante au Nord au détriment de la zone Sud du bassin, marquée par un déplacement des isohyètes de l'ouest à l'est dans la décennie 2000-2009. Cette augmentation de la pluviométrie au nord du bassin versant s'explique par les facteurs orographiques assez présents dans ladite zone. L'indice NDWI appliqué sur les images 2002 et 2018 a montré que l'inégale répartition de la pluviométrie a de fortes répercussions sur les surfaces en eau.

**Mots clés :** Variabilité climatique, Eau de surface, Bandama blanc, Côte d'Ivoire

**Abstract:** The White Bandama river watershed is located in the north-central part of Côte d'Ivoire and has a large part located in the northern zone. The water resources of this vast morphological unit represent an important contribution to agriculture and the supply of drinking water. High climate variability and the duration of dry periods have an impact on surface water availability. This situation has exacerbated drinking water shortages in the Loka basin, a sub-watershed of the White Bandama. The objective of this work is to assess the impact of climate variability on surface waters (lakes and rivers) in the White Bandama watershed through two working methods. On one hand, a 10-year analysis of rainfall on 18 measurement items over the period 1980-2019 (trend and cycle research) and the use of the Standardised Precipitation Index (SPI) over the period (2001-2002) and the one of (2017-2018). On the other hand, a diachronic analysis on satellite images Landsat (2002) and Sentinel 2 (2018) using the Normalised Difference Water Index (NDWI). The results show the occurrence of fairly abundant rainfall in the North to the detriment of the southern zone of the basin, marked by a shift of isohyets from west to east in the decade 2000-2009. This increase in rainfall north of the watershed is due to the orographic factors quite present in this area. The NDWI index applied to the images of 2002 and 2018 shows an important upsurge of the expanse of surface waters over time.

Key words: climatic variability, surface water, white Bandamariver, Cote d'Ivoire

## Introduction

La gestion de l'évolution des ressources en eau dans un contexte de changement climatique constitue un problème préoccupant. De nombreuses études ont montré que la variation climatique en Afrique de l'Ouest se manifeste ces dernières années par un raccourcissement des saisons pluvieuses et une augmentation de la température (Amousou et al. 2016 ; Bodian et al. 2013 ; Faye et al. 2015; Nouaceur 2020).

La Côte d'Ivoire est confrontée à des changements qui génèrent un profond malaise environnemental et social. Cette situation est traduite aujourd'hui sur le terrain par une grande

vulnérabilité des eaux de surface ce qui impacte fortement l'alimentation en eau des populations (Ahoussi et al. 2013 ; Assemien et al. 2013).

Situé dans le bassin du Bandama, le bassin versant du Bandama blanc a fait l'objet de plusieurs études consacrées. Ces investigations ont permis d'évaluer l'impact de la variation climatique sur les ressources hydriques aux niveaux de surface et souterrain (Anzoumanan et al. 2019 ; Claon et al. 2020; Diomande et al. 2019). L'étude proposée a pour objectif d'évaluer ces changements sur les eaux de surface (lacs et fleuves) grâce à deux méthodes de travail.

### Présentation de la zone d'étude

Le bassin du Bandama blanc (figure 1) s'étend du Nord au Centre de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 6°30' et 10°30' Nord et les longitudes 5°00' et 6°00' Ouest. Il a une forme rectangulaire et une superficie de 34059 Km<sup>2</sup>. Ce bassin est un sous bassin versant du bassin du Bandama qui a une longueur de 1050 km.

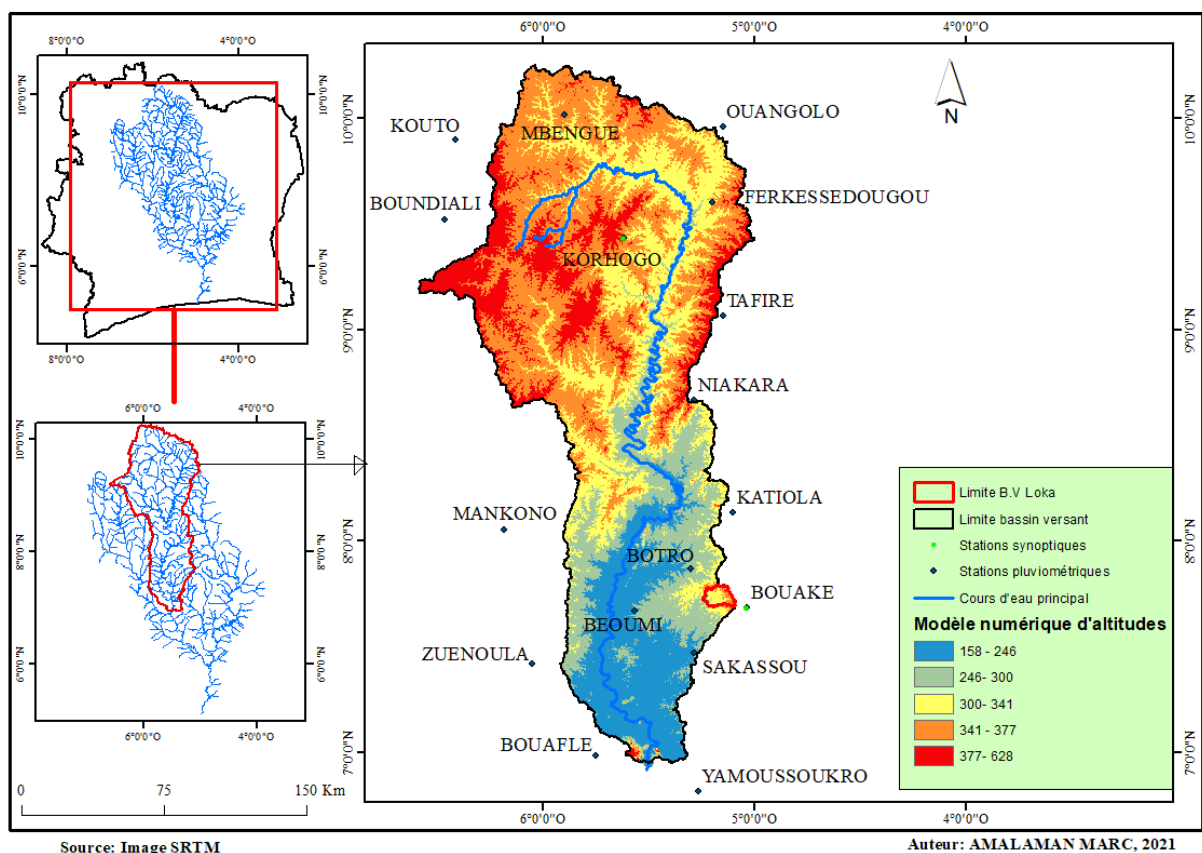


Figure1 : carte de présentation de la zone d'étude

**Au plan climatique**, le bassin versant du Bandama blanc s'étale sur deux grandes zones climatiques à savoir la zone tropicale (zone humide) et la zone soudanienne (zone plus sèche). La végétation qui colonise ce territoire est composée d'une savane pré-forestière (au nord et au centre) et d'une savane stricte plus présente au sud.

**Au plan hydrologique**, le fleuve Bandama blanc, cours d'eau principal du bassin versant est un affluent du fleuve Bandama qui a une longueur de 1050 km. Le Bandama blanc prend sa source à une altitude de 480 m entre Korhogo et Boundiali. Après une orientation de l'ouest vers l'est de son cours supérieur jusqu'à Ferkessedougou, il prend une direction N-S. De Ferkessedougou à sa confluence avec le Bou, le Bandama blanc décrit une succession de méandres (figure 1). Audoit de Kossou (au sud du bassin versant), la vallée se resserre



notablement. C'est à cet endroit qu'est construit depuis 1971 le barrage de Kossou (le plus important barrage hydroélectrique du pays).

## 1. Données

Les données utilisées proviennent de différentes sources. Les données pluviométriques (1980 – 2019) ont été obtenues à la SODEXAM (société d'exploitation pour le développement aéroportuaire et météorologique de la Côte d'Ivoire). Les images satellites (2002 et 2018) Landsat ETM et Sentinel proviennent du site « USGS EarthExplorer » <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

## 2. Méthodes

### a- Analyse pluviométrique

Pour l'analyse pluviométrique, nous avons utilisé une analyse décennale pour déterminer la tendance, puis la méthode SPI (Standardized Precipitation Index) (<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-index-spi>) pour traduire les variations pluviométriques.

$$Spi = \frac{Xi - X}{\delta}$$

$X_i$  = Hauteur de pluie de l'année  $i$  ;

$X$  = Moyenne de la série

$\delta$  = Écart type

SPI = indice Standardisé de Précipitation ;

Cette dernière méthode, utilisée par plusieurs auteurs (*Amousou et al. 2016 ; Assemien et al. 2013 ; Diomande et al. 2019 ; Faye et al. 2015*), permet d'analyser et de détecter les variations dans une série chronologique (Tableau 1). Pour la cartographie spatiale de l'analyse décennale de la pluviométrie et de l'indice standardisé de précipitation (SPI) nous utilisons le krigeage ordinaire (interpolation des données de pluviométries).

Tableau 1 : Classification de la sécheresse en rapport avec la valeur de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI)

Classes du SPI	Degré de sécheresse	Classes du SPI	Degré de sécheresse
SPI > 2	Humidité extrême	-1 < SPI < 0	Sécheresse modérée
1 < SPI < 2	Humidité forte	-2 < SPI < -1	Sécheresse forte
0 < SPI < 1	Humidité modérée	SPI < -2	Sécheresse extrême

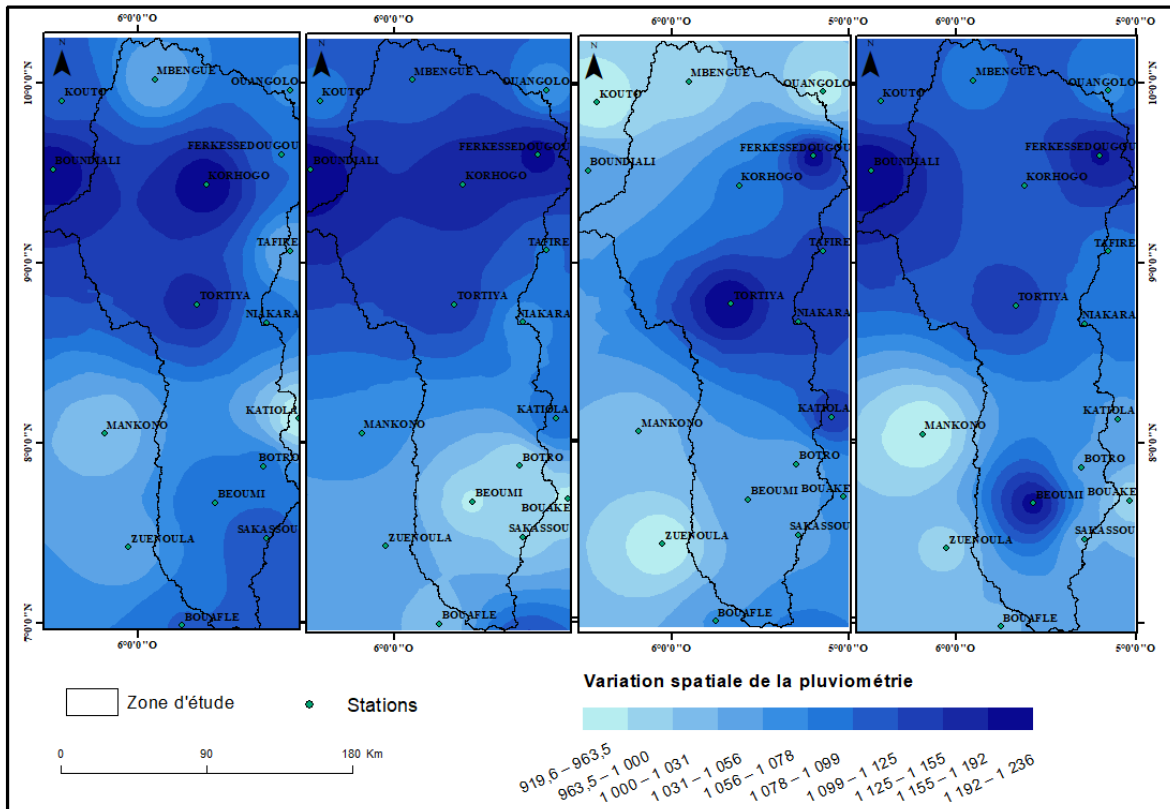
### b- Analyse diachronique

Les images satellites de deux dates différentes (2002 et 2018) ont permis d'évaluer l'évolution des ressources en eau. Cette démarche a été faite par l'application de l'indice normalisé de teneur en eau (NDWI) utilisée par *Gao (1996)*, cité par *Diomande et al. (2019)*.

## 3. Résultats et discussions

### 3.1. Analyse décennale de la pluviométrie dans le bassin versant du Bandama blanc

L'analyse décennale de la pluviométrie (cumul annuel) sur la période 1980-2019 est présentée par la figure 2. L'échantillonnage de la série chronologique en quatre décennies a permis de mieux montrer les différentes variations survenues au cours de la période. Ainsi, sur la décennie (1980-1989) et la décennie (1990-1999), nous remarquons une pluviométrie assez abondante dans le nord du bassin avec une pluviométrie allant de 1131 mm à 1300 mm.



Source: Sodexam, 2020

Auteur: AMALAMAN Marc, 2021

Figure 2: Variation spatiale de la pluviométrie de 1980 à 2019

Quant à la décennie (2000-2009), nous observons une migration de cette pluviométrie à l'est et au nord-est du bassin avec une moyenne comprise entre 1100 mm et 1200 mm de pluie.

Enfin, la dernière décennie (2010-2019) est marquée par un retour de la pluviométrie au nord et dans la partie centrale Sud dans le département de Béoumi. Cette pluviométrie abondante s'explique par l'effet orographique (*Klassou 1996 et Amoussou 2010*) cités par *Amoussou et al, 2016*.

### 3.2. Étude de la sécheresse climatique

La présentation des valeurs moyennes spatialisées du SPI (figure 3) montre une alternance entre périodes sèches et humides sur la période (2001-2002) et (2017-2018). En effet, les périodes humides sont plus ressenties dans la majeure partie du sud et au nord-est entre 2001 et 2002. La sécheresse est plus perceptible au nord et au nord-ouest. Il existe quelques foyers de sécheresse au sud, sur l'axe Béoumi-Botro. Le centre du bassin versant présente une humidité modérée. En outre, la période 2017-2018, montre une humidité généralisée sur le bassin versant. Une période sèche est observée dans les départements de Bouaké et Mankono dans la au cours de ladite période. La longue saison sèche constatée vers la fin de l'année 2017 dans la station synoptique de Bouaké est responsable du tarissement des eaux de surface (*Claon et al., 2020 ; Diomande et al., 2019*) dans le bassin versant de la Loka. Ce sous bassin versant du Bandama est situé au sud dudit bassin versant (Bandama blanc).

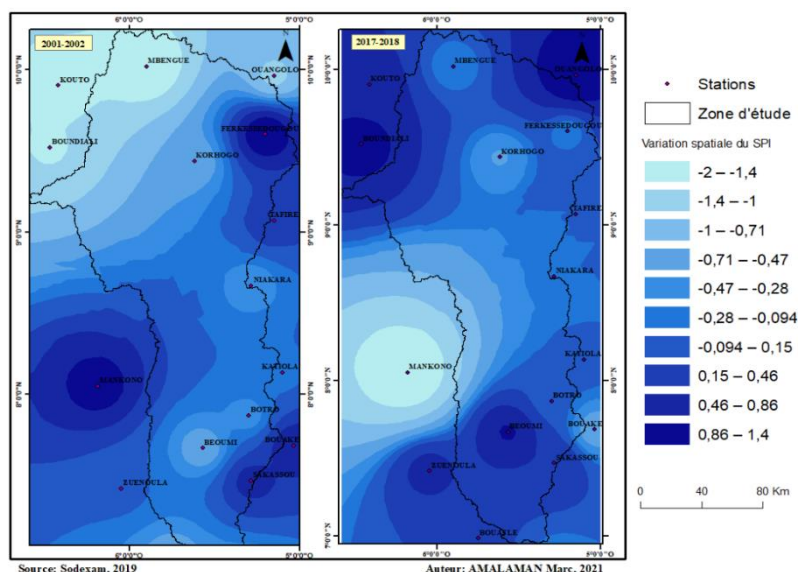


Figure 3 : Répartition spatiale des valeurs moyennes du SPI sur les périodes (2001-2002) et (2017-2018)

### 3.3. L'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface

L'analyse des zones humides du sous bassin nord de la Loka (figure 4), sous bassin du Bandama blanc, à partir des images satellitaires de 2002 et 2018, a permis de montrer la variation des superficies des eaux de surface. Ces zones servant d'alimentation en eau potable furent très impactées par l'absence prolongée de pluie. Ce tarissement a affecté trois départements (Bouaké, Botro et Sakassou) par un stress hydrique sévère (pénurie de l'eau potable pendant huit mois) *Claon et al., 2020; Diomande et al., 2019*. En effet, le NDWI présente une surface du bassin versant qui abonde en zones humides. Les zones humides en 2002 occupent une surface de 6,78 km<sup>2</sup> soit un taux de 5,16 %. Le NDWI de 2018 indique une réduction des zones humides et notamment de la surface des eaux du barrage qui alimente les localités environnantes. Nous remarquons aussi, au niveau du bassin, plusieurs zones humides dans les localités d'Agbakro, Lokanou et Dinambo. Ce fait s'explique par une anthropisation de la zone marquée par une prépondérance de l'agriculture et des carrières (ces surfaces représentent 6,12 km<sup>2</sup> soit un pourcentage de 4,76 % de l'ensemble du territoire étudié).

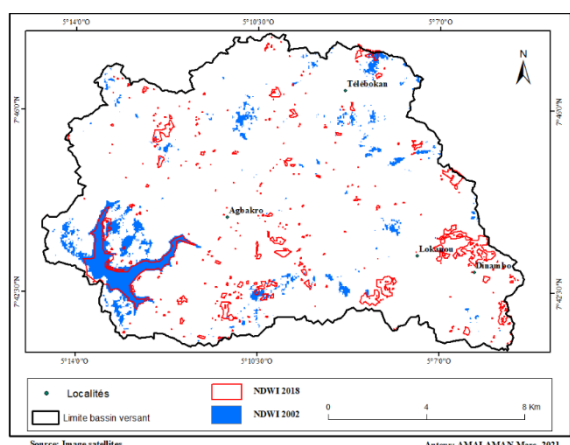


Figure 4 : Variation des eaux de surface dans le bassin versant de la Loka

## Conclusion

L'étude de la variabilité climatique dans le bassin versant du Bandama blanc a permis de montrer une variation de la pluviométrie sur la période 1980 – 2019. La structuration spatiale de la zone d'étude a un impact sur la distribution spatiale de la pluviométrie au sein du bassin versant. Cette pluviométrie est perturbée par une prépondérance de reliefs (dôme granitique et collines) au nord. La décennie (2000-2009) a été la moins pluvieuse. En outre, nous pouvons noter une pénurie généralisée de l'eau potable due au tarissement des eaux de surfaces. Cette situation est la conséquence d'une durée de la sécheresse à partir de la fin de l'année 2017. Il convient donc de retenir que, quand bien même la variation du climat impacte la disponibilité des eaux de surface, il n'en demeure pas moins que le rôle joué par la pression anthropique est de plus en plus marqué.

## Bibliographie

- Ahoussi K. E., Koffi Y. B., Kouassi A. M., Soro G., Soro N., & Biémi J., 2013. Étude de la variabilité hydroclimatique et de ses conséquences sur les ressources en Eau Du Sud Forestier Et Agricole De La Côte d'Ivoire : Cas De La Région d'Abidjan-Agboville. *International Multilingual Journal of Contemporary Research*, Vol.1, N°1
- Amoussou E., Mahe G., Vodounon T. S. H., & Camberlin P., 2016. Evolution climatique du Benin de 1950 à 2010 et son influence sur les eaux de surface, Actes du 21<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Lausanne-Besançon, PP. 231-236
- Anzoumanan K., Yao B. K., Amani M. K., Kouakou D. B., & Diallo S., 2019. Impact des Évolutions Climatiques sur les Ressources en eau des Petits Bassins en Afrique Sub-Saharienne : Application au Bassin Versant du Bandama à Tortiya (Nord Côte d'Ivoire), *European Scientific Journal*, March 2019 edition Vol.15, N°9 ISSN : 1857 –7881
- Assemien E. A., Kouame K. F., Djagoua E. V., Kouadio A., Jourda J. J. M., Miessan A., Lasm T., & Biémi J., 2013. Etude de l'impact des variabilités climatiques sur les ressources hydriques d'un milieu tropical humide : cas du département de Bongouanou (est de la Côte d'Ivoire), *revue de l'eau des sciences de l'eau / journal of waterscience*, vol. n°3, 2013, p. 247-261.
- Bodian A., Dezetter A., Dacosta H., & Ardoin-Bardin S., 2013. Impact du changement climatique sur les ressources en eau du haut bassin du fleuve Sénégal. In « *Revue de géographie du laboratoire LEÏDI* » – ISSN 0051 – 2515–N°11.
- Claon J. S., Amalaman M. A., Seri K. L., Djaman A. J., Kouadio K. L., & Diomande B. I., 2020. Water scarcity in african cities: anthropic factors or climate change? Case of Bouake (Côte d'Ivoire), Second International Conference « *Water, Megacities and Global Change* », 7-11 December 2020
- Diomande B. I., Amalaman M. A., Claon J. S., & Kone D., 2019. Evolution hydroclimatique dans le bassin versant de la Loka et problématique d'accès en eau potable dans le centre de la cote d'ivoire, *revue climat et développement*, N°26, décembre 2019.
- Faye C., Sow A. A., & Ndong J. B., 2015. Etude des sécheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale: caractérisation et cartographie de la sécheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal, *Physio-Géo* volume 9, PP 17- 35; DOI: 10.4000/physio-geo.4388
- NOUACEUR Z., 2020. La reprise des pluies et la recrudescence des inondations en Afrique de l'Ouest sahélienne», *Physio-Géo*, Volume 15, <http://journals.openedition.org/physio-geo/10966>; doi.org/10.4000/physio-geo.10

# ETUDE DU TAUX D'INCIDENCE ET DE PREVALENCE DE TROIS MALADIES LIEES A L'EAU DANS LE BASSIN BENINOIS DU MONO

Amoussou Yvon Lionel<sup>1,2</sup>, Djaouga Mama<sup>2</sup>, Kpokpo Roche<sup>2</sup>, Late Enoc<sup>2</sup>, Senou Rodrigue<sup>4</sup>, Thomas Omer<sup>2</sup>, Agbahungba Georges<sup>1</sup>, Avahounlin Fernand<sup>1,5</sup>, VissinExpedi<sup>3</sup>

*1 Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications, Bénin (yvonci@yahoo.fr)*

*2 Laboratoire de Cartographie de l'Université d'Abomey - Calavi, LaCarto, Bénin*

*3 Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement, Cotonou, Bénin*

*4 Université d'Abomey - Calavi, Faculté de psychologie, Bénin*

*5 Université Nationale des Sciences et Techniques de l'Ingénierie et des Mathématiques (UNSTIM), Chaire Internationale de Physiques Mathématique et Applications (CIPMA, Chaire UNESCO), 072 BP 50 Cotonou*

**Résumé :** La problématique de la santé dans les bassins constitue une préoccupation des différents responsables politico-administratifs et des partenaires au développement. L'étude du taux d'incidence des maladies fréquemment rencontrées dans le bassin du Mono montre que plusieurs maladies sont causées par l'eau du bassin ainsi que ses affluents et effluents. Le bassin béninois du Mono soumis à plusieurs risques hydro-climatiques a ses populations qui sont confrontés à ces maux. Notre étude a consisté à recueillir auprès des centres de santé primaires et secondaires des villes du bassin, les statistiques relatives au taux d'incidence et de prévalence des maladies, les premiers résultats montrent par ordre de récurrences les maladies suivante : Le paludisme, l'onchocercose et le choléra selon les saisons. A travers une enquête socio-économique, nous avons analysé les stratégies d'adaptation de ses population face à ces trois maladies.

**Mots clés :** Bassin, Taux de prévalence et d'incidence, stratégie d'adaptation, santé

*The issue of health in the basins is a concern of the various political and administrative leaders and development partners. A study of the incidence rate of diseases commonly encountered in the Mono Basin shows that several diseases are caused by the water of the basin and its tributaries and effluents. The Benin basin of Mono subject to several hydro-climatic risks has its populations that are facing these evils. Our study involved collecting statistics on the incidence and prevalence of disease from primary and secondary health centres in the basin's cities, the first results showing in order of recurrence the following diseases: malaria, onchocercosis and cholera according to the seasons. Through a socio-economic survey, we analysed the strategies of adapting its population to these three diseases.*

**Keywords:** Basin, Prevalence and Incidence Rate, Adaptation Strategy, Health

## Introduction

L'impact de la dynamique du climat sur la santé est démontré dans plusieurs études (GIEC, 2014). Selon Catherine Simonet (2012), le climat et la santé sont très liés ainsi les chocs pluviométriques ont des conséquences néfastes sur la santé des enfants de moins de 5 ans et des femmes enceintes. Cette situation peut être attribuable à l'absence, la rareté, l'excès ou la mauvaise répartition spatio-temporelle des pluies (Atiyè, 2017).

Ces impacts se manifestent dans le bassin du Mono particulièrement dans la zone sanitaire d'Athiémé et de Lokossa par des pathologies variées en saison de pluies avec pour pic les mois de Juin et Juillet d'une part et d'autre part Octobre et Novembre. En 2017 on a atteint près 30742 cas d'affection de malaria dans cette zone sanitaire. En ce qui concerne la pathologie de l'onchocercose on a atteint 52726 cas pour le compte de la même année 2017. Cette dernière pathologie est plus observée pendant les crues du fleuve Mono et dans les basses altitudes, provoquant la cécité des personnes affectées et des animaux domestiques. Plusieurs autres pathologies comme la candidose buccale et la parasitose intestinale dégradent la santé des populations vulnérables pendant la saison des pluies. La fréquence de ces maladies montre les limites des stratégies d'adaptation. Notre méthodologie a consisté à identifier, caractériser et cartographier les pathologies dans certains cas puis à partir des paramètres de tendances centrales déterminer les stratégies d'adaptation face aux pathologies et proposer des mesures d'adaptation.

## 1) Cadre physico-géographique et méthodologie

### 1.1) Cadre physico-géographique

Situé sur la frontière Togo-Bénin, le fleuve Mono s'étend sur 560 km du Nord au Sud et plus précisément entre 06°16' et 09°20'N et 0°42' et 2°25'E (Amoussou E, 2010). Il draine un bassin-versant d'environ 30 000 km<sup>2</sup> et se jette dans l'Atlantique et dans un vaste système lagunaire. Le barrage de Nangbéto, a été construit en 1987, modifiant de façon drastique le régime hydro-sédimentaire naturel dans la vallée et à l'embouchure de ce fleuve (Amoussou Y, 2020). L'analyse de l'état d'occupation du sol a montré une modification marquée des unités d'occupation du sol sur plusieurs années, avec une régression sensible de la plage, des formations végétales naturelles (forêt et savane) et une progression des formations anthropisées (mosaïques de cultures et jachère sous palmeraies, plantations et agglomérations) liée à la croissance démographique qui génère une pression foncière (Amoussou E, 2020).

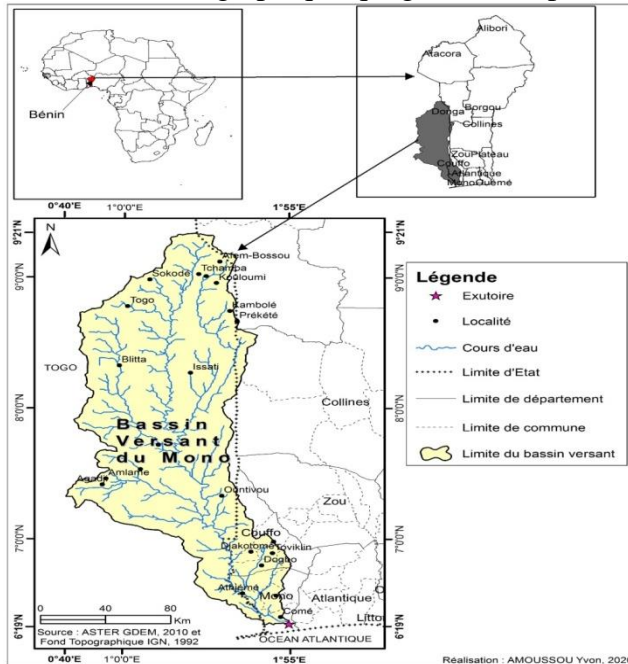
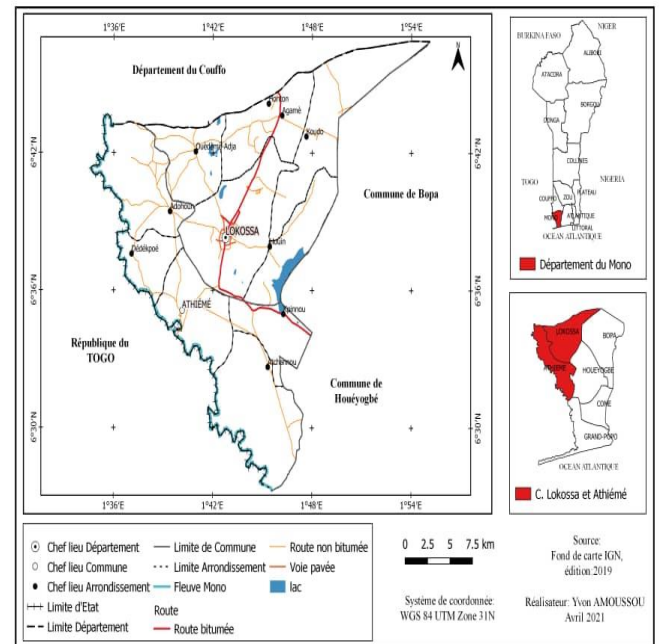


Figure 1 : Situation de la zone d'étude



### 1.2) Méthodologie

#### 1.2.1) Collecte des données climatiques

Les données climatiques ont été fournies par METEO BENIN sur la base des stations pluviométriques des villes choisies dans le cadre de l'étude. Ces données concernent les postes pluviométriques de Athiémé, Grand-popo, Lokossa et Bopa sur la période 1989-2009. La température, l'humidité de l'air et l'évapotranspiration des stations synoptiques de Cotonou et Bohicon. Ces données ont été recueillies à pas de temps journaliers, mensuels et annuels.

#### 1.2.2) Collecte des données épidémiologiques

La collecte des données épidémiologiques s'est faite en deux temps. Dans un premier temps, nous avons reçu les données épidémiologiques du ministère de la santé, puis nous avons recueilli sur le terrain les données à partir des interviews directs, semi-structurées et des enquêtes socio-économiques.

#### 1.2.3) Traitement des données climatiques et épidémiologiques

Les paramètres de tendance centrale et de dispersion (Moyenne et écart type) ont été utilisés à ce niveau et ont permis d’avoir des diagrammes illustratifs complétés par des taux d’affection de quelques années selon leur disponibilité..

### 1.2.4) Traitement du taux d’incidence

Le calcul du taux d’incidence est obtenu suivant la formule (Vaughan et Morrow, 1991) :

$$T.I = (\text{Effectif des malades} / \text{population totale}) * 100\ 000 \text{ habitants.}$$

Les données reçues sur le paludisme n’ont pas fourni les information sur les âge, son genre, son activité économique et sa provenance.

## 2) Résultats et discussions

### 2.1) Prédominance du paludisme et de l’onchocercose dans la zone sanitaire Lokossa-Athiémé

La moyenne du taux d’incidence moyen du paludisme dans la zone sanitaire d’Athiémé et de Lokossa est de 18 636 sur la période 2011-2021 pour une moyenne de population de 186 183 habitants dans la période avec un pic d’environ 28 272 cas en 2019.

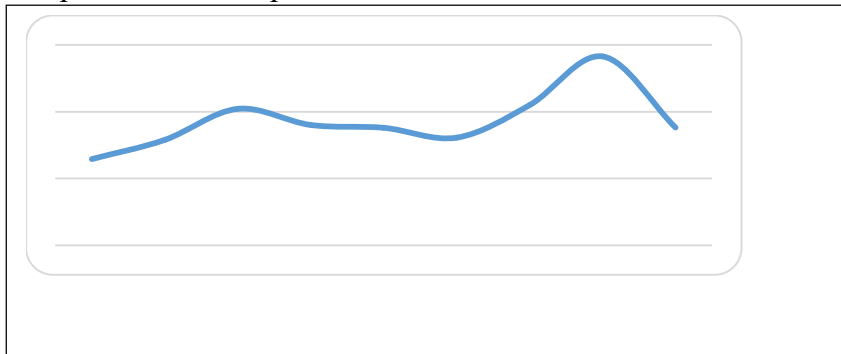


Figure 3. Evolution du taux de d’incidence annuel du paludisme dans la zone sanitaire de Lokossa et Athiémé (bassin du Mono)

En ce qui concerne l’onchocercose, le fond topographique utilisé ne prend pas en compte toutes les données géographiques relatif aux arrondissements présent dans la base de donnée de la coordination sanitaire Athiémé. Nous avons enjoint à la courbe un histogramme.

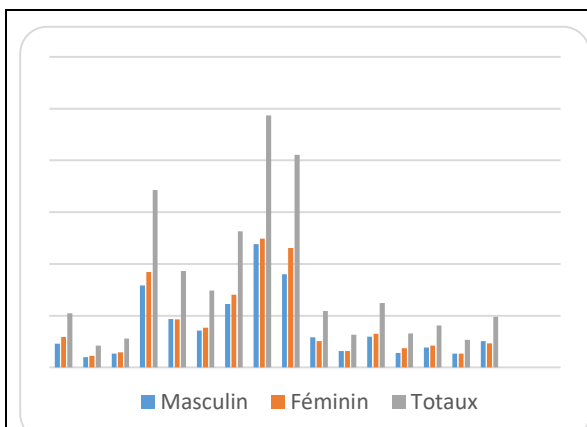


Figure 4 :Nombre d’individus affecté par l’onchocercose

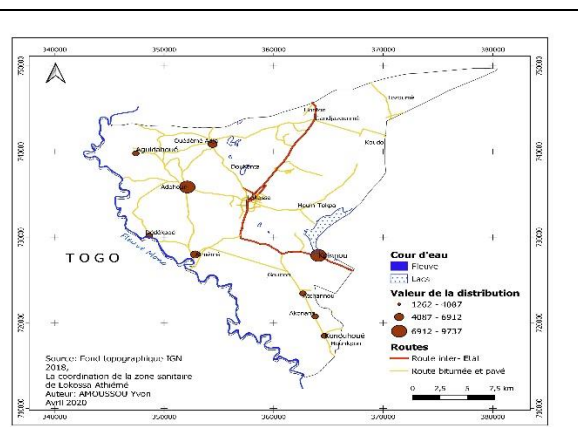


Figure 5 :Distribution spatiale de l’onchocercose à Athiémé et Lokossa

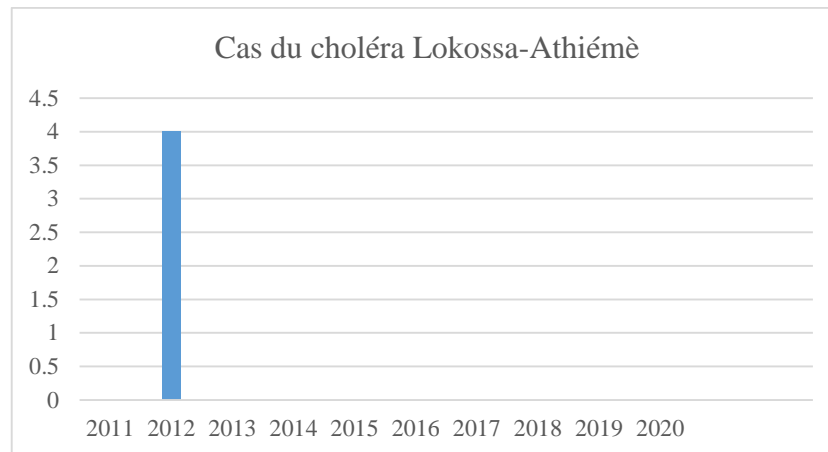


Figure 6. Prévalence du choléra dans la zone sanitaire Lokossa-Athiémé

A l'issue des enquêtes socio-économiques et interviews semi-directs, il a été noté que les communes de Adohoun, Kpinnouet Ouedeme-Adja sont les plus inondées et celle qui subissent le plus les maux comme le paludisme et de l'onchocercose surtout les femmes à cause de leur proximité avec les eaux des rivières où elles font la lessive et puisent de l'eau pour leur tâche ménagères. Les actions conjuguées des lâchers d'eau des bassins avec les précipitations engendrent les récurrentes inondations enregistrées dans la basse vallée du bassin versant avec la succession de maladie hydrique dont le paludisme, l'onchocercose, la parasitose intestinale et le choléra. Ces enquêtes nous ont permis d'identifier et classer des pathologies dans le bassin du Mono par saison. Ainsi on a

En saison pluvieuse

- La paludisme
- La candidose buccale
- La parasitose intestinale
- L'onchocercose

En saison sèche:

- Le rhume
- La toux
- Les crises asthmatiques
- Quelques infections
- Des morsures de reptiles
- Des problèmes diarrhéiques liés à la consommation d'eau impropre

## 2.2) Stratégies d'adaptation et maladies hydriques

La stratégie de lutte contre l'onchocercose ou cécité des rivières consiste en l'utilisation de l'Ivermerctine (comprimé) en fonction de la taille des individus pour prévenir cette maladie grave causant irréversiblement l'aveuglement. L'Ivermerctine **paralyse et tue les microfilaries, soulageant les démangeaisons intenses au niveau de la peau et stoppant la progression vers la cécité.** Les personnes infectées peuvent être traitées en une prise tous les douze mois. Il est nécessaire d'associer des corticoïdes au traitement pour limiter les réactions inflammatoires induites par la mort des microfilaries. Notons aussi que la commune est frappée en cas de grande inondation comme ce fut le cas en 2017. Cette situation dénote une insuffisance de suivi des mesures préventive. La lutte contre l'onchocercose au niveau environnemental



consiste à tuer les larves à l'aide d'insecticides, notamment par la dispersion d'insecticides sur les rivières et ruisseaux. Il faudrait à cet effet assainir le cadre de vie des populations tout en renforçant les mesures préventives. Contre le paludisme, il y a un comité de suivi à domicile pour prise en charge des enfants de 0 à 5 ans qui souffrent du paludisme dans la commune de Bopa, ce qui réduit considérablement la prévalence chez les enfants et les femmes dans cette zone. Des formations sur l'hygiène et l'assainissement sont dispensés aux femmes pour la lutte contre le paludisme et d'autres pathologies liés à l'eau. Ces deux solutions doivent être développées en plus de l'épandage d'insecticide chimique comme les pyréthriinoïdes efficace et moins toxique dans les communes de Athiémé et Lokossa où les populations en particulier les femmes et les animaux domestiques sont vulnérables surtout à l'onchocercose. Les mesures d'hygiène générale comme le **lavage systématique des mains, le traitement des eaux usées**, la construction de latrines dans les zones de regroupement humains isolées des points d'eau ont permis de réduire la prévalence de cette maladie dans le Mono.

## Conclusion

Cette étude met bien en relief le poids des paramètres climatiques et des crues dans la l'apparition et la diffusion des maladies hydrique. En effet, en saison de pluies l'apparition des maladies s'explique certes par la stagnation de l'eau de pluie ou l'augmentation du niveau du fleuve, mais surtout par la forte anthropisation du milieu naturel. Cependant, les résultats montrent qu'il faut prévoir les investigations très poussées en direction de quelques secteurs-cibles pour une meilleure adaptation parties prenante dans la gestion des pathologies.

## Bibliographie

- Aoussou E., 2010 : Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest) Thèse de doctorat. Université de Bourgogne Centre de Recherches de Climatologie CNRS - UMR 5210, 311 p
- Aoussou Y., 2019: Dynamique du trait de côte béninois à l'Est du chenal de Cotonou entre 1986 et 2018. Actes de la Conférence scientifique internationale : Des images satellites pour la gestion durable des territoires en Afrique, p357-375
- Aoussou Y., 2020: Apport de l'occupation du sol et des techniques statistiques à la caractérisation des risques hydroclimatiques dans le bassin versant béninois du mono, Revue Togolaise des Sciences Publication semestrielle Institut National de la Recherche Scientifique (INRS) BP 2240 LOME – TOGO,, p213-222
- Atiyè E., 2017 : Caractérisation des risques hydro-climatiques dans le bassin versant béninois du fleuve mono à l'exutoire d'Atiémé, Thèse de doctorat. Université d'Abomey-Calavi 254 p.
- Simonet C., 2012: Changement climatique, chocs pluviométriques et sécurité alimentaire : essais sur l'usage de l'information climatique en économie du développement. Thèse de doctorat. Université d'Auvergne - Clermont- Ferrand I, 2012. Français 182p.
- Vissin E., 2007: Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de doctorat. Université de Bourgogne Centre de Recherches de Climatologie CNRS - UMR 5210, 310p
- GIEC, 2014 : Changements climatiques 2014, incidences, adaptation et vulnérabilité, 40p
- Diobo K., 2012: Environnement et activités économiques dans l'émergence et l'évolution spatiale de l'Ulcère de buruli: cas du département de Daloa. Institut de Géographie Tropicale, thèse de doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan-Cocody, 195 p.
- Vaughan et Morrow, 1991 : Manuel d'épidémiologie pour la gestion de la santé au niveau du district, 195p
- Yaméogo L. *et al*, 2003 : Trente ans de lutte contre l'onchocercose en Afrique de l'Ouest. Traitement larvicide et protection de l'environnement. OpenEditionBook, 197p.

## DYNAMIQUE DES SAISONS CULTURALES DANS LA ZONE À CLIMAT TROPICAL GUINÉEN DU SUD-TOGO DE 1980 À 2018

\*Badameli PyaloAtina<sup>1</sup>, Lemou Faya<sup>2</sup>, Panesse Paalamwé<sup>1</sup>, Kadouza Padabo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pôle de Recherche et d'Expertise sur la Dynamique des Espaces et des Sociétés (PREDES)

Département de Géographie- Université de Kara

Email : [at.pyalo@gmail.com](mailto:at.pyalo@gmail.com), [at\\_pyalo@yahoo.fr](mailto:at_pyalo@yahoo.fr)

[jeanpanesse@gmail.com](mailto:jeanpanesse@gmail.com)

[kadouza@yahoo.fr](mailto:kadouza@yahoo.fr)

<sup>2</sup>Laboratoire de Recherches Biogéographiques et Environnementales (LaRBE)

Département de Géographie- Université de Lomé

Email : [tchalike@gmail.com](mailto:tchalike@gmail.com)

**Résumé :** *En dehors de la croissance des températures, le changement climatique se manifeste en Afrique par une tendance à la baisse de la pluviométrie annuelle et un rétrécissement progressif des saisons culturales, depuis la fin de la décennie 1970-1979. Le Sud-Togo, sous climat tropical guinéen ne se soustrait pas à ce changement global. Dans cette région, la production agricole fortement dépendante du facteur pluie était ainsi fragilisée par la modification du calendrier agricole. Face à cette situation, l'étude de la dynamique des saisons culturales est nécessaire pour orienter la pratique agricole.*

*L'objectif de cette contribution est donc d'analyser l'évolution des saisons culturales dans la zone à climat tropical guinéen du Togo, sur une période plus récente (1980-2018) en vue du suivi du calendrier agricole.*

*Les données journalières de pluie des stations de Lomé et de Tabligbo, sur la période de 1980 à 2018 sont les principales utilisées. Elles sont traitées pour déterminer la longueur des saisons culturales en utilisant la méthode d'Awesso et Sivakumar (1996), modifiée par Adewi et al. (2010). Cette méthode a permis de définir le début et la fin de la saison culturelle, puis d'évaluer sa durée.*

*Les résultats obtenus montrent un allongement de la durée des saisons culturales au fil du temps, ce qui dénote un regain de la pluviométrie sur la période d'étude. La péjoration pluviométrique précédente semble donc s'estomper progressivement.*

**Mots-clés :** *Variabilité pluviométrique, dynamique des saisons culturales, changement climatique, climat tropical guinéen, Sud-Togo.*

**Abstract :** *Apart from the increase in temperatures, climate change is manifested in Africa by a downward trend in annual rainfall and a gradual narrowing of the growing seasons, since the end of the decade 1970-1979. South Togo, under a tropical Guinean climate, is not immune to this global change. In this region, agricultural production highly dependent on the rain factor was thus weakened by the modification of the agricultural calendar. Faced with this situation, the study of the dynamics of the growing seasons is necessary to guide agricultural practice.*

*The objective of this contribution is therefore to analyze the evolution of the growing seasons in the Guinean tropical climate zone of Togo, over a more recent period (1980-2018) with a view to monitoring rainfall trends.*

*The daily rainfall data from Lomé and Tabligbo stations, over the period from 1980 to 2018 are the main ones used. They are processed to determine the length of the growing seasons using the method of Awesso and Sivakumar (1996), modified by Adewi et al. (2010). This method made it possible to define the start and end of the growing season, and then to assess its duration.*

*The results obtained show an increase in the length of the growing seasons over time, which indicates an increase in rainfall over the study period. The previous rainfall decline therefore seems to be gradually fading.*

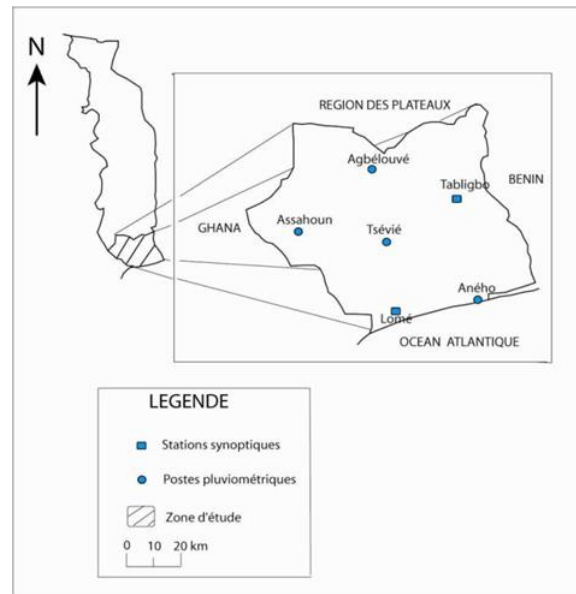
### Introduction

L'étude de la variabilité climatique et son impact sur les activités humaines, concerne souvent les paramètres de température et de pluviométrie. Mais, dans le domaine tropical, c'est la pluviométrie qui fluctue le plus ; les températures étant peu variables au cours de l'année. L'analyse des tendances pluviométriques est donc capitale pour une meilleure planification à long terme. Une précédente étude, menée par Badameli et Kadouza (2019), a déterminé la dynamique des saisons culturales des stations à climat tropical soudanien au Togo. Ces stations ont connu un léger prolongement de la durée des saisons culturales. La présente étude se concentre sur l'extrême sud du pays. Elle analyse l'évolution des saisons culturales dans la partie méridionale de la zone à climat tropical guinéen du Togo.

Une tendance déficitaire généralisée des précipitations a été constatée en Afrique occidentale depuis les années 1970 (J. Sircoulon, 1986 ; J.P. Carbonnel et P. Hubert, 1992 ; E. Servat et al., 1995...). Le Togo, faisant partie de cette région, connaît naturellement la même situation, avec pour particularité le dérèglement du calendrier agricole (K.S.M. Badameli, 1996 ; P. Aawi, 2010 ; E. Adewi, 2012 ; F. Lemou, 2014). Ainsi, à travers une analyse des paramètres climatiques et de leurs impacts sur l'activité agricole dans le monde rural togolais, E. Adewi (2012), a abouti à deux conclusions. De son étude, il ressort d'une part que la crise pluviométrique sévit depuis

les années 1970 et d'autre part, qu'elle a des répercussions négatives sur les différentes cultures vivrières.

La zone d'étude, située dans le Sud-Togo (figure 1), entre l'Océan Atlantique au Sud, le Bénin à l'Est, la région des plateaux au Nord et le Ghana à l'Ouest, n'est plus en marge de ce bouleversement.



**Figure 1** : Carte de localisation de la zone d'étude

La question de recherche est alors de savoir si cette tendance au rétrécissement des saisons culturales est continue depuis la période de péjoration pluviométrique (1970-1980) jusqu'aux dernières années au Sud-Togo.

L'objectif de l'étude est d'analyser les saisons culturales dans la zone d'étude entre 1980 et 2018, afin de voir la tendance actuelle de leur évolution.

## **1. Données et méthodes**

### **1.1- Les données**

Pour cette étude, les données utilisées sont celles de la pluviométrie journalière des stations synoptiques de Lomé et de Tabligbo entre 1980 et 2018, obtenues à la Direction Générale de la Météorologie Nationale (DGMN) en 2019.

Les données bibliographiques ont également été utiles pour le point des connaissances sur la problématique traitée dans les autres régions du Togo. Les informations notées des études consultées ont servi de base théorique à la discussion des résultats.

### **1.2- Les méthodes**

Les calculs statistiques sont la principale méthode employée. Ils ont consisté en la détermination des dates de début et fin des saisons culturales, selon la méthode d'Awesso et Sivakumar (1996), modifiée par E. Adewi et al., en 2010 comme suit :

La grande saison pluvieuse commence dès qu'on enregistre, à partir de mars, une hauteur pluviométrique de 20 mm sur 2 jours consécutifs non suivis pendant les 20 jours suivants par une séquence sèche de plus de 7 jours car au-delà de 7 jours, les plantes cultivées commencent à accuser le manque d'eau. La période de 20 jours est une période de contrôle qui permet de valider le démarrage effectif de la saison.

La date de fin des pluies est, quant à elle, celle à partir de laquelle on enregistre moins d'un millimètre de pluie durant 2 jours consécutifs, et suivi d'une période d'au moins 6 jours sans pluies, ou quand leur total est inférieur à 10 mm à partir de la troisième décade de juin.

Cette méthode de détermination des dates de début et de fin des saisons culturelles est employée dans de nombreuses études dont celles de P.N. Kabore *et al.* (2017), E. Adewi *et al.*, (2010) ; S.H. Totin Vodounon *et al.*, (2019) ; L. Descroix *et al.*, (2015) ; A. Bodian *et al.*, (2016).

Dans cette étude, seule la grande saison des pluies a été déterminée.

La méthode des quartiles employée par E. Adewi *et al.*, 2010, a permis d'apprécier l'évolution des saisons culturelles. En effet, les dates de début et de fin des saisons culturelles sont classées en fonction des limites définies par le quartile inférieur (Q1), le quartile médian (la médiane ou Q2) et le quartile supérieur (Q3). Si les dates sont inférieures ou égales à la valeur limite du quartile inférieur, elles sont considérées comme précoces. Par contre, lorsqu'elles se trouvent supérieures ou égales à Q3, elles sont tardives. Enfin, lorsqu'elles sont situées entre Q1 et Q3, elles sont dites « moyennes ».

## 2- Résultats

Le traitement des données recueillies a donné des résultats révélateurs de l'occurrence des saisons culturelles dans la zone d'étude.

### 2.1- Début et fins de la grande saison culturelle à l'extrême sud du Togo

Les données du tableau I font ressortir que la grande saison culturelle débute principalement au cours du mois d'avril à Lomé comme à Tabligbo. Ainsi, le mois d'avril regroupe 67 % des dates de début de saison à Lomé et 63 % à Tabligbo. Le deuxième mois au cours duquel les pluies commencent est celui de mai.

**Tableau I** : Mois de début de grande saison culturelle dans les stations synoptiques du Sud-Togo de 1980 à 2018.

Mois	Lomé		Tabligbo	
	Mars	0	0	9
Avril	26	67 %	24	63 %
Mai	10	26 %	4	11 %
Juin	03	7 %	1	2 %

Source : Données de la DGMN, 2019

Les fins de grande saison culturelle, selon les données du tableau, sont essentiellement situées au cours du mois de juillet dans les deux stations (67 % à Lomé et 76 % à Tabligbo). Secondairement, la grande saison culturelle s'achève en juin.

**Tableau II** : Mois de fin de saison culturelle dans les stations synoptiques du Sud-Togo de 1980 à 2018

Mois	Lomé		Tabligbo	
	Juin	12	31 %	5
Juillet	26	67 %	29	76 %
Août	1	2 %	4	11 %

Source : Données de la DGMN, 2019

Le classement des dates de début et fins de la grande saison culturelle en fonction des quartiles, a permis de déterminer avec précision, les dates précoces, moyennes et tardives comme le montrent les données des tableaux III à VI.

**Tableau III** : Dates précoces, moyennes et tardives de début de grande saison culturale par décennie à Lomé

Décennie	Date de début précoce	Date de début moyenne	Date de début tardive
1980-1989	20-avr	06-mai	20-mai
1990-1999	08-avr	18-avr	22-avr
2000-2009	14-avr	16-avr	30-avr
2010-2018	03-avr	20-avr	28-avr

Source : Données de la DGMN, 2019

Les saisons commencent précocement au cours des deux premières décades d'avril, en moyenne dans la deuxième décade et tardivement au cours de la dernière décade du mois d'avril à Lomé (tableau III).

**Tableau IV** : Dates précoces, moyennes et tardives de début de saison culturale par décennie à Tabligbo

Décennie	Date de début précoce	Date de début moyenne	Date de début tardive
1980-1989	05-avr	19-avr	26-avr
1990-1999	31-mars	10-avr	20-avr
2000-2009	04-avr	10-avr	24-avr
2010-2018	26-mars	15-avr	25-avr

Source : Données de la DGMN, 2019

A Tabligbo, le début de la grande saison culturale se situe, précocement, de la troisième décade de mars à la première décade d'avril. En situation moyenne et tardive, ce début se situe respectivement dans la deuxième et la troisième décade du mois d'avril (tableau IV). Les saisons culturales commencent donc plus tôt à Tabligbo qu'à Lomé.

Il ressort que les saisons culturales ont été marquées par un démarrage relativement précoce au cours des deux dernières décennies de la période d'étude.

Les fins de ces saisons sont illustrées par les tableaux V et VI.

**Tableau V** : Dates précoces, moyennes et tardives de fin de saison culturale par décennie à Lomé

Décennie	Date de fin précoce	Date de fin moyenne	Date de fin tardive
1980-1989	21-juin	11-juillet	17-juillet
1990-1999	30-juin	11-juillet	20-juillet
2000-2009	02-juillet	11-juillet	19-juillet
2010-2018	23-juin	16-juillet	17-juillet

Source : Données de la DGMN, 2019

Les fins de grande saison culturale à Lomé se situent précocement au cours de la dernière décade de juin, en moyenne au cours de la deuxième décade de juillet et tardivement pendant la troisième décade du mois de juillet (tableau V).

Pour la station de Tabligbo, la saison culturale s'achève au plus tôt et en moyenne au cours de la deuxième décade de juillet, et tardivement au cours de la troisième décade du mois de juillet (tableau VI).

**Tableau VI** : Dates précoces, moyennes et tardives de fin de saison culturale par décennie à Tabligbo

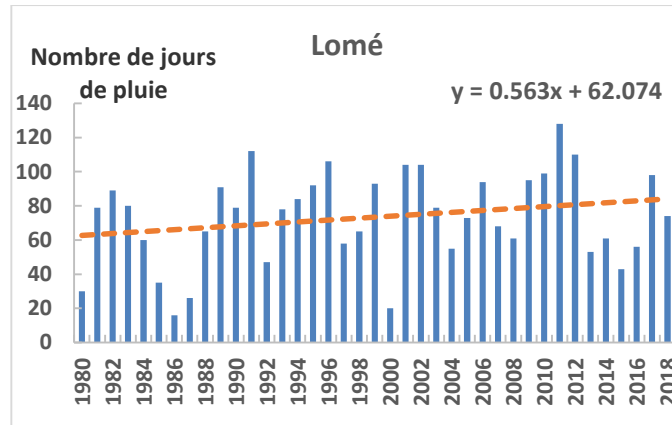
Décennie	Date de fin précoce	Date de fin moyenne	Date de fin tardive
1980-89	30-juin	14-juil	20-juil
1990-99	12-juil	17-juil	20-juil
2000-09	10-juil	21-juil	31-juil
2010-2018	14-juil	18-juil	23-juil

Source : Données de la DGMN, 2019

Les fins de saison dans les deux stations sont assez proches et varient peu dans le temps. Les débuts de saison sont plus instables que les fins de saisons culturales. La dynamique des débuts et fins de saisons culturales débouche sur l'analyse de leur durée.

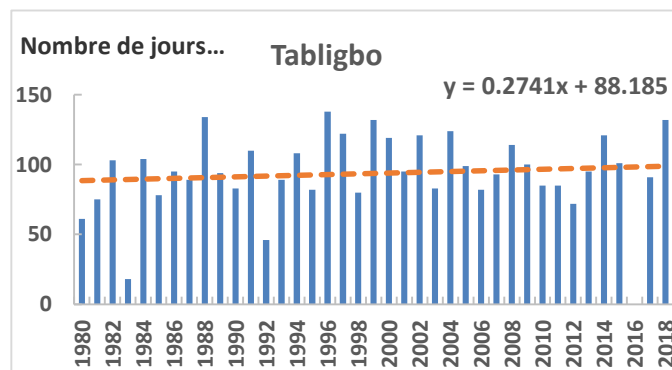
## 2.2- Evolution de la durée des saisons culturales dans l'extrême Sud-Togo

Un autre paramètre qui permet de caractériser la dynamique des saisons culturales est leur durée. Celle-ci est déterminée par le nombre de jours séparant le début et la fin de la saison.



**Figure 2 :** Evolution interannuelle de la durée des saisons culturales dans la station de Lomé de 1980 à 2018  
**Source :** Données de la DGMN, 2019

Avec une moyenne de 73,3 jours, la durée de la saison culturale à Lomé évolue en dents de scie au fil du temps (figure 2). Il se dégage néanmoins une tendance à la hausse sur la période d'étude, comme le montre le signe positif du coefficient de régression de la droite de tendance (0,563). Les durées de saison culturale les plus considérables se situent principalement à partir des années 1990. La tendance ne diffère pas à Tabligbo.



**Figure 3:** Evolution interannuelle de la durée des saisons culturales dans la station de Tabligbo de 1980 à 2018.  
**Source :** Données de la DGMN, 2019

La durée moyenne de la saison culturale est de 93,7 jours à Tabligbo. La tendance générale est à la hausse également mais plus modérée qu'à Lomé. A partir de la fin des années 1990, les saisons culturales durent plus de 100 jours, ce qui dénote d'une embellie pluviométrique.

La saison culturale est donc plus étendue à Tabligbo qu'à Lomé, ce qui confirme que le climat de Tabligbo est plus humide que celui de Lomé. La position de Lomé sur le littoral aurait dû lui assurer un climat plus humide, mais à cause de l'anomalie climatique du golfe de Guinée, elle est peu arrosée par rapport aux autres stations du pays.

## 3. Discussion

Contrairement aux années 1970 et 1980 qui ont connu une péjoration pluviométrique (K.S.M. Badameli, 1996, E. Adewi et al., 2010...), les années 1990 et 2000 voient revenir une

pluviométrie acceptable et même importante, avec une meilleure distribution des pluies au cours de la saison culturale.

L. Descroix et *al.* (2015), ont trouvé des résultats semblables dans leur étude lorsqu'ils écrivent que : « les dates de début de la saison des pluies sont redevenues bien plus précoces avec le retour des pluies dès la fin des années 1990 ; les dates de fin de mousson ont moins évolué. Cependant, on note une nette augmentation de la durée de la mousson ».

Les débuts et fins de saisons culturales relevés dans la présente étude viennent confirmer les résultats de E. Adewi et *al.* qui avaient travaillé sur les données de 1950 à 2000. Selon eux, la grande saison pluvieuse potentiellement utile débute en moyenne en avril au sud-Togo (précisément entre le 12 et le 25 avril). Les mêmes auteurs ont trouvé, comme la présente étude, que : « en domaine subéquatorial, le mois de juillet marque généralement la fin de la grande saison culturale. L'évolution temporelle des dates de fin de saison atteste de la relative stabilité de fin de la grande Saison des Pluies Potentiellement Utile (SPPU) au Sud-Togo ». La durée de la saison culturale varie entre 5 et 9 décades selon E. Adewi et *al.*

Mais cette étude montre qu'au-delà des années 2000, les durées de saison culturale sont plus importantes, situées entre 5 et 13 décades à Lomé comme à Tabligbo.

## CONCLUSION

La saison culturale à l'extrême sud du Togo a évolué dans le temps, du point de vue de sa date de début et de sa durée. Ainsi, les décennies récentes ont connu un début précoce, tandis que la fin est restée assez stable, d'où une augmentation de la durée de la saison culturale. Cette nouvelle situation fait suite à la péjoration pluviométrique des années 1970-1980. Elle devrait favoriser une amélioration de la production agricole avec des saisons culturales assez longues pour le développement des végétaux, à condition que les autres facteurs soient favorables.

## Références bibliographiques

- AAWI P., 2010 : *Ethnoclimatologie comme une nouvelle approche de l'étude des faits climatologiques et agricoles au Togo : Cas du pays Kabyè*, Thèse de Doctorat unique de Géographie, Université de Lomé, 304 p.
- ADEWI E., 2012 : *Les stratégies agricoles de gestion de la péjoration pluviométrique au Togo*, Thèse de Doctorat unique de Géographie, Université de Lomé, 319 p.
- ADEWI E., BADAMELI K.S.M. et DUBREUIL V., 2011 : Evolution des saisons des pluies potentiellement utiles au Togo de 1950 à 2000, *Climatologie, Volume 7*, Aix en Provence, pp : 89-107.
- AWESSO, TELOUH et SIVAKUMAR M.V.K., 1996 : Analyse pluviométrique du Togo pour une planification à long terme. *Compte rendu des travaux n°6, Division des sols et Agroclimatologie*, Niamey, Niger : Centre sahélien de l'ICRISAT, 157 p.
- BADAMELI K.S.M., 1996 : *La variabilité climatique et la production agricole au Togo*, Thèse de doctorat de l'Université Michel de Montaigne, Bordeaux III, 366 p.
- BODIAN A., NDIAYEO. & DACOSTA H., 2016 : Evolution des caractéristiques des pluies journalières dans le bassin versant du fleuve Sénégal: Avant et après rupture, *Hydrological Sciences Journal*, 61:5, 905-913, DOI: 10.1080/02626667.2014.950584.
- CARBONNEL J. P., HUBERT P., 1992 : Pluviométrie en Afrique de l'ouest soudano-sahélienne : Remise en cause de la stationnarité des séries, In *l'aridité : une contrainte au développement*, Editions ORSTOM, pp : 37-51.
- DESCROIX L., DIONGUE NIANG A., PANTHOU G., BODIAN A., SANE Y., DACOSTA H., MALAM ABDOU M., VANDERVAERE J.-P., QUANTIN G., 2015 : Evolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'ouest à travers deux régions : la Sénégambie et le bassin du Niger moyen, *Climatologie*, vol. 12 (2015), pages 25-43.
- LEMOU F., 2014 : *Dynamique climatique et production agricole dans la Région de la Kara, Nord-Togo*, Thèse de Doctorat Unique de Géographie de l'Université de Lomé, 305 p.
- SERVAT E., PATUREL J. B., BOYER J. F., LUBES H., et MASSON J. M., 1995 : La sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne (Côte d'Ivoire, Togo, Bénin). *Sécheresse*, vol. 6 n°1, pp : 95-102.
- SIRCOULON J., 1986 : La sécheresse en Afrique de l'Ouest, Comparaison des années 1982-1984 avec les années 1972-1973, *Cahiers hydrologiques vol XXI, N°4* ORSTOM, pp : -75-92, Bondy.
- TOTIN VODOUNON S. H., DOTSEVI D. A., AMOUSSOU E., YABI I., HOUNDENOU C., 2019: Variabilité et risques agro-climatiques dans le sud-ouest de la région des Plateaux au Togo, Actes du 32<sup>ème</sup> colloque de l'AIC.

## LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE CONTEMPORAIN AU MAROC ET SES ASPECTS SPATIO-TEMPORELS

Bahou Abdellaziz,

Laboratoire Seshul, Ens, Université Mohammed V de Rabat, [a.bahou@um5r.ac.ma](mailto:a.bahou@um5r.ac.ma)

### Résumé :

*Le Maroc, vu sa position géographique et latitudinale, à la charnière des latitudes tropicales et tempérées, est parmi les pays les plus exposés au changement et à la variabilité climatique bien pour les précipitations que pour les températures. Mais l'intensité de cette variabilité diffère selon les années, les saisons et les mois. Elle est soumise également aux contrastes spatiaux selon les grandes régions du pays sous l'effet des facteurs géographiques.*

*Effectivement, l'analyse de l'évolution contemporaine des températures entre 1960 et 2020 révèle que le Maroc connaît au cours des trois dernières décennies une nette augmentation des températures moyennes de 0.2 à 1.5°C. Il en résulte qu'à l'instar du monde entier notre pays est confronté depuis la fin des années quatre-vingt du 20<sup>ème</sup> siècle au réchauffement climatique dont l'intensité reste néanmoins bien différente selon les années, les saisons et les contrées géographiques du pays.*

*La présente communication est destinée à l'analyse de l'évolution contemporaine des températures dans les diverses stations météorologiques du Maroc, d'abord pour mettre en évidence ce réchauffement climatique, puis pour quantifier son ampleur et pour faire ressortir ses caractéristiques spatio-temporelles aux divers pas de temps, annuel, saisonnier et mensuel.*

**Mots-clés :** Maroc, évolution des températures, réchauffement, aspects spatio-temporels.

### Abstract:

*Morocco, given its geographical and latitudinal position, at the hinge of tropical and temperate latitudes, is among the countries most exposed to climate change and variability, both for precipitation and for the temperatures. But the intensity of this variability differs across years, seasons and months. It is also subject to spatial contrasts according to the major regions of the country under the effect of geographical factors.*

*Indeed, the analysis of the contemporary evolution of temperatures between 1960 and 2020 reveals that Morocco has experienced a marked increase in average temperatures of 2 to 3 °C over the past three decades. The result is that, like the whole world, our country has been confronted since the mid-eighties of the 20th century with global warming, the intensity of which nevertheless remains very different according to the years, the seasons and the geographical regions of the country. .*

*This communication is intended for the analysis of the contemporary evolution of temperatures in the various meteorological stations of Morocco, first to highlight this global warming, then to quantify its magnitude and to highlight its spatio-temporal characteristics at various time steps, annual, seasonal and monthly.*

**Keywords:** Morocco, temperatures, global warming, spatio-temporal aspects.

## 1 - Introduction :

Le changement et la variabilité sont les principales composantes (Tolika K., 2019, 9) qui régissent l'évolution, la dynamique et l'équilibre du système climatique de la Terre (OMM, 2011, 4). Les climats mondiaux évoluent perpétuellement et subissent de grandes fluctuations. Toutes les échelles de temps confirment ce changement climatique. Toutefois celui-ci s'est accentué depuis les années 70 et 80 qui marquent un grand tournant dans l'histoire climatique de la Terre (Amraoui L., 2013). Il pourra même, d'après de nombreux scénarios, s'intensifier plus au 21<sup>ème</sup> siècle, ce qui entraînera des changements radicaux dans les climats.

Le Maroc, vu sa position latitudinale entre le 21° et le 36° parallèle, à la charnière des deux grandes zones climatiques tropicale et tempérée, est l'un des pays les plus exposés au changement climatique. Il en résulte que notre pays est confronté au cours des dernières décennies au réchauffement qui engendre des répercussions économiques, sociales et environnementales.

Dans ce contexte, l'étude du réchauffement climatique est devenue l'une des préoccupations majeures au Maroc. Toutefois, les études du climat thermique sont peu nombreuses, elles se limitent à deux études seulement ; l'une traite le climat thermique du Maroc atlantique (Bellichi, A., 1983), l'autre s'intéresse au climat de l'Orient (Addouk N., 1995). D'autre part, les études consacrées au réchauffement climatique abordent souvent ce sujet d'une façon générale et s'occupent particulièrement aux scénarios de son évolution future pendant le 21<sup>ème</sup> siècle.

Ainsi notre contribution s'oriente plutôt pour faire une analyse minutieuse sur l'évolution des températures entre 1960-2020. Le but est de mettre en évidence les aspects et les caractéristiques spatio-temporels du réchauffement contemporain au Maroc.

## 2 – Localisation géographique et présentation des stations étudiées :



Pour mener une étude géographique sur le réchauffement climatique, nous avons choisis onze stations météorologiques, bien réparties sur le territoire marocain, (fig.1).

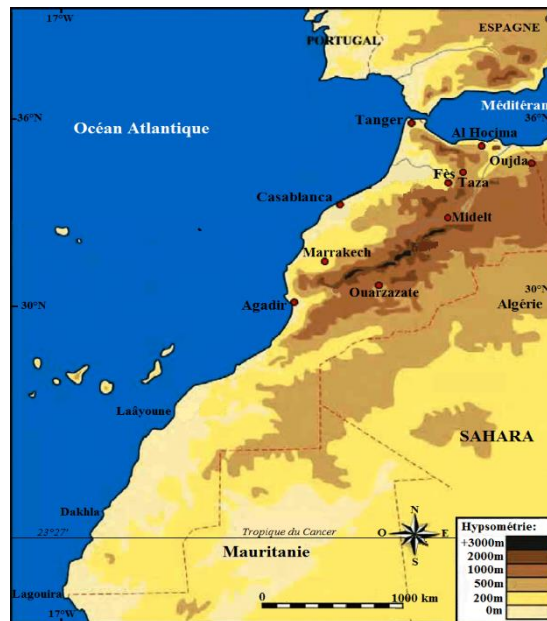


Fig.1 – Localisation et répartition géographique des stations étudiées

Ce sont des stations météorologiques implantées, depuis les années cinquante et soixante, dans de grands aéroports. Elles sont gérées par des techniciens qualifiés et spécialisés de la Direction Générale de la Météorologie Nationale du Maroc. Ces stations disposent généralement des séries relativement longues et continues pour une durée de 60 ans (TAB. 1).

TAB. 1- Caractéristiques géographiques des stations étudiées

STATIONS	ALTITUDE (M)	LONGITUDE	LATITUDE	PERIODE	REGIONS GEOGRAPHIQUES
TANGER	14	5°49' W	35°47'N	1960-2020	RIF OCCIDENTAL (EXTREME NORD-OUEST)
ALHOCIMA	14	3°50'W	35°11'N	1963-2020	COTE MEDITERRANEENNE (RIF)
FES-SAISS	415	5°00'W	34°02'N	1960-2020	PLATEAU DE SAISS
OUIDA	478	1°57'W	34°48'N	1960-2020	L'ORIENTAL (NORD-EST MAROCAIN)
TAZA	509	4°12'W	34°22'N	1964-2020	COULOIR MOYEN ATLAS-RIF ORIENTAL
CASA-ANFA	57	7°39'W	33°35'N	1960-2020	COTE NORD MAROC ATLANTIQUE (CHAOUIA)
MARRAKECH	466	8°02'W	31°37'N	1960-2020	PLAINE DE HAOUZ (TENSIFT)
SAFI	15	9°15'W	32°18'N	1960-2020	COTE SUD MAROC ATLANTIQUE (ABDA)
MIDELT	1515	4°44'W	32°41'N	1960-2020	HAUT MOULOUYA (VERSANT NORD HAUT ATLAS)
AGADIR	22	9°34'W	30°23'N	1960-2020	PLAINE DE SOUSS-MASSA
OUARZAZAT E	1136	6°54'W	30°56'N	1963-2020	SUD-EST MAROCAIN (VERSANT SUD HAUT ATLAS)

**SOURCE : DIRECTION GENERALE METEOROLOGIE MAROC(2020)**

### 3 – Données et méthodes utilisées :

Les données utilisées dans cette étude sont les températures moyennes. Les séries des données obtenues sont : les températures mensuelles moyennes ( $T_m$ ), les températures minimales moyennes ( $T_n$ ) et les températures maximales moyennes ( $T_x$ ).

Nous sommes basés pour l'analyse de ces trois séries de températures sur les directives de l'OMM (OMM, 2017, 12) et sur les méthodes statistiques simples et couramment utilisées (Grisollet H. et al, 1962, 106). Ainsi nous avons calculé d'abord, dans une première étape, les moyennes générales de ces trois variables afin de les utiliser comme référence. Dans une deuxième étape, et afin de quantifier

l'ampleur du réchauffement, nous avons procédé au calcul de l'écart à la moyenne de référence pour tous les variables de chaque série. La méthode utilisée est la suivante :  $(x_i - \bar{x})$ , dont  $(x_i)$  représente les données des températures annuelles ou mensuelles et  $(\bar{x})$  est la moyenne générale, annuelle ou mensuelle, calculée sur la période 1960-2020.

#### 4 – Résultats et discussion :

L'analyse minutieuse de l'évolution des températures au Maroc, entre 1960-2020, révèle que le climat marocain présente une tendance générale à l'augmentation des températures moyennes, maximales et minimales. Cette augmentation est estimée pour l'ensemble du territoire national entre 0,2 est 1,5°C. Ces résultats corroborent et confirment ceux déjà issus de plusieurs études, comme celle menée par la Direction de la Météorologie Nationale (Ministère Délégué auprès du Ministre de l'Energie, Chargé de l'Environnement Maroc, 2016, 126) et d'une autre étude (Ait Brahim Y. et al, 2017), ainsi que les résultats de plusieurs travaux minutieux en climatologie (Karrouk M-S, 2011) et (Amraoui L., 2013, 77-116). Ce réchauffement climatique observé au Maroc est en liaison avec le réchauffement global survenu sur toute la Terre depuis les années quatre-vingt.

Toutefois, ce réchauffement climatique au Maroc diffère aussi bien au niveau temporel, qu'au niveau spatial. D'où la nécessité d'analyser ses aspects spatiotemporels.

#### 4 - 1 – Un réchauffement climatique contrasté en intensité à l'échelle temporelle

L'intensité du réchauffement au Maroc (1991-2020) varie selon les années, les saisons et les mois.

##### A – Au niveau annuel :

L'évolution des températures annuelles au Maroc, durant la période 1960-2020, présente une forte variabilité interannuelle. A ce propos les valeurs des températures annuelles oscillent entre 16,4°C qui représente la température annuelle la plus basse enregistrée en 1972 et 19,8°C qui est la plus haute température annuelle enregistrée en 2017. Il est à signaler que celle-ci occupe le 1<sup>er</sup> rang parmi les années les plus chaudes au monde (WMO, 2019, 5).

Toutefois cette évolution chronologique des températures moyennes annuelles révèle la succession de deux grandes périodes thermiques bien distinctes (fig.2) et (fig.3):

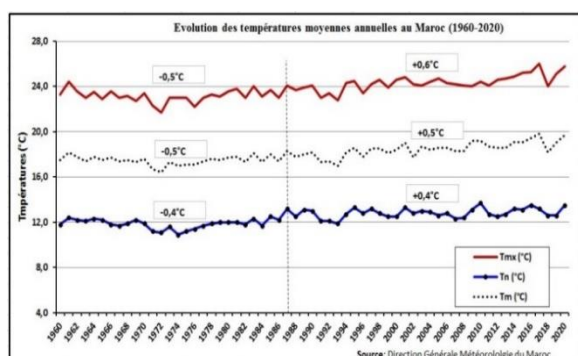


FIG.2 – Evolution des températures moyennes annuelles au Maroc (1960-2020)

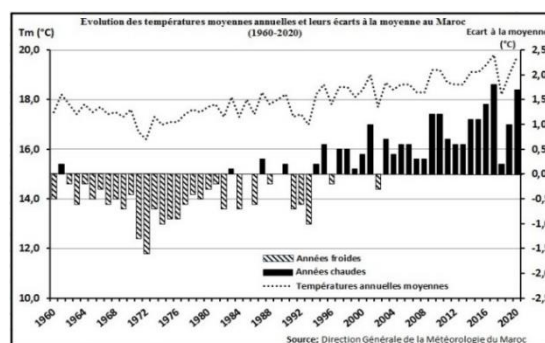


FIG.3 – Evolution de l'écart à la moyenne des températures annuelles au Maroc (1960-2020)

- Une période froide (1960-1990) : elle s'individualise par la baisse des températures pendant les années soixante et soixante-dix. Les valeurs des températures annuelles ont chuté de -0,5°C pour les températures maximales et pour les températures moyennes. Alors que les températures minimales ont diminué de -0,4°C (Fig.2).
- Une période chaude de 1991-2020, durant laquelle les températures ont grimpé progressivement depuis la fin des années quatre-vingt, notamment en 1990. Cette période est synchronisée au réchauffement global de la Terre. En effet, durant cette période le pays a enregistré 27 années consécutives chaudes, certaines affichent des températures record au Maroc et dans le monde. C'est

le cas par exemple des années suivantes : 2001 (GIEC, 2001, 2), 2009 (OMM, 2013, 3), 2010 (OMM, 2013, 3), 2014 (OMM, 2015, 4-7), 2015 (OMM, 2016, 5), 2016 (OMM, 2017, 5-6), 2017 (OMM, 2018, 5), 2019 (OMM, 2020, 6) et 2020(WMO, 2020, 6).

## B - Au niveau mensuel et saisonnier :

TAB. 2 – Ecart à la moyenne des températures mensuelles moyennes par stations (1960-2020)

STATIONS	PERIODES	JAN	FEV.	MAR	AVR.	MAI	JUI	JUIL.	AOU	SEP	OCT.	NOV.	DEC.
TANGER	1960-1990	0,0	-0,2	-0,3	-0,4	-0,6	-0,7	-0,5	-0,7	-0,2	-0,5	-0,2	-0,3
	1991-2020	0,0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	0,9	1,3	0,5	1,0	0,4	0,5
FES SAISS	1960-1990	-0,2	0,0	-0,5	-0,7	-0,8	-1,0	-0,6	-0,7	-0,2	-0,7	-0,3	-0,6
	1991-2020	0,3	0,0	1,1	1,4	1,6	2,0	1,3	1,5	0,4	1,3	0,6	1,1
AL HOCEIMA	1960-1990	0,0	0,2	0,2	-0,2	0,2	-0,3	-0,2	-0,2	0,1	0,1	-0,2	-0,3
	1991-2020	0,0	-0,2	0,3	0,4	0,6	0,5	0,5	0,4	0,0	0,3	0,1	0,5
TAZA	1960-1990	-0,1	-0,1	-0,5	-0,8	-1,0	-1,3	-1,2	-1,4	-0,4	-0,7	-0,3	-0,4
	1991-2020	0,1	0,1	1,0	1,5	1,9	2,5	2,4	2,7	0,8	1,4	0,5	0,8
OUJDA ANGAD	1960-1990	-0,3	-0,1	-0,6	-0,7	-0,8	-0,9	-0,7	-0,8	-0,3	-0,8	-0,1	-0,5
	1991-2020	0,6	0,1	1,2	1,5	1,7	1,8	1,5	1,6	0,6	1,7	0,2	1,1
CASA ANFA	1960-1990	-0,4	-0,2	-0,8	-0,9	-0,9	-0,7	-0,5	-0,6	-0,4	-0,7	-0,5	-0,1
	1991-2020	0,7	0,4	1,5	1,7	1,8	1,5	1,0	1,2	0,9	1,3	1,0	1,5
MARRAKECH	1960-1990	-0,3	-0,2	-0,6	-0,8	-0,9	-1,0	-0,4	-0,5	-0,2	-0,6	-0,4	-0,6
	1991-2020	0,6	0,4	1,3	1,7	1,7	2,1	0,7	1,1	0,4	1,2	0,8	1,2
SAFI	1960-1990	-0,4	-0,3	-0,8	-1,0	-1,0	-1,2	-0,7	-0,8	-0,3	-0,8	-0,5	-0,8
	1991-2020	0,8	0,7	1,7	2,1	2,1	2,5	1,4	1,6	0,6	1,6	0,9	1,6
MIDELT	1960-1990	-0,2	-0,1	-0,4	-0,9	-0,8	-1,1	-0,8	-0,6	-0,3	-0,6	-0,4	-0,6
	1991-2020	0,5	0,2	0,9	1,9	1,7	2,3	1,6	1,2	0,6	1,3	0,8	1,3
AGADIR	1960-1990	-0,1	-0,2	-0,6	-0,9	-0,9	-1,3	-1,1	-1,3	-0,7	-0,8	-0,3	-0,5
	1991-2020	0,3	0,3	1,2	1,8	1,8	2,7	2,2	2,6	1,5	1,6	0,6	1,0
OUARZAZATE	1960-1990	-0,2	-0,1	-0,6	-1,1	-1,1	-1,0	-1,0	-0,7	-0,7	-0,7	-0,6	-0,5
	1991-2020	0,4	0,2	1,1	2,0	1,9	1,8	1,8	1,3	1,3	1,3	1,1	0,9

Source : Direction Générale de la Météorologie du Maroc (2020)

D'après le tableau n°2, on constate que l'évolution des températures mensuelles reste identique à celle des températures annuelles. Dans la totalité des stations, les deux périodes : froide (1960-1990) et chaude (1991-2020) sont généralisées durant tous les mois. Toutefois, quelques nuances spatio-temporelles peuvent être dégagées (Tab. 2).

Pour la période froide, on constate qu'elle devient plus prononcée entre mars et octobre. Cela signifie que la diminution des températures mensuelles entre 1960-1990 a notamment touché les saisons du printemps, l'été et l'automne, et reste généralement faible en hiver.

D'autre part, on remarque également que le réchauffement au Maroc (1991-2020) est dû à l'augmentation des températures mensuelles des mois entre mars et octobre.

Il faut signaler également que si le réchauffement des trois saisons (printemps, été et automne) est généralement plus au moins faible dans le Nord et l'Ouest du pays (Tanger, Al Hoceima, Fès, Casablanca), il devient assez prononcé à l'Orient (Oujda, Midelt, Taza), au Maroc atlantique sud (Marrakech, Safi) et dans le sud marocain (Agadir, Ouarzazate).

### 4 - 1 – Un réchauffement généralisé dans tout le pays mais avec des nuances régionales

D'après la figure 4, traitant l'évolution interannuelle des températures moyennes annuelles entre 1960-2020, on conclue que toutes les régions affichent une évolution recrudescence des températures. D'où le réchauffement est généralisé dans tout le pays (Fig. 4).

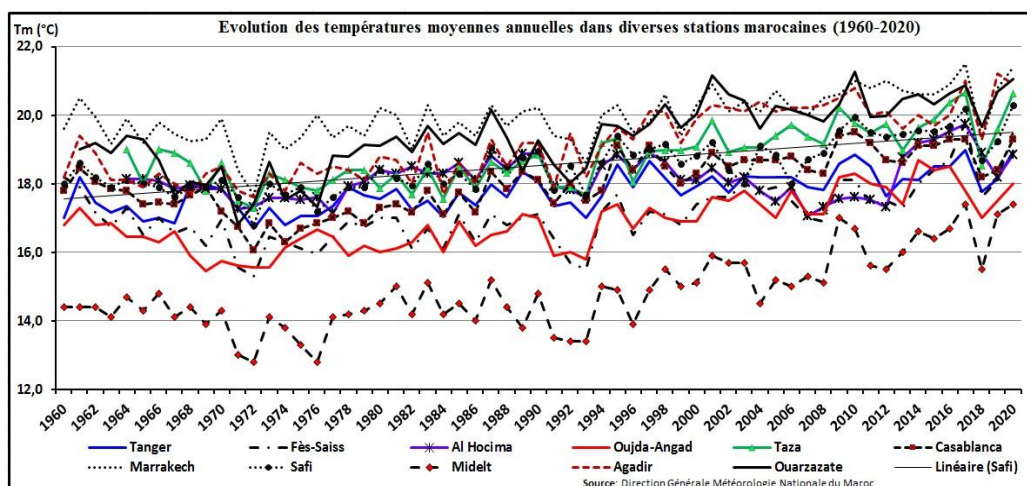


Fig. 4 – Evolution et tendance des températures moyennes mensuelles au Maroc (1960-2020)

Toutefois, l'intensité de ce réchauffement marquées des différenciations régionales sous l'effet des facteurs géographiques. Pour mettre en évidence ces nuances régionales, on a calculé les moyennes des températures annuelles de 1991-2020, puis on les a comparées avec celles de la période 1960-1990. Finalement on a classé les stations en trois catégories :

- Les stations à fort réchauffement, ce sont celles où le degré est supérieur à 1°C.
- Les stations à moyen réchauffement, si le degré est compris entre 0,5 et 1°C.
- Les stations à faible, dont le degré du réchauffement est inférieur à 0,5°C (TAB. 3).

TAB. 3 – Typologie des stations en fonction de degré de réchauffement (1991-2020)

A – RECHAUFFEMENT FAIBLE		B – RECHAUFFEMENT MOYEN		C – RECHAUFFEMENT FORT	
AL HOCEIMA	0,2°C	TANGER	0,6°C	OUJDA	1,1°C
SAFI	0,4°C	MARRAKEC	0,7°C	CASA-ANFA	1,2°C
-	-	FES-SAISS	0,8°C	MIDELT	1,3°C
-	-	TAZA	1,0°C	OUARZAZATE	1,3°C
-	-	-	-	AGADIR	1,5°C

Source : Typologie personnelle sur la base des données de la DMN (2020)

Généralement, les données du tableau n°3 représentent le degré du réchauffement climatique, permettent de distinguer trois grandes régions :

- Les régions caractérisées par un faible degré du réchauffement climatique ; il s'agit en particulier de la côte du Rif ouverte sur la Méditerranée et celle du Maroc atlantique sud (Safi).
- Les régions subissant un réchauffement moyen ; c'est le cas de la quasi-totalité des plaines et des plateaux atlantiques largement ouvertes aux influences maritimes et protégées par les montages de l'Atlas vis-à-vis des influences continentales et désertiques.
- Les régions exposées à un réchauffement fort, comme l'Oriental, du Sud-Est marocain à Draa-Tafilalt et le Sud-Ouest à Souss-Massa. Ce sont des régions pleinement ouvertes aux influences des masses d'air désertiques et tropicales.

Ces nuances régionales révèlent que, si le réchauffement est dû essentiellement aux facteurs cosmiques, planétaires et aérologiques, les facteurs géographiques jouent aussi un rôle prépondérant dans l'augmentation ou la diminution de l'intensité de ce réchauffement.

## 5 – Conclusion :

Cette étude présente des indications statistiques générales sur le réchauffement climatique survenu au Maroc entre 1990-2020. Il a touché tout le pays par la succession des années très chaudes, surtout

entre 2009 et 2020. Il a également touché tous les mois et toutes les saisons, mais par une intensité contrastée. Si aucune région n'est exceptée, ce sont les régions orientales et présahariennes dans le sud et le sud-est qui ont beaucoup souffert.

Toutefois cette étude ne prétend pas avoir cernée tous les côtés et tous les aspects de ce phénomène climatique compliqué. Une étude statistique descriptive plus détaillée intégrant un grand nombre de stations et reposant sur une analyse minutieuse des données des températures journalières, en utilisant des méthodes plus sophistiquées, doit être accomplie.

En outre, une étude dynamique reposant sur l'analyse des mécanismes atmosphériques qui sont à l'origine de ce phénomène doit être faite pour apporter des explications scientifiques, en dehors de la théorie générale de l'effet de serre. A ce propos, nous croyons qu'une analyse fréquentielle détaillée sur les régimes des masses d'air et des types de temps d'origine tropicale peut apporter des explications claires et satisfaisantes. Car le climat marocain et sa variabilité dépendent de la confrontation de deux régimes différents de masses d'air ; polaires et tropicales.

## 6 –Bibliographie :

- Addouk N., 1995 : *Les caractères thermiques du climat de l'est du Maroc*, Thèse Doctorat, l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 249 p.
- AitBrahim Y., Saïdi M.M., Kouraisb K., Sifeddinec A. et Bouchaoua L. 2017: Analysis of observed climate trends and high resolution scenarios for the 21st century in Morocco, *Journal of Materials and Environmental Sciences*, Volume 8, Issue 4, pp. 1375-1384.
- Amraoui L., 2013 : *Variabilités climatiques régionales et changement global : cas de l'évolution climatique récente au Maroc, en Mauritanie et sur leur proche océan*, Thèse de Doctorat en Géographie aménagement, Université Jean Moulin, Lyon III, 312p.
- Bellichi, A., 1983 : *Les Climats thermiques du Maroc Nord-Occidental*, Doctorat 3<sup>ème</sup> cycle en Géographie, Université Aix-Marseille 2,
- GIEC & PNUE, 2001 : *Bilan 2001 des changements climatiques : Rapport de synthèse*, Genève, 216 pages.
- Grisolle H., Guillemet B. et Arlery R., 1962 : *Climatologie Méthodes et Pratiques*, Gauthier-Villars, Paris, pp. 106-120.
- Karrouk M-S, 2011 : *Dynamique des climats du Maroc : Genèses, évolutions et développement des phénomènes, espaces et milieux climatiques*, les Editions Universitaires Européennes, Paris, 420p.
- Lorius C. (sous la direction), 2007 : *Le réchauffement climatique*, 80 pages pour décrypter les projections des climatologues, *Sciences et Avenir*, Hors-Série, N° 150, Mars/Avril 2007, Paris, 80 p.
- Ministère Délégué auprès du Ministre de l'Energie, Chargé de l'Environnement (Maroc), 2016: *Rapport de la 3<sup>ème</sup> Communication Nationale du Maroc à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC)*, Doc. Inédit. pp. 126-130.
- OMM, 2011 : *Le climat et vous*, TEMPS-CLIMAT-EAU, N° 1076, Genève, 32p.
- OMM, 2013 : *Le climat dans le monde 2001–2010 ; Une décennie d'extrêmes climatiques*, TEMPS-CLIMAT-EAU, N° 1119, Genève, 20p.
- OMM, 2015 : *L'état du climat mondial en 2014*, TEMPS-CLIMAT-EAU, N° 1152, Genève, 24p.
- OMM, 2016 : *L'état du climat mondial en 2015*, TEMPS-CLIMAT-EAU, N° 1167, Genève, Genève, 28p.
- OMM, 2016 : *Le climat mondial 2011-2015*, TEMPS-CLIMAT-EAU, N° 1179, Genève, 32p.
- OMM, 2017 : *L'état du climat mondial en 2016*, TEMPS-CLIMAT-EAU, N° 1189, Genève, 28p.
- OMM, 2017 : *Directives pour le calcul des normales climatiques*, TEMPS-CLIMAT-EAU, N° 1203, Genève, 31p.
- OMM, 2018 : *L'état du climat mondial en 2017*, TEMPS-CLIMAT-EAU, N° 1212, Genève, 40p.
- Tolika K., 2019 : *Le Changement Climatique, la variabilité et les risques climatiques*, Actes du XXXII<sup>ème</sup> Colloque International de l'AIC, 29 Mai-1 Juin 2019, ARISTOTLE UNIVERSITY OF THESSALONIKI, Grèce, 624p.
- WMO, 2019: *The Global Climate in 2015–2019*, WEATHER-CLIMATE-WATER, Geneva, 24p.
- WMO, 2020: *The Global Climate in 2020*, WEATHER-CLIMATE-WATER, N° 1264, Geneva, 56p.
- WMO, 2020: *The Global Climate in 2019*, WEATHER-CLIMATE-WATER, N° 1248, Geneva, 44p.

# ASSESSMENT OF EURO-CORDEX AND MED-CORDEX CLIMATE SIMULATIONS IN NORTHERN ITALY

Baronetti A.<sup>1,2</sup>, Dubreuil V.<sup>3</sup>, Provenzale A.<sup>1</sup>, Fratianni S.<sup>4,2</sup>

(1) *Institute of Geosciences and Earth Resources, National Research Council, 56124 Pisa, Italy (alice.baronetti@unito.it)*

(2) *Centro Interdipartimentale sui Rischi Naturali in Ambiente Montano e Collinare, University of Turin, Turin, Italy*

(3) *Université Rennes 2, UMR 6554, CNRS, LETG Rennes, France*

(4) *Earth Sciences Department, University of Turin, 10125, Turin, Italy*

**Summary :** *ASSESSMENT OF EURO-CORDEX AND MED-CORDEX SIMULATIONS IN NORTHERN ITALY. In this study the skill of Regional Climate Models (RCM) in simulating precipitation and temperature in northern Italy were investigated. For this purpose, daily precipitation and temperature RCM/GCM couples belonging to Euro-and Med-CORDEX sub-projects were collected at a spatial resolution of 0.11 degree. Model reliability in the plain and mountainside was tested comparing the simulated climatic outputs with the corresponding gridded data measured at the ground. The bias in the annual mean maximum and minimum temperatures and precipitation between reference (EOBS and EURO4M-APGD datasets) and CORDEX simulations was computed. Finally, annual anomalies for maximum and minimum temperature and precipitation were estimated for near (2021-2050) and far future (2070-2100) periods. The results suggested that the Alpine chain will be affected by a temperature increase that is larger than that of the surrounding lowlands both in the near and far future and by a decrease of precipitation in the far future, especially in the western sector.*

**Key words :** *Projection models, RCM, Bias correction, Anomalies*

**Résumé :** *ÉVALUATION DES SIMULATIONS EURO-CORDEX ET MED-CORDEX DANS LE NORD DE L'ITALIE.*

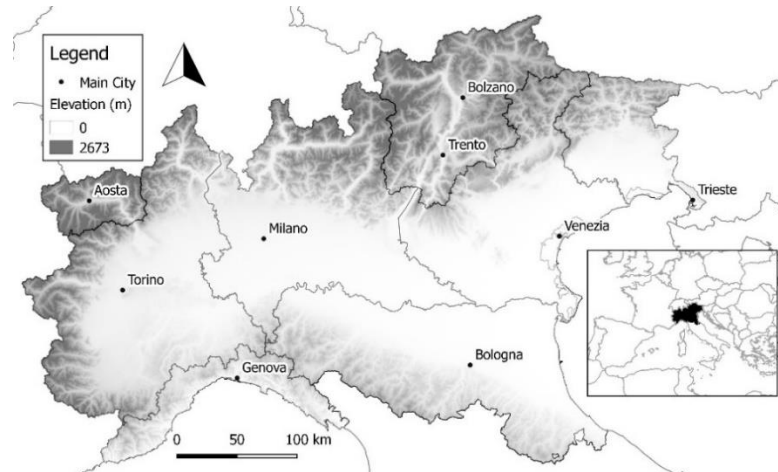
*Dans cette étude, les potentialités des modèles climatiques régionaux (MCR) dans la simulation des précipitations et de la température dans le nord de l'Italie sont étudiées. A cet effet, les couples MCR / GCM de précipitations et de températures journalières appartenant aux projets Euro-et Med-CORDEX ont été collectés à une résolution spatiale de 0,11 degré. Par la suite, la fiabilité des modèles dans la plaine et les montagnes a été testée en comparant les données climatiques simulées aux données maillées correspondantes collectées au sol. Ensuite, le biais des températures moyennes annuelles maximales et minimales et des précipitations entre les simulations de référence (jeux de données EOBS et EURO4M-APGD) et CORDEX a été calculé. Enfin, des anomalies annuelles de température et de précipitations maximales et minimales ont été évaluées pour le proche (2021-2050) et le futur lointain (2070-2100). Les résultats suggèrent que la chaîne alpine sera affectée par une augmentation de la température plus importante que celle des basses terres environnantes, et par une diminution des précipitations dans un avenir lointain, en particulier dans le secteur ouest.*

**Mots clés:** *Modèles de projection, RCM, Correction de Biases, Anomalies*

## Introduction

Regional Climate Models (RCMs) are an essential tool for analysing climate change impacts at regional scale, as they provide projections with higher resolution and expected smaller errors with respect to global climate models (GCMs). However, due to imperfections in the parameterisation of physical processes and the uncertainty on future variability, RCMs are still affected by systematic errors (Bellprat et al., 2013). Some of these deficiencies are specific to individual models. Others seem to be a common and more systematic feature across different RCMs, such as a dry and warm summer bias in south-eastern Europe or the overestimation of interannual summer temperature variability in central Europe (Hagemann et al., 2004; Fischer et al., 2012). In recent years, there was much effort devoted to increase the spatial resolution and reliability of RCMs. An integral part of regional model development is the evaluation and quantification of model performance by comparison against observation-based reference data. In particular, statistical bias correction is frequently used in studies on the impact of climate change on several sectors such as floods, agriculture, and forest fires. In this framework, validation should also verify aspects such as the reproduction of extreme event statistics (Maraun et al., 2015).

Here, we assess the skill of six Euro-CORDEX and Med-CORDEX RCMs in simulating precipitation and temperature in northern Italy. The northern Italian region has been chosen as a case study because it is densely populated, rich in infrastructures and varied agroecosystems, and it has a rather complex topography: it includes a low plain (Po Valley) surrounded by high mountain ranges including the Alps (Figure 1). Northern Italy can be considered as a borderline Mediterranean region, characterized by a temperate climate where temperature is projected to rise substantially and precipitation may significantly change by the end of the 21st century (Desiato et al., 2015).



**Figure 1 : Map of northern Italy, with the location of main cities.**

## 1. Data and Method

In the following, regional climate model (RCM) simulations performed in the two sub-projects Euro-CORDEX (<https://euro-cordex.net/060378/index.php.en>) and Med-CORDEX (<https://www.medcordex.eu/>) were downloaded and processed. Here, 18 daily maximum and minimum temperature and 18 precipitation ensembles from the RCMs RACMO22E, HIRHAM5, CCLM4 and ALADIN52, driven by the EC-EARTH, MPI-ESM, HadGEM2 and CM5 GMCs at a spatial resolution of 0.11 degree (EUR-11) were collected. The current (1971-2000), near future (2021-2050) and far future (2071-2000) periods, under the RCP 4.5 and 8.5 scenarios were considered (Tab.1). As a reference for model evaluation, the historical (1971-2000) E-OBS (<https://www.ecad.eu/download/ensembles/download.php>) European daily gridded dataset, the EURO4M-APGD (<http://www.euro4m.eu/datasets.html>) daily precipitation gridded dataset and a high-resolution gridded dataset based on 88 daily maximum and minimum temperature and precipitation time series in northern Italy (Baronetti et al., 2020) were used. The selected data were cropped on the study area using the following vertices, expressed in WGS84 coordinates: North 47.66, South 43.24, East and West 6.03 and 14.56 respectively.

Table 1 GCM-RCM couples considered in this work, extracted from the Euro- and Med-CORDEX projects. The model couples providing the less reliable results for the study area are shaded in grey.

<i>N°</i>	<i>Actual</i>	<i>N°</i>	<i>RCP4.5</i>	<i>N°</i>	<i>RCP8.5</i>
1	EC-EARTH-RACMO22	7	EC-EARTH-RACMO22	13	EC-EARTH-RACMO22
2	EC-EARTH-HIRHAM5	8	EC-EARTH-HIRHAM5	14	EC-EARTH-HIRHAM5
3	MPI-ESM-CCLM4	9	MPI-ESM-CCLM4	15	MPI-ESM-CCLM4
4	HadGEM2-CCLM4	10	HadGEM2-CCLM4	16	HadGEM2-CCLM4
5	HadGEM2-RACMO22	11	HadGEM2-RACMO22	17	HadGEM2-RACMO22
6	CM5-ALADIN52	12	CM5-ALADIN52	18	CM5-ALADIN52

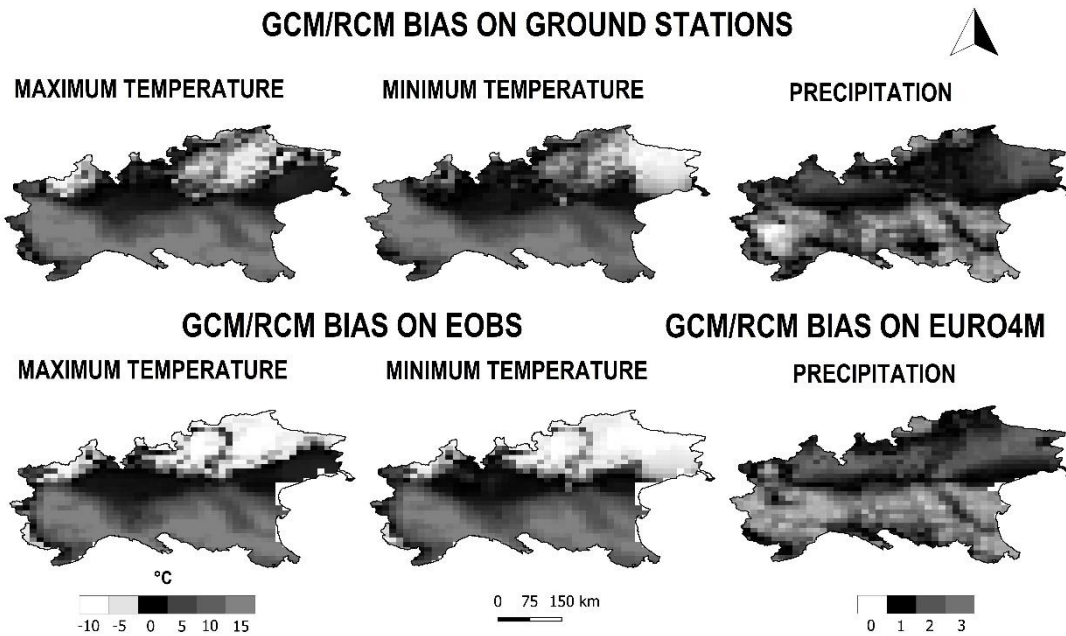
First, GCM/RCM validation was performed to identify the simulations that provided the best agreement with the observations. For each simulation, 10 daily precipitation and temperature series (equally distributed in the plain/hill and mountain sector) were extracted and compared with the corresponding quality-controlled and homogenized, gridded northern Italy dataset obtained from ground stations. The statistical comparison between reference and candidate series for the control period (1971-2000) was performed using the Co.Temp software (Guenzi et al., 2019) for temperature and Co.Rain software (Guenzi et al., 2017) for precipitation, categorizing episodes in weak, mean, heavy and extreme events. Subsequently, on the more reliable models, the annual-mean maximum and minimum temperature bias was computed as the difference between the reference (EOBS) dataset and the simulations (Fang et al., 2015). For precipitation, the ratio between reference (EURO4M-APGD) dataset and simulations was adopted (Ghimire et al., 2019) to define the bias factor. For the most reliable models, the mean future annual anomalies for maximum and minimum temperature and precipitation were estimated as the differences between near (2020-2049) or far (2070-2099) future and the baseline (1971-2000, Toreti and Desitato, 2008).

## 2. Results

The model validation procedure indicated that the couples EC-EARTH-RACMO22E and MPI-ESM-CCLM4 provide the worse comparisons for daily precipitation data, with the highest Root Mean Square Error (RMSE) in the extreme event class (59.56 mm for the first and 56.11 mm for the second). Other model couples gave RMSE values that are below 25.5 mm. In the plain/hill sector, all GCM/RCM couples tended to overestimate precipitation in all classes, especially for extreme events where the RMSE were between 12.66 mm and 25.59 mm. In the mountain sector, underestimation was generally observed for weak, mean and heavy precipitation events, with RMSE between 1.57 mm and 6.97 mm. For temperature, the results of the model validation indicated a clear bias of the models towards higher temperature values in the whole study area. This is especially noticeable in the mountains, with RMSE between 2.50°C and 5.27°C. At variance with precipitation, the temperature analysis did not identify GCM/RCM couples that are more biased than others.

Figure 2 shows the maximum and minimum temperature and precipitation biases in northern Italy estimated using the EOBS, EURO4M-APGD and ground stations gridded datasets as reference databases. The lower bias is obtained comparing the GCM/RCM couples with the ground stations gridded dataset. For precipitation, simulations performed best in the northern Po Plain and the Alpine chain (bias factor close to 1), except for the eastern portion where all GCM/RCM couples underestimate precipitation (bias factor above 2). For temperature, the northern sector displays the better agreement between simulated and ground-recorded temperature, with bias between -2°C and +2°C. The largest part of the southern Po Plain is characterized by an underestimation of the simulated temperature (bias from +5°C to +7°C); along the Ligurian and Venetian coast a bias of +10°C was detected.





**Figure 2 : Maps of the GCM/RCM maximum and minimum temperature bias (in °C) and precipitation bias factor, estimated using as references the EOBS, EURO4M-APGD and ground stations gridded datasets.**

The near (2021-2050) and far future (2071-2100) precipitation and temperature anomalies in the RCP 4.5 scenario are shown in figure 3. In the near future, the northern sector of the study area is the most sensitive to global warming, with annual maximum temperature anomalies between +6°C and +8 °C and annual minimum temperature anomalies from +4°C to + 6 °C. In the Po Valley, no more than +3°C of maximum and minimum temperature rise is expected. In the last 30 years of this century (2070-2099), the spatial distribution of the temperature anomalies is similar to that of the near future, with temperature anomalies that are about +1 °C higher than in the 2021-2050 period. Figure 3 shows that, in the near future, most of the Po Plain is expected to be interested by very low precipitation changes (anomalies close to zero), unlike the Ligurian coast and the eastern Alps displaying positive precipitation anomalies between about +40 mm and +80 mm. For the far future, on the other hand, a slight decrease of precipitation is expected for the entire study area, becoming especially severe along the western Alps where anomalies range between -40 mm and -80 mm. Similar results are found for the RCP 8.5 scenario.

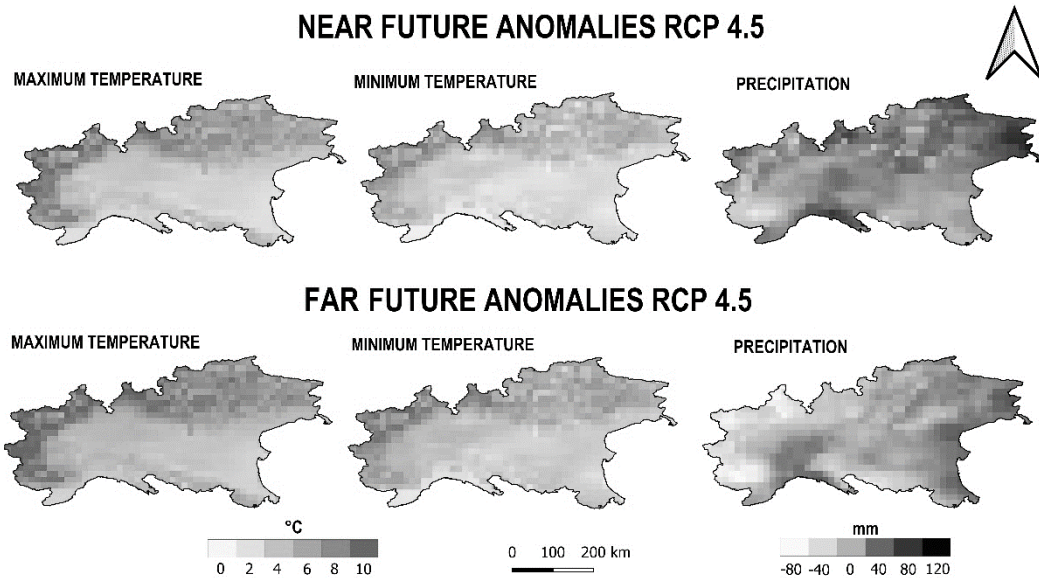


Figure 3 : Precipitation and temperature anomalies in northern Italy for near and far future

### 3. Conclusions and Discussion

This work investigated the reliability of coupled GCM/RCM simulations in northern Italy, characterized by a complex geomorphology. Euro- and Med-CORDEX GCM/RCM couples with a spatial resolution of 0.11 degree were analysed. RCMs models are more suitable to perform local-scale projections, but they can exhibit uncertainty arising from the model design as well as inherited from the different GCMs used to drive them (Le Roux et al., 2019). The investigation of the spatial structure of the model bias has revealed an important regional diversity between the Po Plain and the mountains. In the validation procedure discussed here, significant temperature and precipitation overestimation by the models was observed for the Alpine chain, especially for the extreme event class. This is consistent with the findings of Casanueva et al. (2016), who highlighted an overall overestimation of precipitation for all the simulations analysed. In the Po Valley and the Ligurian coast, GCM/RCM precipitation overestimation and temperature underestimation were detected. In this area, the climate is dominated by the convergence of cold and dry flows coming from the north and warm and wet south-eastern flows, which generate heavy precipitation events for prolonged periods of time (Fiori et al., 2017). Finally, the investigation on near (2020-2049) and far future (2070-2099) annual anomalies has indicated that the northern sector of the study area will be interested by positive temperature anomalies which are definitely larger than those of the lower Po plain. This is consistent with the findings of Zimmermann et al. (2013), who found that the Alps face higher warming trends than the neighboring sectors in the first 50 years of this century. This more intense warming is expected to continue also in the far future, potentially resulting in glacier volume losses of up to about 80%-90% (e.g., Bonanno et al., 2013).

### Acknowledgments

The authors thank Renan Le Roux of the Environments and Societies Department of CIRAD (Montpellier, France) and Nicola Colombo of the University of Turin (Italy) for help in the data rescue.

### References

- Baronetti, A., González-Hidalgo, J.C., Vicente-Serrano, S.M., Acquotta, F., Fratianni, S., 2020: A weekly spatio-temporal distribution of drought events over the Po Plain (North Italy) in the last five decades. *International Journal of Climatology*, 1-14, <https://doi.org/10.1002/joc.6467>.

- Bellprat, O., Kotlarski, S., Lüthi, D., Schär, C., 2013: Physical constraints for temperature biases in climate models. *Geophysical Research Letters*, **40**, 4042–4047
- Bonanno, R., Ronchi, C., Cagnazzi, B., Provenzale, A., 2013: Glacier response to current climate change and future scenarios in the northwestern Italian Alps. *Regional Environment Change*, **14**, 633–643, <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0523-6>
- Casanueva, A., Kotlarski, S., Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J. M., Boberg, F., Colette, A., Christensen, O.B., Georgen, K., Jacob, D., Keuler, K., Nikulin, G., Teichmann, C., Vautard, R. 2016: Daily precipitation statistics in a EURO-CORDEX RCM ensemble: added value of raw and bias-corrected high-resolution simulations. *Climate dynamics*, **47**(3-4), 719–737. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2865-x>.
- Desiato, F., Fioravanti, G., Frascetti, P., Perconti, W., Piervitali, E., 2015: Il clima futuro in Italia: analisi delle proiezioni dei modelli regionali (The future climate in Italy: analysis of the Regional model projections). The Italian National Institute for Environmental Protection and Research (ISPRA), Statodell’Ambiente, 58. In Italian. ISBN: 978-88-448-0723-8.
- Fang, G., Yang, J., Chen, Y. N., Zammit, C., 2015: Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, **19**(6): 2547–2559. <https://doi.org/10.5194/hessd-11-12659-2014>
- Fiori, E., Ferraris, L., Molini, L., Siccardi, F., Kranzlmüller, D., Parodi, A., 2017: Triggering and evolution of a deep convective system in the Mediterranean Sea: modelling and observations at a very fine scale. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **143**(703):927–941. <https://doi.org/10.1002/qj.2977>
- Fischer, E.M., Rajczak, J., Schär, C., 2012: Changes in European summer temperature variability revisited. *Geophysical Research Letters*, **39**(12), 1970. <https://doi.org/10.1029/2012GL052730>.
- Ghimire, U., Srinivasan, G., Agarwal, A., 2019: Assessment of rainfall bias correction techniques for improved hydrological simulation. *International Journal of Climatology*, **39**(4), 2386–2399. <https://doi.org/10.1002/joc.5959>.
- Guenzi, D., Acquavota, F., Garzena, D., Baronetti, A., and Fratianni, S., 2019: An algorithm for daily temperature comparison: co. temp-comparing series of temperature. *Earth Science Informatics*, **1–6**, <https://doi.org/10.1007/s12145-019-00414-y>.
- Guenzi, D., Acquavota, F., Garzena, D., Fratianni, S., 2017: CoRain: a free and open source software for rain series comparison. *Earth Science Informatics*, **10**(3), 405–416, <https://doi.org/10.1007/s12145-017-0301-y>.
- Le Roux, R., Katurji, M., Zawar-Reza, P., Quérol, H., Sturman, A., 2019: Analysis of spatio-temporal bias of Weather Research and Forecasting temperatures based on weather pattern classification. *International Journal of Climatology*, **39**(1): 89–100.
- Maraun, D., Widmann, M., Gutiérrez, J. M., Kotlarski, S., Chandler, R. E., Hertig, E., Wibig, J., Huth, R., Wilcke, R.A.I. 2015: VALUE: A framework to validate downscaling approaches for climate change studies. *Earth's Future*, **3**, 1–14. <https://doi.org/10.1002/2014EF000259>.
- Quintana-Seguí, P., Martín, E., Sánchez, E., Zribi, M., Vennetier, M., Vicente-Serrano, S., Vidal, J.-P., 2016: Sub-chapter 1.3.3. Drought: observed trends, future projections. In the Mediterranean region under climate change (pp. 123–131). <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.23157>
- Toreti, A. and Desiato, F. (2008) Temperature trend over Italy from 1961 to 2004. *Theoretical and Applied Climatology*, **91**(1-4), 51–58. <https://doi.org/10.1007/s00704-006-0289-6>
- Žebre, M., Colucci, R. R., Giorgi, F., Glasser, N. F., Racoviteanu, A. E., Del Gobbo, C., 2020: 200 years of equilibrium-line altitude variability across the European Alps (1901– 2100). *Climate Dynamics*, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05525-7>
- Zekollari, H., Huss, M., Farinotti, D., 2019: Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Cryosphere* **13**, 1125–1146. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019>.

# DANGER CLIMATIQUE D'INCENDIE DE FORÊTS AU XXI<sup>ème</sup> SIÈCLE EN TUNISIE : SÉCHERESSE ET ÉVÉNEMENTS DE SIROCCO DANS LES MODÈLES CLIMATIQUES.

Belhadj Khedher Chiraz<sup>(1)</sup> et Mouillot Florent<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> UR géomatique et geosystemes, univ. La Manouba, Tunisie. Chiraz\_behadj@yahoo.fr

<sup>(2)</sup> UMR CEFE, CNRS, univ. Montpellier, EPHE, IRD, 1919, route de Mende, 34293 Montpellier Cedex 5. France. Florent.mouillot@ird.fr

**Résumé :** Les incendies en méditerranée sont associés aux événements de sécheresse, forte température et vents violents. En Tunisie, les périodes de Sirocco apparaissent comme les événements climatiques principaux qui génèrent de fortes températures et les plus grands incendies. Le nombre d'événements sirocco annuel est donc fortement corrélé à la surface totale incendiée. Nous proposons de quantifier ici la fréquence de ces événements de sirocco pour la période 2050-2100 en Tunisie sur la base des scénarios climatiques régionaux MEDCORDEX.

**Mots clés :** incendie, forêts, sécheresse, Sirocco, scénario climatique

**Abstract :** Forest fires in the mediterranean basin are associated to drought events, high temperatures and heavy winds. In Tunisia, Sirocco episodes appear as major climate events generating high temperatures and large fires. The yearly number of sirocco events is then highly correlated to the total annual burned area. We propose here to quantify the frequency of sirocco events for the period 2050-2100 in Tunisia based on regional climate scenarios MEDCORDEX.

**Keywords:** forest fires, drought, Sirocco, climate scenario

## Introduction

Les incendies de forêts dans le bassin méditerranéen sont la conséquence à la fois de phénomènes de sécheresse prolongée, combinés à des événements de chaleur ou de vent intense. La variabilité interannuelle des surfaces brûlées est donc dépendante de l'intensité de la sécheresse annuelle dans la partie du nord bassin méditerranéen (Turco et al. 2017), mais plus liée aux vagues de chaleur dans la partie sud où la sécheresse est récurrente. Ainsi Belhadj Khedher et al. (2020) ont montré qu'en Tunisie, les grands incendies (>400ha) étaient reliés aux événements de Sirocco, vent chaud et sec en provenance du Sahara qui conduit à des anomalies de température de +5°C à +7°C durant 2 à 7 jours, et que les surfaces incendiées étaient corrélées à l'intensité et la durée de cet événement. La variabilité interannuelle des surfaces incendiées était ainsi fortement reliée au nombre d'événements de sirocco pendant la saison sèche estivale. Ruffault et al. (2020) ont par la suite montré qu'une augmentation des vagues de chaleur dans le futur conduirait à une augmentation des incendies dans le bassin méditerranéen et en Tunisie en particulier. Nous proposons ici d'analyser les événements de Sirocco en Tunisie sur la période 2050-2100 à partir des scénarios climatiques pour le 21<sup>ème</sup> siècle.

## 1. Matériel et méthode

### 1.1 Données climatiques

Les données climatiques sont issues des scénarios MEDCORDEX ([www.medcordex.eu](http://www.medcordex.eu)) pour le 21<sup>ème</sup> siècle. Med-CORDEX rassemble les modèles climatiques régionaux (RCM) à fine résolution (10km) prenant en compte les particularités méditerranéennes de complexité topographique conduisant aux vents régionaux (Mistral, Sirocco) et les interactions océan/biosphère/atmosphère. Nous avons sélectionné le modèle climatique global (GCM) CNRM-CM5 et le modèle régional CNRM-ALADIN52 pour les scénarios climatiques RCP45 et RCP8.5 du GIECC correspondant aux scénarios les plus pessimistes avec un forçage radiatif de 4.5 et 8.5W.m<sup>-2</sup>. Les données journalières de température et de précipitation ont été téléchargées sur la période 2050-2100, pour le pixel correspondant à la station de Tunis (9.5°E, 33°N).

## 1.2 Analyse de données

A partir des séries temporelles de températures, nous avons déterminé les événements de sirocco comme des augmentations de températures supérieures à  $+7^{\circ}\text{C}$  en trois jours pendant différentes longueurs de saison estivale.

En parallèle nous avons défini la période de sécheresse comme la période pendant laquelle l'indice de sécheresse drought code (DC) de l'indice forêt météo (IFM) (Van Wagner et al. 1985) piloté par les variables de précipitation et de température de l'air, était supérieur à 300. Le DC a été calculé à partir des variables de température et précipitations journalières par le package Rcran 'cfdrrs' (Wang et al. 2020).

Les nombres d'événements annuels pendant la période de sécheresse, pendant la période Mai-Octobre, Juin-Septembre et Juillet-Aout ont aussi été évalué sur la période 2050-2100.

## 2. Résultats

La température maximale moyenne annuelle pour la période 2050-2100 est  $26.53^{\circ}\text{C}$  pour le scénario RCP45 et  $27.9^{\circ}\text{C}$  pour le scénario RCP85 (soit une différence de  $1.37^{\circ}\text{C}$ ),  $32.6^{\circ}\text{C}$  et  $34.2^{\circ}\text{C}$  de Mai à Octobre (soit une différence de  $1.6^{\circ}\text{C}$ ),  $35.26^{\circ}\text{C}$  et  $36.6^{\circ}\text{C}$  de Juin à septembre (soit une différence de  $1.34^{\circ}\text{C}$ ), puis  $37.6^{\circ}\text{C}$  et  $39.16^{\circ}\text{C}$  de Juillet à Aout (soit une différence de  $1.56^{\circ}\text{C}$ , indiquant une augmentation des températures accrues de  $1.5^{\circ}\text{C}$  dans le scénario RCP85. (Table 1).

Table 1 : Moyenne annuelle et saisonnière des températures maximum journalières Tmax et du nombre de jour d'événements de Sirocco (N SIR) et durée de la sécheresse (Drought) pour la période 2050-2100 dans les scénario RCP45 et RCP85.

	Annuel	Mai-Octobre	JuinSeptembre	Juillet Aout
RCP45 : Tmax	$26.53^{\circ}\text{C}$	$32.6^{\circ}\text{C}$	$35.26^{\circ}\text{C}$	$37.6^{\circ}\text{C}$
RPC45 : N SIR		9.65 (3.16)	6.36 (2.7)	3.16 (1.92)
RCP45 : Drought	77(8)			
RCP85 : Tmax	$27.9^{\circ}\text{C}$	$34.2^{\circ}\text{C}$	$36.6^{\circ}\text{C}$	$39.16^{\circ}\text{C}$
RCP85 : N SIR		11.08 (3.34)	7.16 (2.7)	3.38 (1.83)
RCP85 : Drought	96(11)			

La figure 1 représente le nombre d'événements de Sirocco pour la période 2050-2100 pour les scénarios RCP45 (noir) et RCP85 (rouge) pour les périodes Juillet-Aout, Juin-Septembre, et Mai-Octobre.

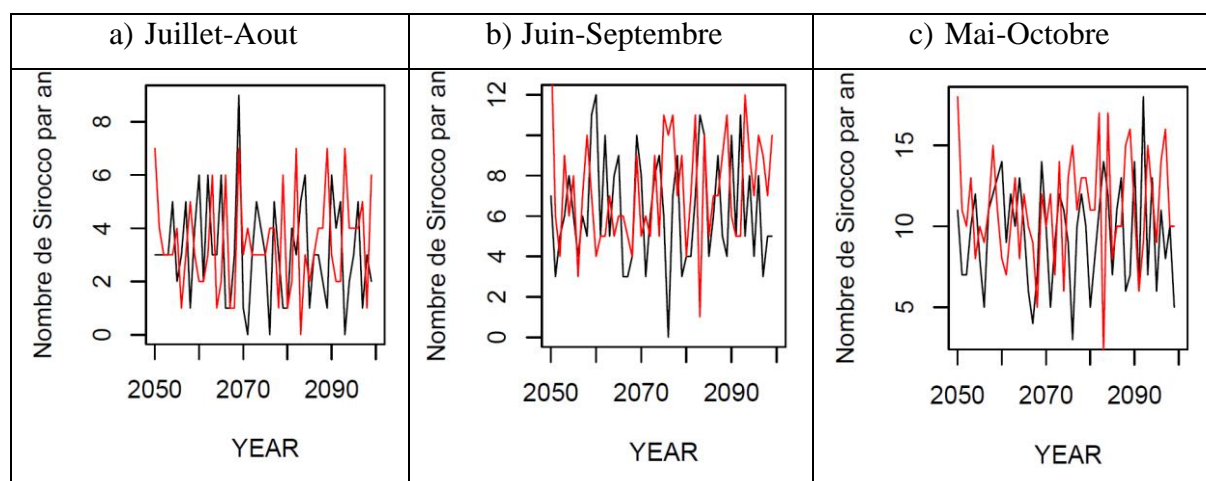


Figure 1 : nombre d'événements de Sirocco (Axe Y) pour les scénarios climatiques RCP45 (noir) et RCP85 (rouge) pour la période 2050-2100 et les saisons a) Juillet Aout, b) Juin Septembre, c) Mai Octobre.

Pour les mois de juillet-Aout, le nombre de sirocco (table 1) pour la période 2050-2100 est estimé à 3.16 (+/- 1.92) événements pour le scénario RCP45 et 3.38 (+/- 1.83) événements pour

le scenario RCP85. Pour la période Juin-Septembre, ces valeurs montent à 6.36 (+/-2.7) et 7.16 (+/- 2.7), puis 9.65 (+/-3.16) et 11.08 (+/-3.34) pour la période Mai-Octobre. Ces résultats montrent que pour une différence d'augmentation de température de 1.5°C entre les scenarios RCP45 et RCP85, la différence du nombre d'événements de Sirocco est faible en Juillet-Aout (+0.22) et Juin-Septembre (+0.8) et atteint +1.43 pour Mai-Octobre, soit, +0.11, +0.2, +0.22 événements par mois respectivement pour ces différentes périodes. La différence entre saisons est donc plus importante que la différence entre scenarios, suggérant qu'une élongation de la période sécheresse aurait plus d'importance sur l'aléa incendie que l'augmentation des événements de sirocco qui restent stables.

Les calculs de drought Code (DC) sur la période 2050-2100 pour les scenarios RCP45 et RCP85 montrent respectivement une durée de la période de sécheresse moyenne de 77 jours (+/- 8 jours) et 96 jours (+/- 11 jours). Les événements de Sirocco qui se produisent pendant la période sèche sont pour l'instant sur la période Juillet Aout mais pourraient s'étendre sur la période Juin-Septembre (RCP45) et Mai-Octobre (RCP85).

### 3 Discussion

Cette étude apporte des éléments de réponse sur la fréquence future des événements de Sirocco pendant les périodes de sécheresse, comme facteur de risque principal pour les incendies de forêts en Tunisie. Nous avons montré que les scenarios climatiques ne projettent pas une différence significative du nombre d'événements de Sirocco entre les scenarios RCP45 et RCP85, malgré une augmentation de température plus forte pour RCP85. Ce résultat montre ainsi que sous un contexte général d'augmentation des températures de l'air, des processus atmosphériques régionaux peuvent atténuer ou aggraver cette situation. Ces processus locaux peuvent ainsi conduire à des rétroactions contrastées, comme une réduction des vents Santa Ana en Californie (Miller et al. 2006, Guzman Morales et al. 2019), ou une augmentation comme en Australie (Dowdy et al. 2019) dans les modèles de circulation globale. Ces deux zones présentent les mêmes caractéristiques géographiques que la Tunisie, avec une zone continentale désertique produisant des vents chauds qui touchent la zone côtière tempérée. L'amplitude des vagues de chaleur devrait augmenter dans le bassin Méditerranéen (Baldi et al. 2006), mais la fréquence des événements à court terme comme le Sirocco ont été peu étudiés, et notre étude apporte un premier élément de réponse.

Dans un second temps, nous mettons en avant qu'il faut considérer la durée de la sécheresse comme variable de prédiction du futur régime des incendies. En effet, les événements de sirocco se produisent toute l'année, mais seuls les événements de sirocco se produisant pendant la période de sécheresse génèrent des grands incendies. Le déficit de précipitation prévu en Méditerranée pour 2050-2100 induira une augmentation de la sécheresse particulièrement en été (Dubrovsky et al. 2014) avec une élongation et une précocité de la période de sécheresse (Mouillot et al. 2005). L'allongement de la période de sécheresse pourrait donc jouer un rôle tout aussi important que l'augmentation des vagues de chaleurs dans le future risque d'incendie.

### 4 Références

- Baldi, M.; Dalu, G.; Maracchi, G.; Pasui, M.; Cesarone, F. 2006. Heat waves in the Mediterranean: A local feature or alarger scale effecting. *J. Climatol.*, **26**, 1477–1487.
- Belhadj-Khedher C., El-Melki T., Mouillot F. (2020). Saharan hot and dry sirocco winds drive extreme fire events in Mediterranean Tunisia (North Africa). *Atmosphere*, 11 (6), art. 590 [17p.].
- Dowdy, A.J.; Ye, H.; Pepler, A.; Thatcher, M.; Osbrough, S.L.; Evans, J.P.; di Virgilio, G.; Mc Carthy, N. 2019. Future changes in extreme weather and pyroconvection risk factors for Australian wildfires. *Sci. Rep.*, **9**, 10073

- Dubrovsky M., Hayes M., Duce P., Trnka M., Svodoba M., Zara P. 2013. Multi GCM projections of future drought and climate variability indicators for the Mediterranean region. *Regional Env. change* **14** : 1907-1919.
- Guzman-Morales, J.; Gershunov, A. 2019. Climate change suppresses Santa Ana winds of southern California and sharpens their seasonality. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 2772–2780.
- Miller, N.L.; Schlegel, N.J. 2006. Climate change projected fire weather sensitivity: California Santa Ana wind occurrence. *Geophys. Res Lett.*, **33**, L15711.
- Mouillot F., Rambal S., Joffre R. 2002. Simulating climate change impacts on fire frequency and vegetation dynamics in a Mediterranean Type ecosystem. *Global change Biology* **8(5)** : 423 :437.
- Ruffault J., Curt T., Moron V., Trigo R. M., Mouillot F., Koutsias N., Pimont F., Martin-StPaul N., Barbero R., Dupuy J. L., Russo A., Belhadj-Khedher C. (2020). Increased likelihood of heat-induced large wildfires in the Mediterranean Basin. *Scientific Reports - Nature*, **10 (1)**, 13790 [9 p.] ISSN 2045-2322
- Turco M., Von Hardenberg J., AghaKouchak A., Llasat M.C., Provenzale A., Trigo R.M. 2017. On the key role of droughts in the dynamics of summer fires in Mediterranean Europe. *Scientific Reports* **7**, 81.
- Van Wagner, C.E. and T.L. Pickett. 1985. Equations and FORTRAN program for the Canadian Forest Fire Weather Index System. Can. For. Serv., Ottawa, Ont. For. *Tech. Rep.* **33**. 18 p
- Wang X., Cantin A., Parisien MA, Wotton M., Anderson K., Moore B., Schiks T., Flannigan M. 2020. The 'cffdrs' package. R cran.

# EVALUATION DE L'IMPACT DE LA SÈCHERESSE CLIMATIQUE SUR LA PRODUCTIVITÉ DE L'ÉLEVAGE DANS LA PROVINCE DE TAZA (MAROC)

Belmahi Mohamed<sup>1</sup>, Hanchane Mohamed<sup>1</sup> et El Mouloudi M'hamed<sup>1</sup>

(1) Laboratoire Territoire, Patrimoine et Histoire, USMBA/Fès, Maroc. [belmahi.mohamed15@gmail.com](mailto:belmahi.mohamed15@gmail.com)

**Résumé :** La sécheresse climatique compte parmi les aléas climatiques qui menacent toutes les activités agricoles au Maroc. Plus particulièrement, cette étude évalue la sécheresse climatique selon l'indice pluviométrique standardisé (IPS) et mesure son impact sur la productivité de l'élevage dans la province de Taza (Maroc). Après avoir évalué la sécheresse climatique, l'étude mesure son impact, d'une part, sur l'augmentation des prix des fourrages et de la botte de paille et, d'autre part, sur la durée des suppléments alimentaires et le niveau de production de l'élevage.

**Mots clés :** sécheresse climatique ; l'indice standardisé des précipitations ; l'élevage ; Taza

**Abstract:** Climate drought is one of the climatic hazards that threaten all agricultural activities in Morocco. More specifically, this study assesses climatic drought according to the standardized rainfall index (IPS) and measures its impact on livestock productivity in the province of Taza (Morocco). After evaluating the climatic drought, the study measures its impact, on the one hand, on the increase in the prices of fodder and the straw bale and, on the other hand, on the duration of food supplements and the level of livestock production.

**Key words:** climatic drought; Standardized Precipitation Index;- livestock; Taza

## Introduction générale

Au Maroc les épisodes de sécheresse sont fréquentes depuis les années quatre-vingt (Skees et al., 2001). Les régions soumises à la sécheresse sont situées au centre du Maroc, y compris le Saïs, le Gharb, le centre du Moyen Atlas et l'Orientale qui connaissent des sécheresses longues et sévères. En revanche, les régions du Nord connaissent des périodes de sécheresse modérées et courtes (Chbouki, 1992). La sécheresse constitue le risque naturel majeur qui menace les ressources du pays (Bazza & Stockton, 1990 ; Balaghi, 2006) et elle peut avoir plusieurs impacts sur l'agriculture, l'élevage, l'hydrologie et par conséquent sur la société et son économie (Verner, et al., 2018; Hanchane, 2016).

La caractérisation de la sécheresse est possible grâce à l'utilisation d'indices climatiques (Haied, et al., 2017). Ces indices sont utilisés pour évaluer l'intensité, la durée et la sévérité de la sécheresse. Son impact sur la production agricole a été largement élucidé par de nombreuses études au Maroc. Cependant, son effet sur l'alimentation du bétail n'a pas été abordé par les études agroclimatiques au Maroc. Ainsi, le but de la présente étude est d'évaluer la sécheresse climatique selon l'indice pluviométrique standardisé (IPS) et de mesurer son impact, d'une part, sur l'augmentation des prix des fourragères et de la botte de paille et, d'autre part, sur la durée des suppléments alimentaires et la production de l'élevage.

## 2. Données agroclimatiques utilisées et méthodes

Le suivi de la sécheresse climatique et ses impacts sur la production de l'élevage et les prix des fourragères dans la province de Taza s'appuient sur deux types de données :

Les données pluviométriques utilisées dans cette recherche sont issues de la Direction Provinciale de l'Agriculture de Taza. Les données de base sont constituées de relevés pluviométriques mensuels de la période septembre 1931- aout 2018.

Après une définition des années sèches selon une période de référence (1931-2018), les agricoles ont été évalués selon l'intensité de la sécheresse. Ces données concernent la production de l'élevage et les prix des fourrages utilisés. Elles sont collectées à partir d'une enquête de terrain effectuée sur la base d'un échantillon de 100 éleveurs de la province de Taza. L'enquête est effectuée entre juin 2020 et Mars 2021.

L'IPS est un indice recommandé par OMM qui peut évaluer la sécheresse à différentes échelles de temps : 3, 6, 12, 24 ou 48 mois (McKee, Doesken, & Kleist, 1993). Cet indice définit la



sévérité de la sécheresse en différentes classes (Tab.1) et il est exprimé suit (Descroix, Bodian, Dacosta, & Abdou, 2016) :

$$\text{IPS} = (\text{Pi} - \text{Pmoy}) / \sigma$$

Où, **IPS** : indice pluviométrique standardisé ; **Pi** : précipitation annuelle ; **Pmoy** : la moyenne des précipitations annuelles et **σ** : l'écart-type

Tableau 1: Classification de la sécheresse en rapport avec la valeur de l'IPS (McKee et al., 1993)

Intensité de la sécheresse	Valeurs de l'IPS
Classe 1 : extrêmement Humide	>2
Classe 2 : très humide	1 à 2
Classe 3 : modérément humide	0 à 1
Classe 4 : Sécheresse légère	0 à -0.99
Classe 5 : Sécheresse modérée	-1 à -1.49
Classe 6 : sécheresse sévère	-1.5 à -1.99
Classe 7 : extrêmement sèche	<-2

### 3. Résultats et Discussion

#### 1.1. Fréquence et intensité de la sécheresse climatique annuelle selon l'IPS

D'après la période de référence analysée (1931-2018), les résultats de calcul de l'IPS de 12 mois a montré une phase humide coute de 5 années successives de 1937-1938 à 1941-1942, suivi par une phase longue de sécheresse légère, étendue sur 8 ans de 1942-1943 à 1949-1950. Mais à partir de 1950-1951 jusqu'à la campagne 1972-1973, on observe une alternance d'années sèches et humides. Ensuite, une période humide courte de 5 ans de 1973 – 1974 de 1977-1978 a été suivie d'une période sèche très longue de 15 ans à partir 1978-1979, interrompue par deux années humides. La fin de cette phase a enregistré un IPS négative record de -1.70 Après cette longue période sèche, 3 ans humides successives allant de 1995-1996 à 1997-1998 ont été enregistrées, puis encore une période humide de 3 ans continue de 2008-2009 à 2010-2011 a été caractérisée par un IPS positif record de 3.16 en 2009-2010. On note aussi l'absence d'une sécheresse extrême (SPI >-2) au niveau de la zone d'étude durant la période analysée.

L'indice IPS met en évidence une alternance d'années sèches (57%) et humides (43%), avec une fréquence d'apparition d'années légèrement sèches qui est relativement élevée (80%). Cependant, les années modérément humides constituent 26%. Ce résultat est affirmé par les résultats obtenus par Kessabi et Hanchane (2020) qui ont trouvé la dominance des années légèrement sèches pour la province de Taza, suivie par des années modérément humides. En revanche, les années fortement à extrêmement humides équivalent 17% et sont rassemblées durant la période 1990-2015. Par ailleurs, les degrés de sécheresses sévère et extrême sont pratiquement nuls.

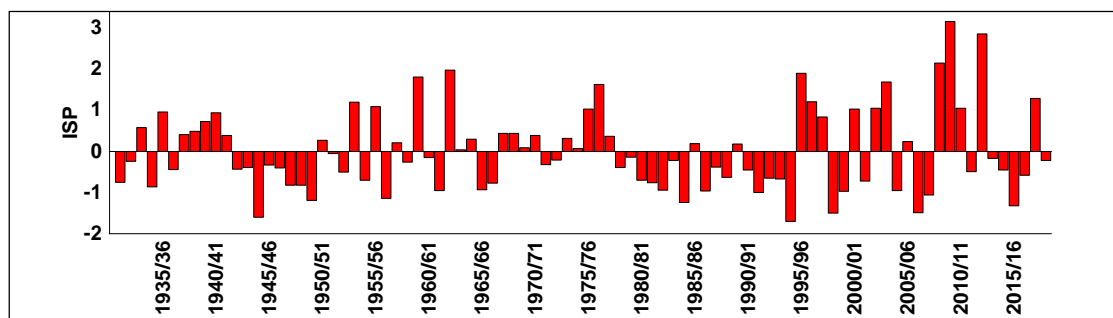


Figure 4: Valeurs annuelles de l'IPS à la station pluviométrique de Taza (1931-2018)

### 3.2. Impact de la sécheresse sur l'activité de l'élevage.

- Impact sur le prix de la botte de paille

Le prix de la botte de paille pendant la période de production (juin) dans l'année humide est plus bas dans la province de Taza à cause de l'augmentation de l'offre. Cependant, il est multiplié par 3 fois dans le cas d'une année modérément sèche et multiplié par 6.5 fois dans le cas d'une année sévèrement sèche, comme l'année agricole 1994-1995; Le prix oscille entre 7 et 45 Dh. (Fig. 2).

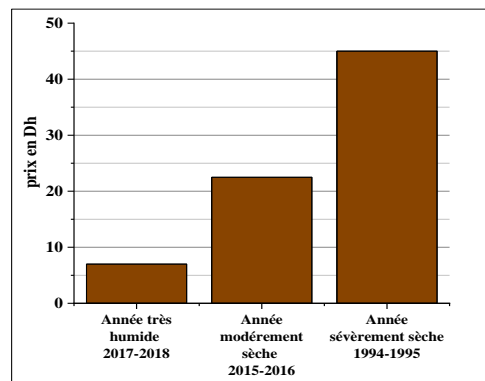


Figure 5: l'évolution des prix de la botte de paille en Dh en fonction de la situation climatique de l'année (Source des données : enquête du terrain, juin 2020)

- Impact sur le prix des fourrages

La sécheresse climatique a un impact certain sur les prix des fourrages. Le sac de son de blé de 40 kg a connu une augmentation de 25 à 40 Dh en comparant l'année agricole humide (2017-2018) et l'année agricole modérément sèche (2015-2016). Ainsi le prix de l'orge fourragère a connu à son tour une élévation de 20 à 40 Dh. Cependant, le prix du maïs fourragère a enregistré une augmentation légère par rapport aux prix de l'orge et du son du blé; il a oscillé entre 5 à 15 Dh pour chaque sac de 40 kg (Fig.3, 4 et 5).

Nous remarquons que les prix des trois plantes fourragères augmentent légèrement pendant la fin de l'automne et durant la saison hivernale malgré que l'année 2017-2018 a été classée humide. Aussi, l'écart des prix devient significatif pendant la saison du printemps et la saison d'été, en particulier pour l'orge et le son du blé. En revanche, le prix du maïs a connu une variabilité légère à cause de sa place marginale dans l'alimentation du bétail.

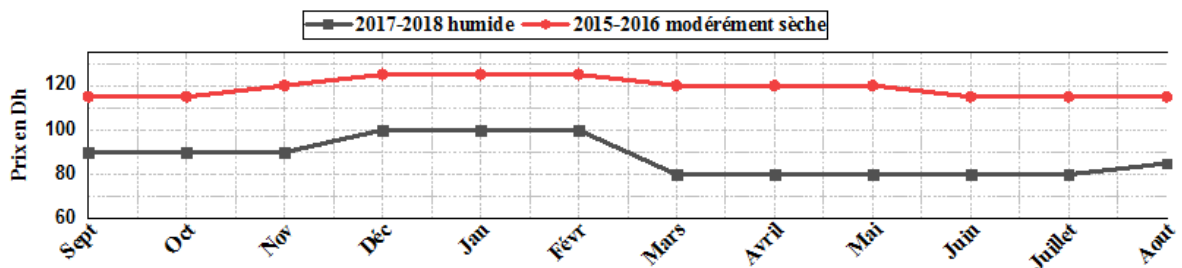


Figure 3: Evolution du prix du son de blé (Dh/40 kg) dans une année humide par rapport à une année modérément sèche.

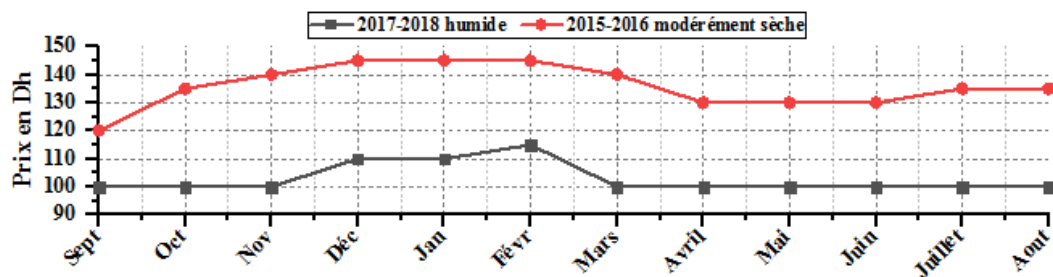


Figure 4: Evolution du prix de l'orge (Dh/50 kg) dans une année humide par rapport à une année à une année

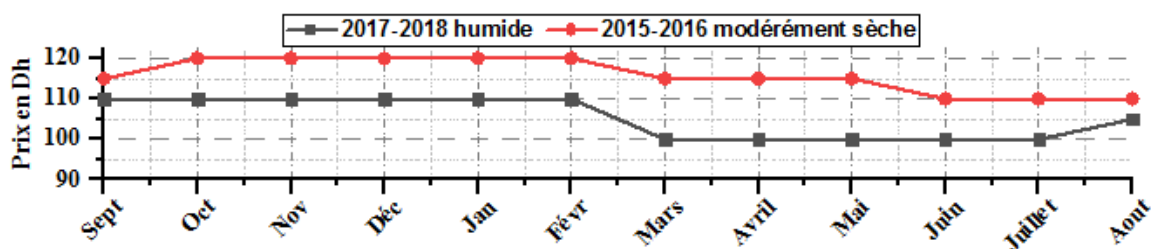


Figure 6: l'évolution du prix du maïs (Dh/40 kg) dans une année humide par rapport à une année modérément sèche

- Impact sur le prix du bétail

Globalement, le prix du bétail diminue proportionnellement à la gravité de la sécheresse ; ils oscillent entre 14% et 70%. En moyenne, la réduction des prix est de 18% entre année très humide et modérément sèche alors qu'elle est de 49.3 % en année extrêmement sèche. Les réductions les plus importantes concernent les vaches de race améliorée et les vaches laitières; ils constituent le cheptel le plus touché par la sécheresse climatique. Pour le reste du cheptel, la sensibilité de leurs prix de vente au climat reste presque égale et de faible degré (Tab. 3).

- Impacts sur la fécondité et la mortalité des bétails.

La fécondité des ovins est considérablement sensible à la sécheresse dans la province de Taza; elle est réduite d'environ 50 % en cas d'année extrêmement sèche comme c'est le cas de l'année agricole 1994-1995. Inversement, la mortalité a augmenté de 6 fois à cause de la gravité de la sécheresse.

Tableau 2: Comparaison le prix du cheptel en Dh entre une année très humide, année modérément sèche et année sévèrement sèche et le pourcentage de réduction des prix dans la province de Taza

le prix en Dh Type de cheptel	Année très humide (2017-2018)	Année modérément sèche (2016-2017)	Année de sécheresse sévère (1994-1995)	% de réduction entre année très humide et année modérément sèche	% de réduction entre année fortement humide et année sévèrement sèche
Vache laitière (race améliorée)	17000	10000	3000	25,9	70,0
Velle (race améliorée)	7500	5500	1400	15,4	68,5
Agneau de 6 mois non engraisé (race améliorée)	900	650	400	16,1	38,5
Agneau de 6 mois engraisé (race améliorée)	1600	1050	550	20,8	48,8
Mouton d'un an engraisé (race améliorée)	2500	1800	1100	16,3	38,9
Bouc engraisé (race améliorée)	1600	1200	700	14,3	39,1
Chevreau (race locale)	850	600	350	17,2	41,7

Source des données : enquête de terrain, 2021

Tableau 3 : Pourcentage de fécondité et de mortalité en fonction de l'intensité de sécheresse

	Année très humide (2017-2018)	Année modérément sèche (2016-2017)	Année sévèrement sèche (1994-1995)
La fécondité	94	78	50
Les mortalités	6	20	37

Source des données : enquête de terrain, juillet 2020.

## Conclusion :

Cette étude a montré que la province de Taza a connu six périodes de sécheresse qui sont caractérisées par une sévérité légère à extrême pendant les années 1931-1937, 1942-1950, 1978-1985-, 1986-1989, 1990-1995 et 2013-2017. En effet la sécheresse climatique constitue un risque récurrent dans cette province comme il est le cas pour l'ensemble du Maroc. L'année agricole de 1994-1995 est l'année la plus sèche avec un IPS négative record de -1.70.

En analysant l'impact de la sécheresse sur l'activité de l'élevage selon une étude de cas basée sur des enquêtes de terrain, on constate qu'elle peut induire la diminution de la taille du troupeau à cause des mortalités qui peuvent augmenter de 6 fois en années extrêmement sèches, en plus de l'abaissement des performances de reproduction de 50%. Aussi, on note la sensibilité des prix des fourrages à l'avènement de la sécheresse. De même, la régression des prix du cheptel est proportionnelle à la gravité de la sécheresse pour les vaches et les vaches laitières de race améliorée.

## Bibliographie

- Ali, A., Lebel, T., & Amani, A. (2008). Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 19(4), 227-235.
- Balaghi, R., Jlibene, M., Tychon, B., & Mrabet, R. (2007). Gestion du risque de sécheresse agricole au Maroc. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 18(3), 169-176. doi: 10.1684/sec.2007.0088
- Bazza, M., & Stockton, C. (1990). Variabilité Spatiale et Chronologique du Climat Marocain et Importance de l'Irrigation dans l'Amélioration de ses Potentialités pour les Cultures Pluviales. Actes du XIVème Congrès International de la Commission Internationale de l'Irrigation et de Drainage, Rio de Janeiro, Brésil. (N° 1-C, pages 233-249). Commission internationale de l'irrigation et du drainage.
- Chbouki, N., Stockton, C. W., & Myers, D. E. (1995). Spatial-temporal patterns of drought in Morocco. *International Journal of Climatology*, 15(2), 187-205. doi:https://doi.org/10.1002/joc.3370150205
- Hanchane, M. (2016). l'impact des mutations climatiques sur le phénomène de la sécheresse au Maroc à partir d'une étude historique. (M. d. islamiques, Éd.) Daaouat El Hak (420), 85-97.
- Kessabi, R., & Hanchane, M. (2020). Le risque de la sécheresse et la variabilité pluviométrique dans la région de Fès-Meknès à travers l'indice de précipitation normalisé et corrélation avec l'Oscillation Nord Atlantique. Dans O. A., A. E. B., & F. d. Université Ibn Zohr (Éd.), *Risque naturelles, environnementaux et sociaux dans l'espace marocain*. Agadir.
- Liu, D., You, J., Xie, Q., Huang, Y., & Tong, H. (2018). Spatial and Temporal Characteristics of Drought and Flood in Quanzhou Based on Standardized Precipitation Index (SPI) in Recent 55 Years. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 6, 25-37. doi:10.4236/gep.2018.68003.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179-183. [https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS\\_Relationship\\_Drought\\_Frequency\\_Duration\\_Time\\_Scales\\_1993.pdf](https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf)
- OMM. (2012). Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé. Genève. 25 p.
- OMM. (2006). Suivi de la sécheresse et alerte précoce: principes, progrès et enjeux futurs. 28 p
- Skees, J., S.Gober, P.Varangis, R.Lester, & V.Kalvakonda. (2001, Mai). Developing rainfall - based index insurance in Morocco, The World Bank, 40p. <https://www.researchgate.net/publication/23722465>
- Verner, D., Treguer, D., Redwood, J., Christensen, J., McDonnell, R., Elbert, C., . . . Belghazi, S. (2018). climate variability, drought, and drought management in morocco's agricultural sector. Banque mondiale. <https://elibrary.worldbank.org/doi/abs/10.1596/30603>

# **A LA RECHERCHE DES INDICATEURS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LE BASSIN MONTAGNARD DE OUZOUZ : EXTRACTION ET ANALYSE DE PLUIES MAXIMALES JOURNALIERES (HAUT ATLAS - MAROC)**

Abdelmoumen Benchattou et Mohamed El Ghachi

(1) Doctorant, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Béni Mellal-Maroc, 212668799613, benchattouabdelmomen@gmail.com

(2) Professeur chercheur, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Béni Mellal-Maroc, elghachi\_mohamed@yahoo.fr

**Résumé :** Le changement climatique est une réalité largement reconnue aujourd'hui dans la communauté scientifique. Durant les trois décennies, les chercheurs scientifiques du Maroc parlaient de la variabilité climatique (GIEC, 2014), Depuis le Sommet de Rio en 1992. Selon le quatrième rapport d'évaluation du climat du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 1995) le Maroc est un pays très vulnérable à la variabilité du climat, il est caractérisé par une forte irrégularité spatiale et temporelle des précipitations pluviométriques. Le bassin versant d'Ouzoud, situé au Haut Atlas Centrale, Il couvre une superficie de 315,6 km<sup>2</sup>, un bassin non aménagé avec un enjeu touristique surtout pendant la période estivale, dans le contexte du changement climatique ce bassin est caractérisé par des phénomènes d'orages qui favorisent l'apparition en permanence des crues et des inondations, qui touchent l'ensemble du bassin versant, et qui influencent négativement sur les activités socio-économiques du bassin d'Ouzoud (BENCHATTOU, EL GHACHI, 2019). À travers ce papier scientifique, nous avons travaillé sur la recherche des indicateurs du changement climatique dans le bassin montagnard d'Ouzoud. On terme de résultats, on note que l'indicateur du changement climatique c'est les pluies maximales journalières enregistrées dans les quatre stations utilisées, pour traiter cette problématique nous avons utilisé une palette méthodologie qui rassemble plusieurs outils et tests statistiques. Notre étude vise à l'extraction et l'analyse statistique et fréquentielle des pluies maximales journalières extrêmes. Cette contribution scientifique nous a permis de mettre l'accent sur les impacts des pluies maximales journalières dans le contexte du changement climatique dans le bassin versant d'Ouzoud, qui est caractérisé par une forte irrégularité spatiale et temporelle des précipitations pluviométriques maximales qui favorisent l'apparition des extrêmes hydrologiques sous forme de crues et des inondations qui entraînent à chaque fois des dégâts matériels et parfois des pertes humains, et un sentiment d'insécurité chez les riverains et les touristes.

**Mots clés :** changement climatique – variabilité climatique – pluies maximales – impacts.

**Abstract :** Climate change is a widespread reality in the scientific community today. For the three decades, Morocco's scientific researchers have been talking about climate variability (IPCC, 2014), since the Rio Summit in 1992. According to the fourth climate assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 1995) Morocco is a country highly vulnerable to climate variability, characterized by a strong spatial and temporal irregularity of rainfall. The Ouzoud watershed, Located in the Central High Atlas, it covers an area of 315.6 km<sup>2</sup>, an undeveloped basin with a tourist issue especially during the summer period, in the context of climate change this basin is characterized by storm phenomena that promote the permanent appearance of floods and floods, which affect the entire watershed, and which negatively influence the socio-economic activities of the Ouzoud basin (BENCHATTOU, EL GHACHI, 2019). Through this scientific paper, we have been working on the research of climate change indicators in the Ouzoud mountain basin. We term results, we note that the indicator of climate change is the maximum daily rains recorded in the four stations used, to deal with this problem we used a methodology palette that brings together several tools and statistical tests. Our study aims at the extraction and statistical and frequency analysis of extreme daily maximum rainfall. This scientific contribution has allowed us to focus on the impacts of daily maximum rainfall in the context of climate change in the Ouzoud watershed, which is characterized by a strong spatial and temporal irregularity of maximum rainfall that promotes the appearance of hydrological extremes in the form of floods and floods that each time cause material damage and sometimes human losses. , and a feeling of insecurity among local residents and tourists.

**Keywords:** climate change - climate variability - maximum rainfall - impacts.

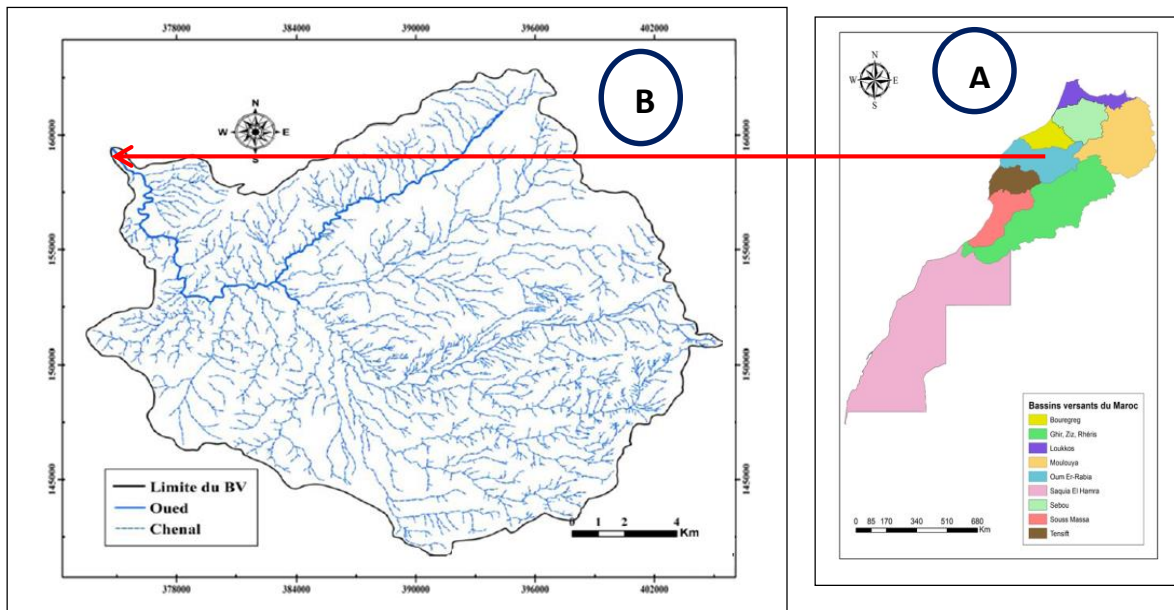
## **1. Introduction :**

Depuis les dernières décennies le changement climatique est devenue un grand problème du monde moderne, La variabilité climatique est un phénomène naturel, mais peut parfois entraîner des conséquences dramatiques dans certaines régions de la planète. Depuis le début des années 1980, la région Sud de la Méditerranée a connu une série d'années sèches (Pachauri et Reisinger 2007). Les pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée sont particulièrement vulnérables à la variabilité climatique car ils sont exposés à une désertification accélérée, à l'aridité du sol et à la raréfaction des ressources en eau dans un contexte de croissance démographique et une demande en eau croissante. De par sa position géographique, Le Maroc n'a pas échappé au changement climatique global (Knipperts et al. 2003 ; Sebbar et al, 2011). Il subit de plein fouet le changement climatique. (Programme d'études « Changement climatique : impacts sur le Maroc et options d'adaptations globales : 2019), il dispose d'un climat aride à semi-aride à forte influence méditerranéenne qui peut être liée à des effets locaux, à une tendance générale, ou en relation avec des phénomènes de plus larges ampleurs. Il est situé dans l'une des régions où les impacts du changement climatique seraient marqués du fait de l'amplification et de l'augmentation de la fréquence des phénomènes extrêmes (les crues et inondations). Notre domaine d'étude ; le bassin versant d'Ouzoud se situe au Haut Atlas Centrale, Il couvre une superficie de 315,6 km<sup>2</sup>, un bassin non aménagé avec un enjeu touristique surtout pendant la période estivale, il est caractérisé par des phénomènes d'orages. On terme de résultats, on note que les pluies maximales journalières et ses influences sur le fonctionnement hydrologique dans le bassin le bassin d'Ouzoud, cette perturbation climatique favorisent l'apparition en permanence des crues éclairs et des inondations, qui touchent l'ensemble du bassin versant et qui entraînent à chaque fois des dégâts matériels et parfois des pertes humains, et un sentiment d'insécurité chez les riverains et les touristes.

## **2. Méthodologie :**

### **2.1. Présentation de la zone d'étude**

Le bassin versant de l'Oued Ouzoud (figure : 1) fait partie du sous bassin de l'Oued El Abid, un des grands affluents de l'oued Oum Er Rbia, il se situe dans la province d'Azilal. Il couvre une superficie de 315,6 km<sup>2</sup>, et il s'étend sur six communes ; cinq communes rurales (Ait Taguella, Tamda Noumarcide, Agoudi n'Lkhir, Tabia, Tanant) et une commune urbaine, (Azilal). Géologiquement le bassin versant de l'oued d'Ouzoud constitué essentiellement par des formations carbonatées, les calcaire et dolomies du Lias inférieur et moyen affleurent sous forme de bandes décimétriques continues, surtout à l'ouest mais aussi ailleurs. (BENCHATTOU et EL GHACHI, 2019) les altitudes sont comprises entre 644m et 2123m mètres. Dans ce contexte le bassin de l'oued d'Ouzoud a reçu à la série du haut Atlas Central avec des ressources en eaux importantes (Benchattou. 2019). Il est soumis à un climat continental, froid en hiver et chaud et sec en été. Il se caractérise par une irrégularité spatiotemporelle des pluies, qui se concentrent en Automne et en Hiver Les pluies sont assez abondantes.



A = carte du Maroc, B = bassin versant de l'oued d'Ouzoud  
 Figure 1 : Localisation du bassin versant de l'oued d'Ouzoud

## 2.2. Données utilisées :

Dans ce travail scientifique on a utilisé les données climatiques, ces données pluviométriques qui ont été collectées et exploitées dans cette étude proviennent de l'Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er-Rbia (ABHOR), et pour bien encadrer cette problématique, nous avons compté sur les plus important techniques et moyens informatiques employés dans l'analyse statistique (Excel) pour extraire des différentes formes et les indices qui expriment les indicateurs du changement climatiques.

<i>STATIONS</i>	<i>ALTITUDE (M)</i>	<i>COORDONNEE X</i>	<i>COORDONNEE Y</i>	<i>PERIODES D'OBSERVATIONS</i>	<i>TYPE STATION</i>
SGATT	1150	377800	136100	1958-2017	PLUVIOMÉTRIQUE (P)
HASSAN 1	825	365500	137300	1975-2017	PLUVIOMÉTRIQUE (P)
SIDI DRISS	640	340800	140600	1968-2017	PLUVIOMÉTRIQUE (P)
OUAOUIRNTH	370	344700	369900	1968-2017	PLUVIOMÉTRIQUE (P)

Tableau 1 : les caractéristiques des stations utilisées

Selon les climatologues il existe plusieurs méthodes pour étudier le phénomène du changement climatique, dans cette contribution scientifique nous avons utilisé une méthodologie consiste à mettre en évidence la variabilité et les tendances climatiques et de voir ensuite leur impacts sur les régimes hydrologiques des cours d'eau du bassin versant de l'oued. On a travaillé sur l'extraction et analyse statistique des pluies maximales journalières extrêmes qui nous a permis de mettre en évidence la variabilité climatique et hydrologique ainsi la caractérisation des tendances hydro climatiques et de différencier les périodes sèches, des périodes humides.

### 3. Résultats et analyse :

#### 3.1. Extraction et analyse des pluies maximales annuelles des stations utilisées (Segat, Hassan1, Sidi Driss et Ouaoourinth) de 1986 à 2017 :

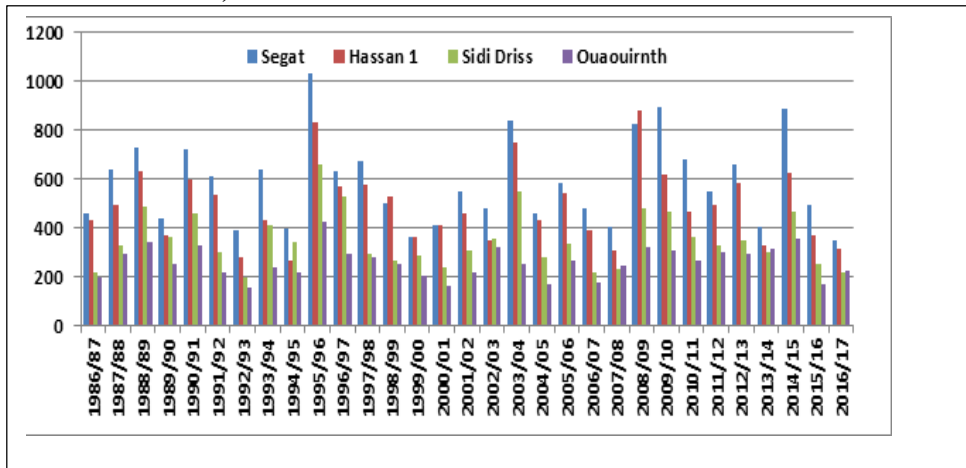


Figure 2: Les précipitations La variation des pluies maximales annuelles des stations utilisées (Segat, Hassan1, Sidi Driss et Ouaoourinth) de 1986 à 2017

Suite à l'analyse de la variation des pluies maximales annuelles on note que le changement climatique influence négativement sur la distribution spatio-temporelle des précipitations, dans ce domaine d'étude on a trouvé que la station de Segat a été marquée une valeur de 1033,5 mm pendant l'année 1995/1996, c'est une valeur très importante et pour bien comprendre l'impact des changements climatiques sur les précipitations et le fonctionnement hydrologique on a travaillé sur l'analyse de la variation des pluies mensuelles durant l'année 1995/1996 pour déterminer le mois qui a connu plus des précipitations et de bien comprendre la distribution des pluies maximales dans les quatre stations utilisées.

#### 3.2 Distribution des pluies maximales mensuelles des stations utilisées (Segat, Hassan1, Sidi Driss et Ouaoourinth) de 1986 à 2017 :

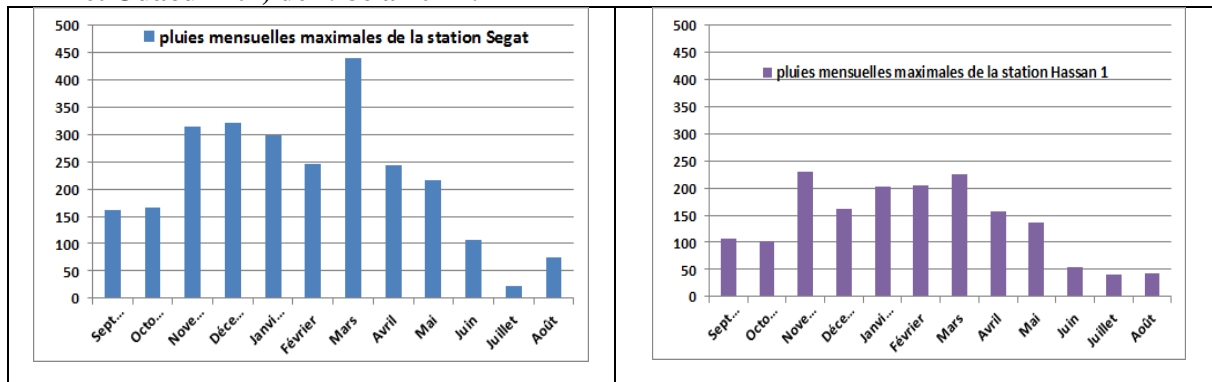


Figure 7: Distribution des pluies maximales mensuelles des stations utilisées (Segat, Hassan1) de 1986 à 2017

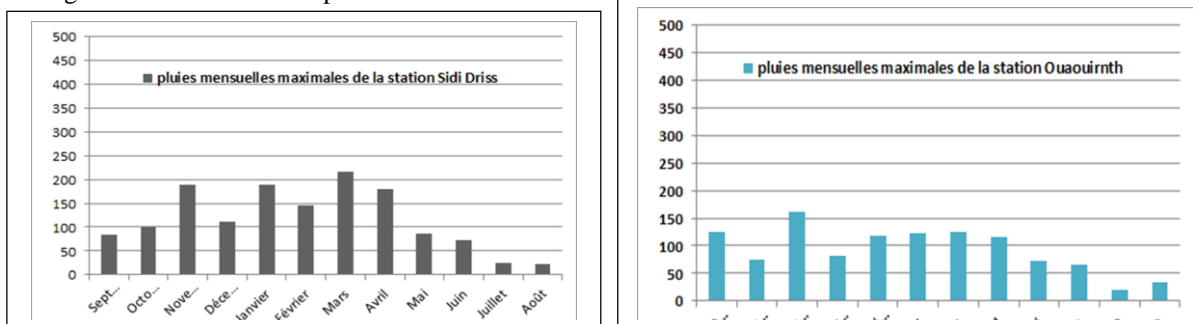


Figure 4: Distribution des pluies maximales mensuelles des stations utilisées (Sidi Driss et Ouaoourinth) de 1986 à 2017



D'après l'analyse de la variation des pluies mensuelles de la station de Segat durant l'année 1995/1996 on a noté que le mois avril a été marqué une valeur de 297,9 mm, et pour bien comprendre l'impact du changement climatique sur le régime des précipitations on a zoomé sur la variation des pluies au niveau journalier au cours de la même année et on a constaté que dans la station de Segat a été marquée une valeur de 134.5 mm c'est une valeur très importante qui avait une influence sur le fonctionnement hydrologique de l'oued d'Ouzoud.

### 3.2 Impact des pluies journalières maximales sur le fonctionnement hydrologique de l'oued d'Ouzoud

Dans le contexte du changement climatique, le bassin versant d'Ouzoud est caractérisé par une forte variabilité des précipitation pluviométriques, cette perturbation climatique (des précipitations pluviométriques concentrées dans le temps et dans l'espace) influence négativement sur le fonctionnement hydrologique de l'oued d'Ouzoud car elle favorise l'apparition des extrêmes hydrologiques sous forme des crues éclairées et des inondations qui entraînent à chaque fois des dégâts matériels et parfois des pertes humains, et un sentiment d'insécurité chez les riverains et les touristes.

### Conclusion et discussion :

Le changement climatique est une réalité largement reconnue aujourd'hui dans la communauté scientifique. Durant les trois décennies, les chercheurs scientifiques du Maroc parlaient de la variabilité climatique, surtout de celle des précipitations. Dans ce travail scientifique, nous travaillons sur la recherche des indicateurs du changement climatique. Nous constatons que le bassin versant d'Ouzoud a connu des précipitations pluviométriques concentrées dans le temps et dans l'espace. Cette irrégularité favorise l'apparition des extrêmes hydrologiques (les crues et les inondations). Ces risques hydrologiques ont constitué durant les dernières années une menace majeur pour le territoire national, surtout pour les zones situées au pied de la montagne comme le cas du bassin d'Ouzoud. Ce dernier est soumis à un climat semi-aride a une variabilité très importante au niveau des précipitations pluviométriques, chose qui influence négativement le fonctionnement de l'oued d'Ouzoud qui peut avoir pour conséquence, des dégâts matériels et parfois des pertes humains, et occasionner un sentiment d'insécurité chez les riverains et les touristes.

### Bibliographie

- Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia, « Etude de Protection contre les inondations, étude hydraulique et propositions d'aménagement ». Rapport d'étude (2002) 51p.
- Ardoin S., Lubès-Niel H., Servat E., Dezetter A., Boyer J.F., 2003, « Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest : caractérisation de la situation de la décennie 1990 », IAHS Publication, vol. 278, 223-228.
- El Ghachi M., Aafir M., Bouberria A., « Analyse des tendances pluviométriques dans la ville de Taza dans un contexte de variabilité climatique », Publications des actes du colloque (2011) 16.
- El Ghachi M., Aafir M., Bouberria A., « Analyse des tendances pluviométriques dans la ville de Khénifra dans un contexte de variabilité climatique », JMES, Publication, J. Mater. Environ. Sci. 6 (11) (2015) 3346-3358
- BENCHATTOU A., El Ghachi M., « Les crues éclair dans les bassins montagnards non aménagés : suivi, mesures, extractions et analyse, cas du bassin versant de Ouzoud » mémoire du master (2019). Soutenu le 20 Juillet 2019.

- Sachin Patade, Sonali Shete, Neelam Malap, Gayatri Kulkarni, T.V. Prabha., «Observational and simulated cloud microphysical features of rain formation in the mixed phase clouds observed during CAIPEEX». 169, Part A (2016) 32-45.
- Gaume, E.( 2002) : «Elément d'analyse sur les crues éclairées » , thèse de doctorat, Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique. 359 p.
- ALIFRIQUI, M.(2005) : « Problèmes de la Forêt et Voies de Valorisation des Ressources Naturelles », projet de préservation de l'écosystème SIBE des cascades d'Ouzoud MOR/98/G52-MOR/03/06. De l'Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences - Semlalia Marrakech, programme des Micro-financements du Fonds de l'Environnement Mondial (PMF/FEM), 95 p.
- Habert, A.( 2005) : « Contribution à un plan de gestion de la vallée et des cascades d'Ouzoud : Eléments généraux- Etudes hydrogéologique, hydrologique, de la qualité physique des eaux et des impacts anthropiques », rapport de stage, DESS GIREC, université de METZ, 82 p.
- El Ghachi, M. (2007) : « La seille: un système fluvial anthropisé (lorraine, France) Tome 1 ». Thèse du 3eme cycle, Université Paul Verlaine de METZ, France .344p.
- LABORDE, J.P. 2000, « Eléments d'hydrologie de surface », cours, Université de Nice - Sophia Antipolis, 204 pages. [www.khayma.com/hydraulique/Cours%20HydrologieJPL.pdf](http://www.khayma.com/hydraulique/Cours%20HydrologieJPL.pdf)

# TENDANCES ET VARIABILITE DES PLUIES EXTREMES AU MAROC SEPTENTRIONAL (1976-2016) : ANALYSE PAR DES INDICES CLIMATIQUES CALCULES

Bouaiche A., Lotfi N., Chair M., Karrouk M-S.

Laboratoire des Changements Environnementaux et Aménagements Territorial, FLSH Ben M'Sick Université Hassan II de Casablanca, Maroc, [Bouaiche.aissam.uh2.lceat@gmail.com](mailto:Bouaiche.aissam.uh2.lceat@gmail.com) & [ClimDev.Maroc@gmail.com](mailto:ClimDev.Maroc@gmail.com)

**Résumé :** *les pluies extrêmes sont des aléas météorologiques qui causent beaucoup de dégâts matériels et de nombreuses pertes en vies humaines. L'évaluation et l'estimation des pluies extrêmes est donc d'un grand intérêt pour anticiper des catastrophes, telles que des inondations. Le but de cet article est d'estimer les tendances et la variabilité des pluies extrêmes au Maroc septentrional. Pour ce faire, les indices extrêmes ont été calculés sur la base des observations quotidiennes des précipitations en utilisant une approche recommandée par l'équipe d'experts sur la détection des changements climatiques et les indices. Ces tendances ont été calculées pour 12 postes pluviométriques également répartie sur la zone étudiée pour la période allant de 1976 à 2016. L'examen des indices de précipitations sont en général, statistiquement peu significatifs et révèlent des tendances mixtes. On a des tendances vers l'augmentation se trouvent surtout sur le littoral, et dans la zone montagneuse à l'extrêmes nord et au centre-ouest et une tendance vers la baisse (sécheresse) à l'Est et le Sud-Est.*

**Mots clés :** *Pluies, extrêmes tendance, Maroc Septentrional*

**Summary:** *The extreme rainfalls are the weather hazards that cause much damage and many casualties. The evaluation and the estimation of rainfall is therefore of great interest to anticipate disasters such as floods and allow thoughtful planning of the territory. This paper proposes to evaluate the extreme rainfalls in Northern Morocco. The indices were calculated based on daily amounts of precipitation. These trends were calculated at 12 weather stations equally distributed over the study area for the period from 1976 to 2016. In general the trends for precipitation indices are much. Signification increases in heavy precipitation events have been noticed at a few locations in the coast, and in the mountainous area in the far north and center-west a downward trend (drought) in the east and south-east.*

**Key words:** *Rain, extreme, trends, northern Morocco*

## Introduction

Les événements météorologiques extrêmes notamment les pluies sont généralement décrites par différents attributs : taux d'occurrence, magnitude, durée, structure spatiale et dépendances multivariées (Goubanova K, 2007). Au Maroc septentrional, les pluies extrêmes impactent principalement les systèmes naturels et humains. Elles ne causent nécessairement pas de dommages, mais leur impact est lié surtout à la vulnérabilité des lieux et des personnes touchés (Khomsi K. 2014 ; Filahi et al, 2015).

Selon Goubanova K, (2007) tous ces différents types d'événements climatiques peuvent représenter des écarts importants à la normale climatologique, et être qualifiés comme extrêmes. Cependant, il n'est pas possible de donner une définition universelle de l'événement climatique extrême. La définition appropriée ne peut être choisi qu'en fonction du contexte dans lequel on considère tel ou tel phénomène. Et dans ce contexte Beniston et Stephenson (2004), proposent deux définitions du phénomène climatique extrêmes, qui reposent sur différentes notions :

- La définition peut être basée sur la rareté d'un phénomène climatique, on doit donc considérer sa fréquence d'occurrence ;
- Elle peut également être basée sur l'intensité d'un phénomène ; ceci implique la considération des dépassements d'un seuil par des variables climatiques associées à ce phénomène ;
- Enfin on peut introduire la notion d'impact et s'appuyer sur des dégâts socio-économiques causés par un phénomène.

Cette contribution propose d'étudier et d'évaluer la fréquence et la gravité des pluies extrêmes et leurs évolutions au cours des dernières décennies au Maroc septentrionale (1976-2016).

## 1. Situation, données et méthodes

### 1.1. Présentation de la zone d'étude

La zone étudiée s'étend sur plus de 335000 km<sup>2</sup> environ, entre 36° et 30° Nord, 10° à 1° Ouest, c'est une vaste région de transition entre la zone tempérée et la zone tropicale, avec deux façades maritimes, l'une sur l'océan atlantique et l'autre sur la mer Méditerranée (Sebbar et al. 2011). A l'intérieur, elle est dominée par des chaînes de Montagnes : Rif, Moyen Atlas, Haut Atlas (3000 à 4000 m) et Anti-Atlas, étalées sur un axe orienté NE-SO qui subdivise la zone d'étude en deux parties : une partie, à l'ouest et au nord des reliefs, qui subit les influences des perturbations nord-Atlantiques et une partie orientale et anti-Atlasique ou les influences du sud-est dominant. Selon Sebbar et al, (2012) la moyenne des pluies annuelles décroît du nord au sud et d'ouest en est de la zone étudiée. Elle varie en moyenne entre 1300mm/an au Nord, particulièrement aux hautes altitudes et moins de 150mm / an au sud désertique (fig. 1).

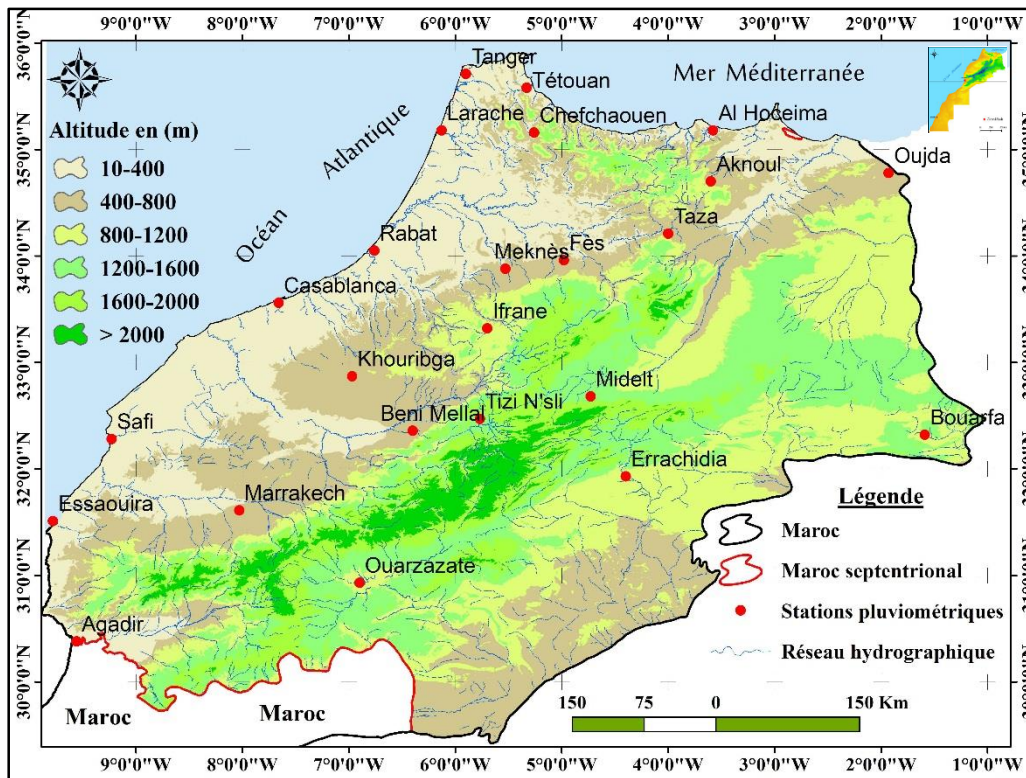


Figure 1. Présentation de la zone d'étude (Maroc septentrional).

## 1.2. Source des données

Tout d'abord, cette recherche est basée sur l'exploitation des données pluviométriques fournies par la direction Générale de la Météorologie (DGM). Elle se compose de cumuls pluviométriques journaliers issus de 39 stations météorologiques existantes. Nous avons choisi seulement 12 pour notre recherche en raison de leur longueur d'enregistrement de 1976 à 2016 répartis sur l'ensemble du territoire de la zone d'étude (Maroc septentrional) (Tab. 1).

Les indices considérés font partie d'une liste-standard des indices extrêmes. L'utilisation de ces indices pour la détection du changement climatiques représente plusieurs avantages. D'une part, ces indices peuvent être appliqués à différents paramètres et permettent la comparaison des tendances entre régions. D'autre part, ils sont compréhensibles et facilement exploitables dans l'étude des impacts de ces pluies sur la population et sur le territoire. Ces indices sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 1. Les données géographiques et pluviométriques des stations retenues ; données : Direction Générale de la Météorologie (DGM)

Station	Range	Long <sup>(°)</sup> .	Lat <sup>(°)</sup> .	Alt <sup>(m)</sup>	P. annuelle moyenne
Tanger	1	5°,90'	35°,73'	21	800
Rabat	2	6°,77'	34°,05'	75	534
Casablanca	3	7°,67'	33°,57'	62	425
Fès	4	5°,00'	34°,02'	415	500
Taza	5	4°,01'	34°,22'	510	710
Beni Mellal	6	6°,40'	32°,36'	468	420
Marrakech	7	8°,03'	31°,62'	466	240
Agadir	8	9°,56'	30°,30'	23	245
Tétouan	9	5°,33'	35°,78'	10	700
Al Hoceima	10	3°,55'	34°,14'	51	310
Oujda	11	1°,93'	34°,78'	470	325
Ouarzazate	12	6°,90'	30°,93'	1136	150

Tableau 2. Indices utilisés pour la caractérisation des événements pluvieux extrêmes ; Données : <http://eccma.seos.uvic.ca/ETCCDI/>

Indice	Description et calcul	Source de l'indice	Unité de mesure
Pn05mm	Le nombre total des jours avec cumul $P \geq 0.5\text{mm}$	ETCCDI <sup>(*)</sup>  (*) : l'équipe d'experts sur la détection des changements climatiques	[jours]
R10mm	Jours de fortes précipitations $\geq 10\text{mm}$ .		
R20mm	Jours de très lourdes précipitations $\geq 20\text{mm}$ .		
RX1day	Le plus grand cumul pluviométrique journalier.		[mm]
RX5day	Maximum des précipitations cumulées sur 5jours		
P95p	Précipitation causées par des jours très humides ( $\geq 95^{\text{ème}}$ percentile).		
SDII	Indice simple d'intensité quotidienne : quantité de précipitations moyennes par jour de pluie.		

### 1.3. Méthodologie de l'étude

Les événements climatiques extrêmes notamment les pluies définis comme des événements dont la probabilité est inférieure à 10%, c'est-à-dire ayant une faible probabilité d'apparition et par conséquent rares (Hanchan M, 2016). Pour ce faire une approche statistique a été appliquée dans l'étude des pluies extrêmes,

Cette approche est basée sur sept (7) indices climatiques calculés (Tab. 2) à partir du réseau synoptique des stations météorologiques de la Direction Générale de Météorologie (DGM). L'équipe d'experts sur la détection des changements climatiques et les indices (ETCCDI) ont facilité l'analyse de ces pluies extrêmes en définissant un ensemble d'indices climatiques et un logiciel (*RClimDex*) qui les calcule (Filahi S et al, 2015).

## 2. Résultats et discussions

### 2.1. Tendances pluviométriques observées au Maroc septentrional

L'indice de précipitation (pn05mm) appliqué à deux zones différentes en fonction des caractéristiques climatiques à l'Est et au Sud-est, indique qu'il y a une nette divergence dans les

résultats obtenus. Cette différence concerne principalement le nombre total de jours avec plus de 0,5 mm de pluie. Dans la station d'Oujda à l'est, cet indice se caractérise par une tendance à la baisse depuis 1990, et une régression significative du nombre de jours où les précipitations dépassent 0,5mm. Cependant, cette station a de nouveau enregistré au cours de l'année 1997 le plus grand nombre de jours avec des précipitations de plus de 0,5 mm (fig. 2A).

En revanche, dans la station d'Ouarzazate au sud-est, une tendance à la hausse a été enregistrée pour cet indice (pn0.5mm) depuis 1996 (29 jours) .Cependant, au cours de l'année 1984, cette station a enregistré la moyenne la plus faible pour le nombre de jours dépassant 0,5 mm (fig. 2B). Mais de manière générale, on constate que la station d'Oujda a connu une régression de cet indice d'un taux compris entre 0,18 et 0,19, contrairement à une évolution tangible pour la station d'Ouarzazate, puisqu'elle est passée de 0,21 à 0,39 puis à 0,60.

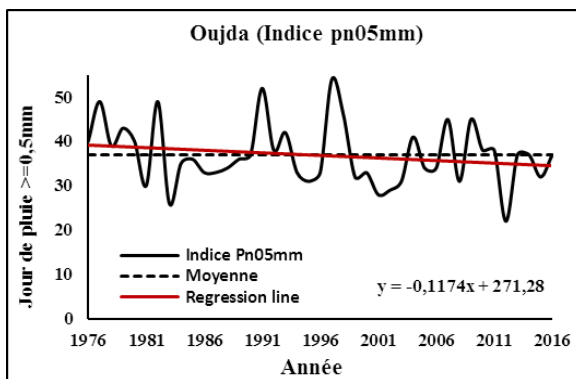


Figure 2A. Tendance du nombre de jour de pluie supérieur au pn0.5mm à Oujda de 1976-2016

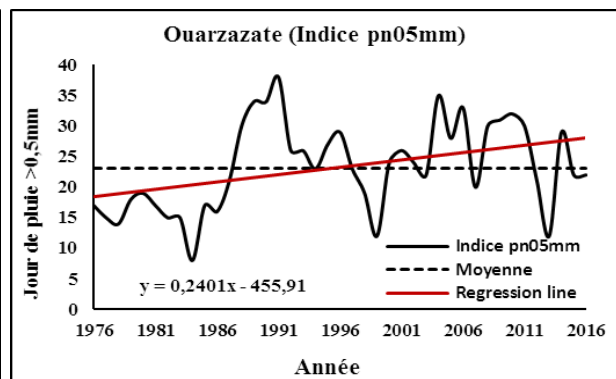


Figure 2B. Tendance du nombre de jour de pluie supérieur au pn0.5mm à Ouarzazate de 1976-2016

Ce qui distingue cet indice au sein des deux stations (Tanger et Rabat), c'est la fluctuation entre les années qui ont enregistré un nombre de jours supérieur ou égal à 10 mm. Au niveau de la station de Tanger, cet indice a connu une certaine stabilité au cours de la période étudiée, avec une légère diminution (fig. 3A). Contrairement à la station de Rabat, qui a enregistré 17 jours de plus que la moyenne, si bien que les années au-dessus de la moyenne restent 22 ans contre 19 ans seulement. Les augmentations varient de 0.09mm/j à 0.50mm/j par décennie dans les deux stations. Par contre les diminutions sont relativement faible (ne dépassent 0.01mm/j par décennie) (fig. 3A et B).

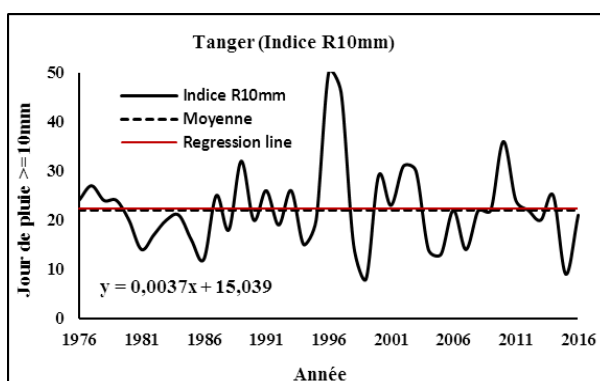


Figure 3A. Tendance du nombre de jour de pluie supérieur au R10mm à Tanger de 1976-2016

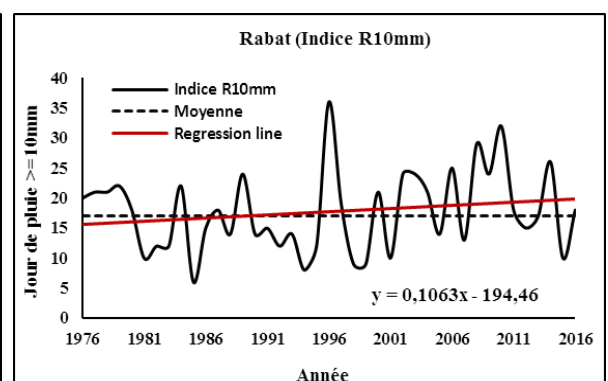


Figure 3B. Tendance du nombre de jour de pluie supérieur au R10mm à Rabat de 1976-2016

L'analyse des figures 4A et 4B indique également une tendance à la hausse des nombres de jours de pluie supérieure au égale 20 mm (R20mm) dans les deux stations (Tétouan et Al Hoceima). La station de Tétouan a enregistré au cours de l'année 1996 le plus grand nombre de ces jours de pluie, alors que dans la station d'Al Hoceima, le nombre total de jours a atteint 189 jours, enregistrant plus de 20 mm, alors on peut dire que cette évolution connaîtra une progression de 0,41mm de 1976 à 0,58mm en 2000.

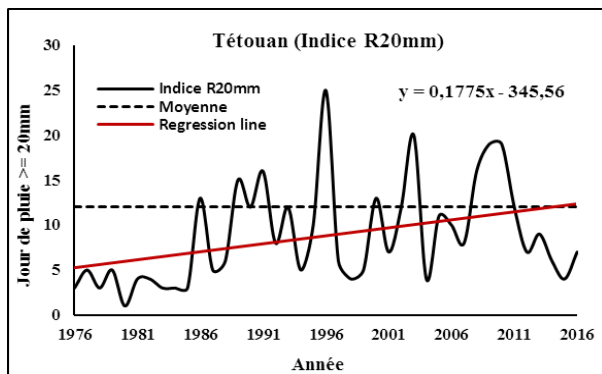


Figure 4A. Tendence du nombre de jour de pluie supérieur au R20mm à Tétouan de 1976-2016

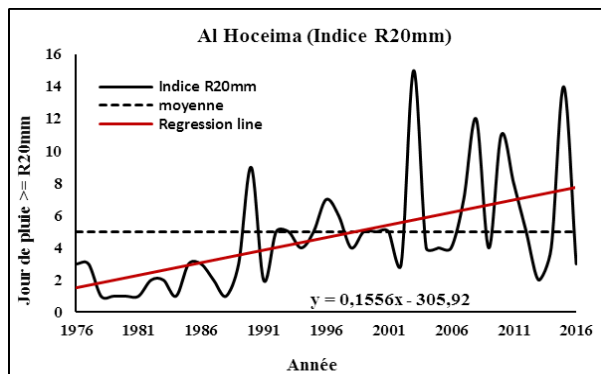


Figure 4A. Tendence du nombre de jour de pluie supérieur au R20mm à Al Hoceima de 1976-2016

Rare sont les tendances significatives positives révélées par l'indice RX1day. Par conséquent, les événements pluviométriques extrêmes selon cet indice restent relativement faibles, à l'exception des (7) stations, Safi (4.19mm-5.12mm) et Essaouira (5.86mm-6.89mm) sur les côtes de Safi-Essaouira, et au sud-ouest à la station d'Agadir (5,86mm-6,89mm). Al Hoceima au nord-est, Tétouan-Chefchaouen au nord, puis Ifrane, où la valeur de cet indice variait entre (5,12mm) et (5,86mm) (Fig. 5). Par contre trois (03) stations uniquement pour l'indice (RX5day), avec une tendance à la hausse entre 3.81 mm et 7.19mm (fig. 5).

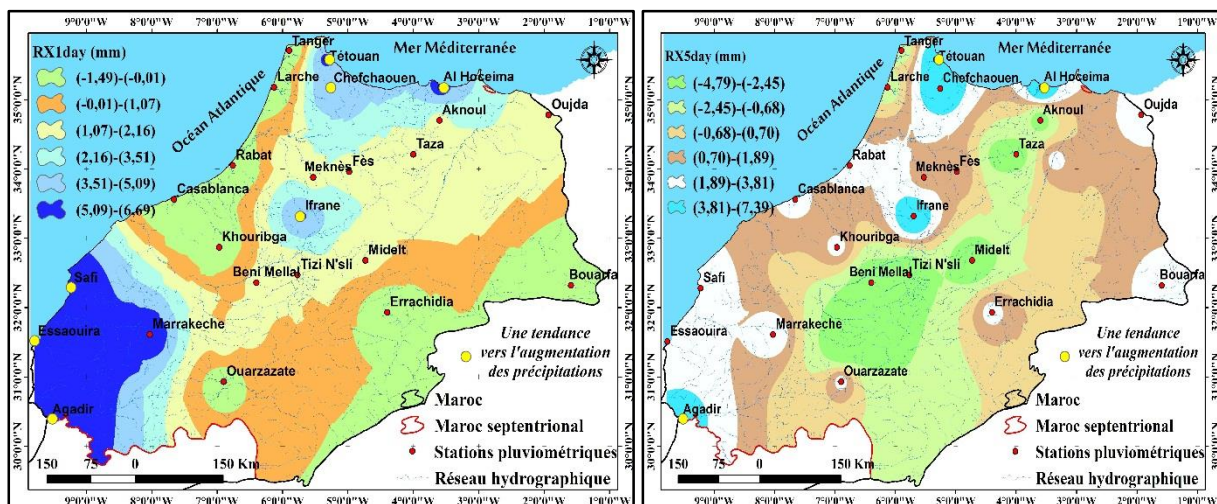


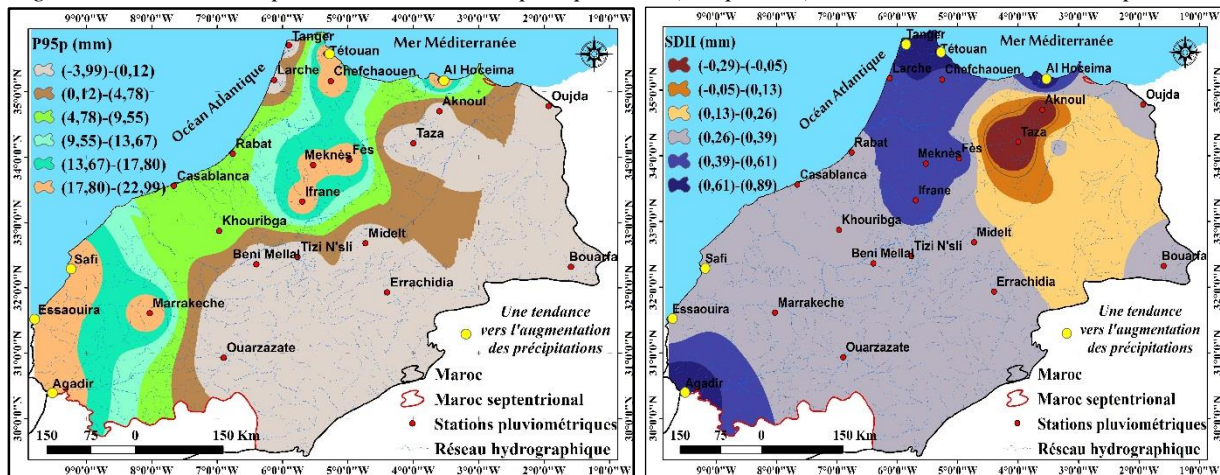
Figure 5. Distributions spatiales des indices de précipitations (RX1day, RX5day), de 1976 à 2016 au Maroc septentrional

L'indice de précipitation (R95p) représente les précipitations causées par les jours très humides (plus de 95%). Les résultats de cet indice montrent la présence de (05) stations uniquement avec une évolution positive (à la hausse), au sommet se trouvent les stations d'Agadir, Essaouira et Safi dans la bande atlantique (14.93mm-17.27mm). Ensuite, nous trouvons les stations d'Al Hoceima et de Tétouan, où les résultats de cet indice variaient entre (19,71mm) et (22,99mm) (fig.6).

En revanche, l'indice simple d'intensité quotidienne (quantité de précipitations moyennes par jour de pluie ; SDII) incluait (06) stations avec une tendance positive, dont la plupart donnent sur la mer. Dans l'axe atlantique, on retrouve la station de Tanger, avec une augmentation statistique comprise entre 0,7mm et 0,8 mm. Dans la même bande, les stations de Safi et Essaouira ont pu réaliser une évolution positive statistiquement limitée entre (0,2 et 0,3 mm). La station d'Agadir a également été incluse dans cette évolution, car elle a atteint un seuil compris entre (0,5mm-0,7 mm). Quant à la station d'Al Hoceima dans le nord-est, cet indice a atteint une augmentation

positive comprise entre (0,7-0,8 mm), et la même signification statistique a été obtenue avec la station de Tétouan (fig.6).

Figure 6. Distributions spatiales des indices de précipitations (R95p, SDII) de 1976 à 2016 au Maroc septentrional



## Conclusion

À la lumière de tout ce qui précède, nous pouvons conclure un ensemble de points clés liés à ces indices. Les résultats obtenus grâce à la distribution spatiale et statistique des indices pluviométriques, qui ont été appliqués aux données pluviométriques, de certaines stations de la zone d'étude. montre que les régions situées à l'extrême nord-ouest, et la région d'Agadir font partie des zones qui ont connu une tendance positive, du niveau des évènements de très fort précipitations, mais avec une signification statistique parfois modérés. Cela a grandement contribué à l'augmentation des accumulations de pluie pendant la saison hivernale, qui à son tour a contribué à la survenue de nombreuses inondations sur certaines zones urbaines.

## Bibliographie

- Beniston M., Stephenson D., 2004: Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Global and Planetary Change*, 44 : pp. 1-9.
- Filahi S., Mouhir L., Tanarhte M., Trambly Y., 2015 : Tendence et variabilité des évènements extrêmes au Maroc. Actes du XXVIIIème colloque de l'association internationale de climatologie, Liège 2015. pp 463-368.
- Gobanova K., 2007 : Une étude des évènements climatiques extrêmes sur l'Europe et le bassin Méditerranéen et leur évolution future. *Doctorat de thèse de l'université Paris 6*, pp.120-121.
- Hanchan M., 2016 : de l'explication météorologique à l'analyse des pluies rares : cas de la situation météorologique de la période 19-24 novembre 2014 (exemple de la station d'Agadir). Volume dédié aux actes du colloque organisé par l'Association Nationale des Géographes Marocaines. Rabat. Pp 34-44.
- Hangnon H., Delongueville F., Ozer P., 2015 : Précipitations extrêmes et inondations à Ouagadougou : quand le développement urbaine et mal maitrisé. *Actes du XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Liège 2015. pp 497-502.
- Khomsy K., 2014 : variabilité hydro-climatique dans les bassins versants du Bouregreg et du Tensift au Maroc : moyennes, extrêmes et projections climatiques. *Thèse de doctorat. Faculté des Sciences Rabat. Université Mohamed V rabat*. 218 pages.
- Sebbar A., Badri W., Foughrach H., Hsaine M., Saloui A., 2011 : Etude de Variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004), *Revue Sécheresse*. Volume 22, n° :3. pp. 139-148.



# CARACTERISATION DE LA SECHERESSE CLIMATIQUE DE LA REGION CASABLANCA-SETTAT (MAROC) (1980/2018).

Boubekri A.<sup>1</sup>. Saloui A.<sup>2</sup> et filali A.<sup>3</sup>

1-Etudiant-chercheur à l'Université Hassan II - Casablanca – sifa019@gmail.com

2-Enseignant-chercheur à l'Université Hassan II – Casablanca- saloui.abdelmalik@gmail.com

3-Enseignant-chercheur à la faculté Polydisciplinaire, Khouribga- elfilalihakim@gmail.com

**Résumé :** La Sécheresse représente le risque majeur pour l'agriculture marocaine surtout dans le domaine pluvial qui occupe plus de 85% de la superficie cultivée. En effet, les différentes régions du Maroc ont connu des périodes d'intenses variabilités pluviométriques caractérisées par une diminution remarquable des pluies (Sécheresse) avec des conséquences négatives sur l'économie et l'environnement, dont la région de Casablanca Settat fait partie. Cette dernière appartient au Maroc atlantique avec un climat semi-aride a été exposée plusieurs fois à des épisodes de sécheresse sévère ces dernières années.

L'objectif de cette étude est de caractériser la sécheresse climatique (durée, intensité et fréquence) au niveau de la région Casablanca Settat pour la période 1980-2018 à travers le calcul de l'indice standardisé des précipitations (ISP) pour les six stations étudiées : Casablanca, Settat, El Jadida, Oued El Maleh, Berrechid et Sidi Bennour.

**Mots clés :** variabilité climatique, Sécheresse, indice de précipitation normalisé (SPI), région de Casablanca-Settat

**Summary:** Drought represents the major risk for Moroccan agriculture especially in the rain field which occupies more than 85% of the cultivated area. Indeed, the different regions of Morocco have experienced periods of intense rainfall variability characterized by a remarkable decrease in rainfall (Drought) with negative consequences on the economy and the environment, of which the Casablanca Settat region is a part. The latter belongs to Atlantic Morocco with a semi-arid climate has been exposed several times to episodes of severe drought in recent years.

The objective of this study is to characterize the climatic drought (duration, intensity and frequency) at the Casablanca Settat region for the period 1980-2018 through the calculation of the standardized precipitation index (SPI) for the six stations studied : Casablanca, Settat, El Jadida, Oued El Maleh, Berrechid et Sidi Bennour.

**Keywords:** Climate Variability, Drought, Standardized Precipitation Index (SPI), Casablanca-Settat Region

## Introduction

La sécheresse a toujours été présente dans l'histoire du Maroc, elle s'est imposée avec force ces dernières décennies en tant qu'élément structurel du climat du pays. Il s'agit d'un phénomène normal qui peut survenir sous n'importe quel climat n'importe où dans le monde, même dans les déserts et les forêts tropicales. Les sécheresses se classent parmi les dangers naturels les plus coûteux d'une année sur l'autre ; elles ont des conséquences considérables et étendues, qui touchent en même temps une multitude de secteurs économiques et une large population. Les superficies affectées sont généralement plus vastes que ce n'est le cas pour d'autres phénomènes (OMM, 2016). Par ailleurs, durant ces dernières décennies, le prolongement des épisodes secs est devenu une réalité dans le bassin méditerranéen, notamment le Maroc (Sebbar et al. 2011).

Afin de s'adapter à ce phénomène structurel et de le prendre en compte dans les plans de développement, notamment dans le secteur agricole. Il doit être soigneusement étudié en termes de densité, de fréquence et d'autres caractéristiques. Et c'est l'objet de cette étude, qui a tenté d'étudier les caractéristiques de ce phénomène à travers l'indice standardisé des précipitations (ISP), reposant sur des stations réparties de manière à s'adapter à l'étendue géographique de la zone d'étude et en termes de diversité topographique.

## 1. Données et Méthodes

### 1.1 Cadre de l'étude

La zone d'étude correspond à la région Casablanca Settat, qui s'étend sur une superficie de 19448 km<sup>2</sup> (2,7% du territoire marocain). Elle est limitée au Nord-Est par la région de Rabat-Salé-Kenitra, à l'Est par la région de Beni Mellal-Khénifra, au Sud par la région de Marrakech-Safi et au Nord et à l'Ouest Par l'Océan Atlantique.

La zone fait partie du domaine atlantique, caractérisé par un cadre géographique très varié composé de 3 zones naturelles :

- La mer avec le littoral : d'un littoral qui s'étend sur 235 km environ.
- Le relief se compose de plaines et de plateaux avec de petites collines éparpillées dans le territoire limitrophe aux villes de Casablanca et d'El Jadida
- Le Sahel est une région constituée d'une alternance de dépression et de dunes consolidées. Il fait partie du domaine semi-aride. Les sols y sont en général médiocres.

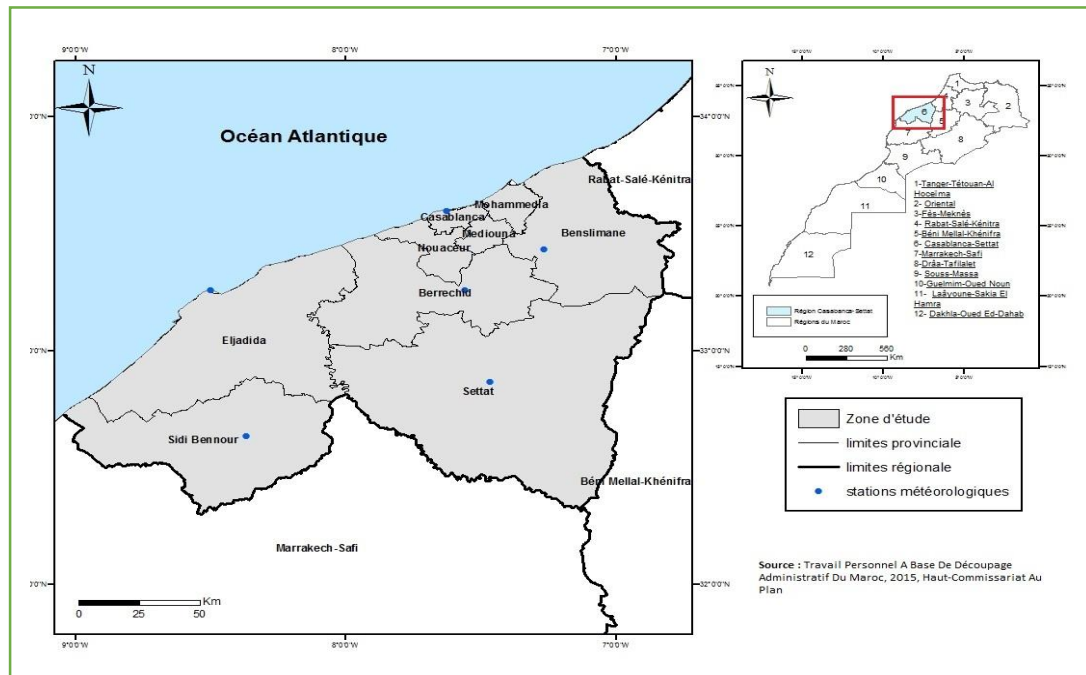


Figure 1. Localisation de la zone d'étude avec les stations météorologiques.

## 1.2. Données

Les données pluviométriques qui ont été collectées et exploitées dans cette étude, proviennent de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) et les Direction Provinciale de l'Agriculture (DPA). Les caractéristiques des différentes stations utilisées dans cette étude sont données dans le tableau 1 :

Tableau 1 : Caractéristiques des différentes stations pluviométriques

Non de station	Latitude	Longitude	Taille de series (ans)	PMA (mm)	Ecart type
CASABLANCA	33.57	-7.67	39	401	156
EL JADIDA	33.23	-8.52	39	403	145
SETTAT	33.01	-7.40	39	319	119
OUED EL MALEH	33.30	-7.19	33	372	152
BERRECHID	33.18	-7.37	37	344	129
SIDI BENNOUR	32.72	-8.61	35	263	116

### 1.3. Méthodes

Deux méthodes ont permis de traiter et d'analyser les caractéristique De La Sécheresse Climatique De la région Casablanca Settat. Il s'agit de l'indice standardisé des précipitations (ISP), et le vecteur régional.

#### 1.3.1. L'indice standardisé des précipitations (ISP)

L'indice standardisé des précipitations (ISP) est basé sur des calculs statistiques des précipitations pendant une longue période (30 ans au moins). L'ISP est développé en 1993 par McKee, N.J. DOESKEN & J. KLEIST de l'Université de l'Etat du Colorado, pour la détermination des déficits pluviométriques. C'est un indice très important, puissant et simple à calculer. Les données sur les précipitations constituent en fait le seul paramètre requis. En outre, l'indice ISP se révèle tout aussi efficace pour analyser les périodes ou cycles humides que les périodes ou cycles secs. Cet indice est calculé par la formule suivante :

$$ISP = \frac{(Pa - Pm)}{\sigma P}$$

Où *ISP* est l'indice standardisé des précipitations de l'année *a*, *Pa* la pluviométrie de l'année *a*, *Pm* la pluviométrie annuelle moyenne (1980-2018) et  $\sigma P$  l'écart-type sur la même période.

#### 1.3.2. Le vecteur régional

La méthode du Vecteur Régional (MVR) a été établie par Hiez (1977), et améliorée par Brunet-Moret (1979 ; 1994). cette méthode a permis de mettre en évidence la qualité des données. Dans un premier temps, elle permet aussi, de comparer géographiquement et de corrélérer les données d'une station avec les autres stations les plus proches. Dans un deuxième temps, la méthode du vecteur régional permet, d'une part, la critique de l'information et d'autre part, sa synthèse (Laaroubi, 2007, cité par Bodian, 2011). Cette méthode a été mise en œuvre dans le logiciel "Hydraccess", à partir des données des pluies mensuelles des stations utilisées pour la période retenue ( tableau 2 et figure2).

## 2. Résultats

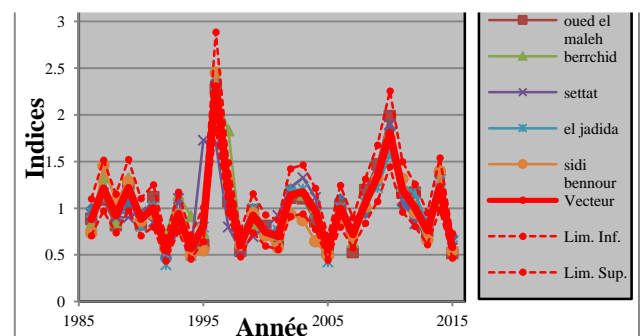
### 2.1. Homogénéisation des données

La corrélation avec le vecteur régional pour chaque station montre que la qualité est supérieure à 8/10 pour toutes les stations (tableau 2). Pour chaque station considérée, il est possible de calculer le rapport entre l'indice trouvé pour la station et l'indice régional. La moyenne des rapports ainsi établis, fournit un coefficient permettant de calculer, pour chaque année, les précipitations annuelles à la station, à partir des précipitations connues pour l'ensemble de la région.

Tableau 2 : Résultats des paramètres du vecteur régional

station	Coef. Variation	Moy. Obs.	Moy. Calculée	Corrél. /Vecteur	Qualité (/10)
Casablanca	0,386	417,5	420,9	0,969	9,2
Oued El Maleh	0,412	375,3	382,3	0,969	9,3
Berrechid	0,37	363,8	349,9	0,92	9,2
Settat	0,356	337,6	340,3	0,774	8,3
El Jadida	0,372	410,4	410,8	0,974	9,5
Sidi Bennour	0,445	270,6	280,8	0,954	8,9

Figure 2. Vecteur des indices annuels de précipitation et indices des stations utilisées (1980-2018)



## 2.2. Sécheresse Climatique De la région Casablanca Settat (ISP)

Au niveau de la région Casablanca-Settat, l'évolution des degrés de sévérité de la sécheresse a été analysée en utilisant l'indice standardisé des précipitations (ISP) calculé à partir d'une série pluviométrique entre 33 et 39 ans, au cours de la période 1980-2018.

En analysant les résultats d'un indicateur pour les stations côtières et proches des côtes, nous déduisons ce qui suit :

- Le nombre d'années sèches est presque identique à celui des années humides, principalement en raison de l'ouverture de ces stations aux effets marins (tableau 3 et 4).
- La fréquence des années très humides presque tous les 20 ans, doit être prise en compte dans la construction d'infrastructures. Malgré la rareté de ces phénomènes extrêmes, ils peuvent causer des dégâts importants.
- Les années humides proches du taux annuel de précipitations sont fréquentées tous les trois ans (Casablanca), tandis que les années sèches résonnent tous les deux ans (figure 3 et 4).
- Les deux stations connaissent la fréquence de la sécheresse sévère à un rythme d'environ une fois tous les 40 ans.
- Les stations côtières ont connu la plus longue sécheresse entre 1980 et 1986 ainsi qu'entre 2003 et 2007, tandis que la région a connu la plus longue période d'humidité entre 2008 et 2011.

Tableau 3 : Probabilité d'occurrence de stations climatiques du Casablanca (1980-2018)

Indice ISP	Catégorie	Nombre d'année	La proportion des années sèches et humides (%)	fréquence
2 < ISP	Humidité extrême	2	46	1 fois tous les 20ans
1.5 < ISP < 1.99	Humidité sévère	1		1 fois tous les 40ans
1 < ISP < 1.49	Humidité modérée	2		1 fois tous les 20ans
0 < ISP < 0.99	Humidité légère	13		1 fois tous les 3ans
0 < ISP < -0.99	Sécheresse légère	18	54	1 fois tous les 2ans
-1 < ISP < -1.49	Sécheresse modérée	2		1 fois tous les 20ans
-1.5 < ISP < -1.99	Sécheresse sévère	1		1 fois tous les 40ans
ISP < -2	Sécheresse extrême	0		Pas d'occurrence

Tableau 4 : Probabilité d'occurrence de stations climatiques d'El Jadida (1980-2018)

Indice ISP	Catégorie	Nombre d'année	La proportion des années sèches et humides (%)	fréquence
2 < ISP	Humidité extrême	1	51	1 fois tous les 40ans
1.5 < ISP < 1.99	Humidité sévère	1		1 fois tous les 40ans
1 < ISP < 1.49	Humidité modérée	1		1 fois tous les 40ans
0 < ISP < 0.99	Humidité légère	17		1 fois tous les 2ans
0 < ISP < -0.99	Sécheresse légère	14	49	1 fois tous les 3ans
-1 < ISP < -1.49	Sécheresse modérée	2		1 fois tous les 20ans
-1.5 < ISP < -1.99	Sécheresse sévère	3		1 fois tous les 12ans
ISP < -2	Sécheresse extrême	0		Pas d'occurrence

Pour les stations internes, il est clair en analysant les résultats que :

- Le nombre d'années sèches dépasse les années humides à un taux d'environ 60%, avec une année sèche plus d'une fois tous les deux ans (tableau 5 et 6).

- La fréquence des années très humides une fois tous les 12 à 18 ans environ dans les stations de Berrchid, Settât et Sidi Bennour et une fois tous les 40 ans. Ceci doit être pris en compte dans les plans de développement.
- Entre 1981 et 1989, le Maroc a enregistré la plus longue sécheresse avec laquelle le Maroc a été contraint de s'engager dans une politique d'austérité, raison par laquelle le pays a connu une importante migration rural (figure 5 et 6).
- En 1996, des précipitations exceptionnelles ont été enregistrées, la moyenne annuelle doublant deux à trois fois, reflétant positivement la saison agricole, et affectant négativement plusieurs zones qui ont été touchées par les inondations.
- Les stations internes connaissent la fréquence des sécheresses sévères à un rythme en moyenne d'environ une fois tous les 20 ans.

Tableau 5 : Probabilité d'occurrence de stations climatiques du Settât (1980-2018)

Indice ISP	Catégorie	Nombre d'année	Nombre de fois sur 100 ans	fréquence
2 < ISP	Humidité extrême	3	41	1 fois tous les 12ans
1.5 < ISP < 1.99	Humidité sévère	0		Pas d'occurrence
1 < ISP < 1.49	Humidité modérée	3		1 fois tous les 12ans
0 < ISP < 0.99	Humidité légère	10		1 fois tous le 4ans
0 < ISP < -0.99	Sécheresse légère	16	59	1 fois tous les 2.5ans
-1 < ISP < -1.49	Sécheresse modérée	5		1 fois tous les 8ans
-1.5 < ISP < -1.99	Sécheresse sévère	2		1 fois tous les 20ans
ISP < -2	Sécheresse extrême	0		Pas d'occurrence

Tableau 6 : Probabilité d'occurrence de stations climatiques du Sidi Bennour (1980-2018)

Indice ISP	Catégorie	Nombre d'année	Nombre de fois sur 100 ans	fréquence
2 < ISP	Humidité extrême	2	45	1 fois tous les 18ans
1.5 < ISP < 1.99	Humidité sévère	0		Pas d'occurrence
1 < ISP < 1.49	Humidité modérée	2		1 fois tous les 18ans
0 < ISP < 0.99	Humidité légère	12		1 fois tous les 3ans
0 < ISP < -0.99	Sécheresse légère	16	55	1 fois tous les 2ans
-1 < ISP < -1.49	Sécheresse modérée	3		1 fois tous les 11ans
-1.5 < ISP < -1.99	Sécheresse sévère	0		Pas d'occurrence
ISP < -2	Sécheresse extrême	0		Pas d'occurrence

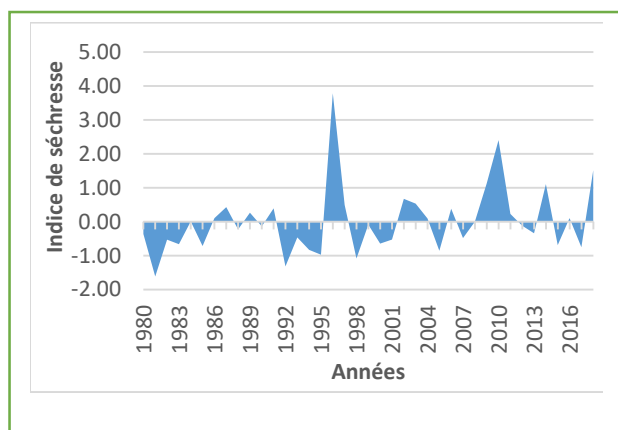


Figure 3. Indice pluviométrique standardisé à la station de Casablanca au cours de la période

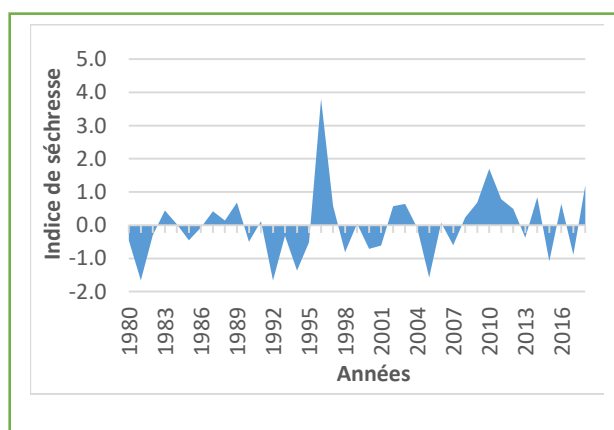


Figure 4. Indice pluviométrique standardisé à la station d'El Jadida (1980/2018)

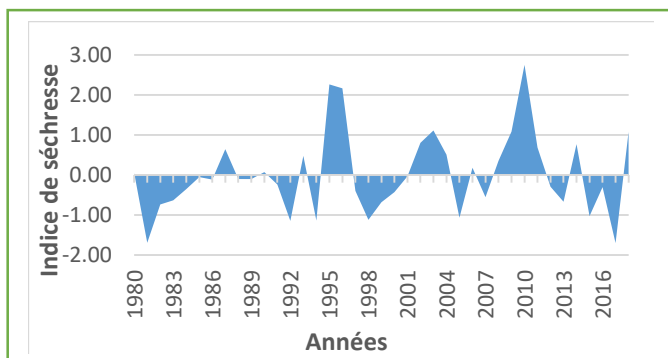


Figure 5. Indice pluviométrique standardisé à la station de Settat (1980/2018)

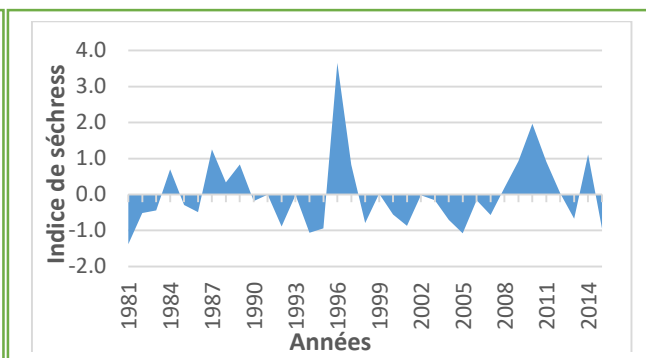


Figure 6. Indice pluviométrique standardisé à la station de Sidi Bennour (1981/2015)

## Conclusion

Au terme de ce travail, nous retenons que la région de Casablanca-Settat a été affectée par plusieurs séquences sèches pour la période 1980 à 2018.

Cela entraîne des répercussions économiques particulières sur le domaine agricole pluvial, qui souligne la nécessité d'adapter les stratégies destinées au monde rural à cette donnée structure

## Bibliographie

- Barakat F. & Handoufe A., 1998 : Approche agroclimatique de la sécheresse agricole au Maroc. Sécheresse, pp 9 ,201-208.
- Bois CH.1949 : Année de disette, années d'abondance : sécheresse et pluies au Maroc. Revue pour l'étude des calamités, n26- 27pp
- Bodian A, Dacosta H, et Dezette1, 2011 : Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique. Physique-Géo. Volume 5.
- Driouech F., 2010 : Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique. Thèse de Doctorat De l'Institut national polytechnique de Toulouse, p163.5. D.C. Edwards and T. B. Mckee., 1997 Caractéristiques of 20th century drought in the United States at multiple scales, Atmospheric Science, pp 634
- D.S. Wilks., 1995. Statistical Methods in the Atmospheric Science an Introduction, Académique Press, San Diego, USA.pp167-170.
- G.Wotling, G Mahe, Y.L'hote, L. Lebarbe, 1995 : Analyse par les vecteurs régionaux de la variabilité liées a la mousson africaine spatio-temporelle des précipitations annuelles, Météo France, Ministère de la coopération, n 52, Février 1995.p 25.
- Khomsy K., 2014 : Variabilité hydro climatique dans les bassins versants du Bouregreg et du Tensift au Maroc : moyennes, extrêmes et projections climatiques. Thèse de doctorat en climatologie, Univ. Mohammed V, Fac. Sci.Rabat, 218p.
- Mckee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist., 1993. The Relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Jan17-23, 1993, AnaheimCA, p 179-186.
14. Safi M. 1990. Essais sur l'économie de la sécheresse au Maroc (1493-1986) : passé, présent et perspective, DES en science économique, Université Mohammed V, Rabat, 200 p
- Saloui A. 2000 : Contribution à l'étude de la variabilité des précipitations et des bilans hydriques dans le nord-ouest dans les plaines et plateaux atlantiques entre oued Sbou et oued Souss. Thèse de Doctorat d'état. Université Mohammed V, Agdal, Rabat

# ETUDE DU COMPORTEMENT MICROCLIMATIQUE D'UNE BOUCHE DE RAFRAICHISSEMENT EXPERIMENTALE

Mailys Chanial<sup>1,2</sup>, Ghid Karam<sup>2,3</sup>, Sophie Parison<sup>2</sup>, Martin Hendel<sup>2,3</sup> et Laurent Royon<sup>2</sup>

<sup>(1)</sup>Mairie de Paris, Directions de la Propreté et de l'Eau & de la Voirie et des Déplacements, Paris, France. mailys.chanial@gmail.com

<sup>(2)</sup>Université de Paris, LIED, UMR 8236, CNRS, F-75013, Paris, France

<sup>(3)</sup>Université Gustave-Eiffel, ESIEE Paris, département SEN, F-93162, Noisy-le-Grand, France

**Résumé:** A la suite de la canicule de 2003, et dans le contexte du changement climatique, la Ville de Paris a pris conscience de la nécessité de mettre en place des stratégies de rafraîchissement urbain. Plusieurs expérimentations ont été menées depuis, dont une méthode de rafraîchissement fondée sur l'arrosage urbain lancée en 2012. Plus récemment, le projet AéroSeine a vu le jour en 2018. Il s'agit d'une bouche de rafraîchissement fonctionnant par débordement et connectée au réseau d'eau non-potable. L'étude de l'impact microclimatique de ce dispositif est réalisée grâce à plusieurs campagnes de mesures mobiles avant et après travaux. Nous décrivons ici une méthode d'analyse microclimatique ayant pour objectif d'estimer l'impact du dispositif sur le stress thermique des piétons. L'impact du dispositif AéroSeine et la reproductibilité de mesures réalisées plusieurs fois en un même point n'ayant pas subi de modification est également discutée.

**Mots-clés:** îlot de chaleur urbain, rafraîchissement évaporatif, stress thermique, Paris (France)

**Summary:** In the wake of the heat-wave of 2003, along with the context of climate change, awareness rose within the City of Paris regarding urban cooling. Since then, several experimentations have been carried out, including a pavement-watering cooling method implemented in Paris since 2012. More recently, the AéroSeine device was tested in 2018, composed of a permeable material connected to Paris' non-potable water network. The microclimatic impact study of this device is realized using mobile measurement campaigns before and after renovation. This paper describes the microclimatic analysis method used to determine the device's impact on pedestrian heat stress. The statistical robustness of the results obtained in the field is also discussed.

**Keywords:** urban heat island, evaporative cooling, thermal stress, Paris (France)

## Introduction

En raison du changement climatique, des vagues de chaleur de plus en plus fréquentes, longues et intenses sont attendues (Lemonsu et al. 2013). En réponse, les villes doivent s'adapter afin de limiter les impacts sanitaires sur la population. De nombreux moyens existent afin d'atténuer les effets des vagues de chaleur, tels que la végétalisation, l'arrosage urbain ou encore l'emploi de matériaux frais (Santamouris 2013; Chen et al. 2014; Hendel et al. 2016).

La Ville de Paris s'intéresse de près à son adaptation au changement climatique, en particulier au risque caniculaire. Elle étudie à ce titre plusieurs techniques de rafraîchissement depuis 2012 : arrosage urbain, matériaux réfléchissants et matériaux évaporatifs. Parmi ces derniers, un dispositif baptisé AéroSeine a été installé en juin 2019 dans le 20<sup>e</sup> arrondissement de Paris. Ce dispositif fonctionne par humidification d'un revêtement perméable imbibé par débordement d'eau.

L'objet de cette étude est de caractériser les impacts rafraîchissants du dispositif. Pour ce faire, des mesures prises par des stations météorologiques fixes avant et après réaménagement d'un lieu peuvent être employées en combinaison avec une analyse statistique afin d'isoler cet impact (Parison et al. 2020). Néanmoins, cette méthode requiert une instrumentation importante incompatible avec le dispositif AéroSeine de par sa faible taille. Une alternative moins robuste (faute de mesures répétitives) mais moins invasive consiste à réaliser des mesures mobiles avant et après les travaux de réaménagement. Nous présentons d'abord la méthode d'évaluation à l'aide de mesures mobiles, puis les résultats obtenus.

## Matériels et méthodes

### 1. Description du dispositif et du site

AéroSeine est un dispositif expérimental de rafraîchissement évaporatif, conçu par le studio Idaë en collaboration avec le bureau d'études OGI dans le cadre du programme Faire, testé par la Ville de Paris dans une rue du 20e Arrondissement, installé en 2019. Il s'agit d'une bouche de rafraîchissement de 20m<sup>2</sup> fonctionnant par débordement à l'eau non-potable. Le réaménagement du site comprend également le déploiement d'arbres et la mise en place d'un revêtement urbain plus clair. Entre juin et septembre, un débordement d'eau est programmé toutes les 30 minutes de 11h à 19h avec une vidange toutes les heures permettant d'éviter les risques sanitaires liés à l'eau stagnante. La rue est orientée Est-Ouest et est de classe LCZ 4 (Stewart and Oke 2012). Son ratio d'aspect est de 1,73.

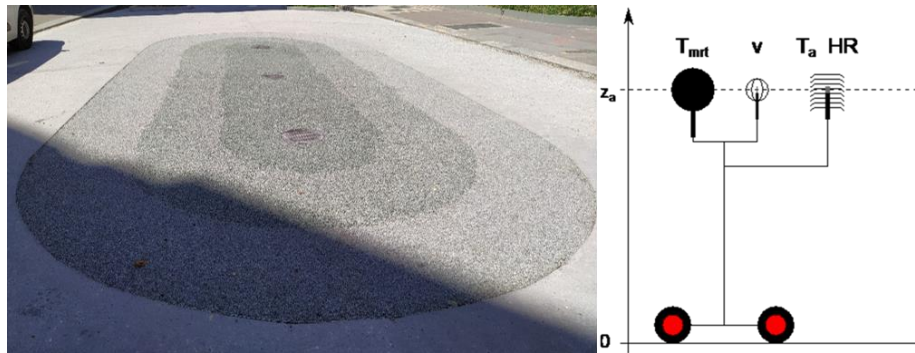


Figure 8 : Photo du dispositif AéroSeine(gauche). Schéma de la station météo mobile (droite).

### 1.2 Instrumentation et protocole de mesures

Les mesures microclimatiques sont réalisées sous certaines conditions météorologiques entre 11h et 15h ( $T_x \geq 25$  °C ;  $T_n \geq 16$ °C ;  $v < 10$  km/h ; Couverture nuageuse  $< 3$  octas) avec une station mobile en plusieurs points du site illustrés à la Figure 8. Après un temps de stabilisation de 10 à 20 min, les mesures durent 10 min en chaque point.

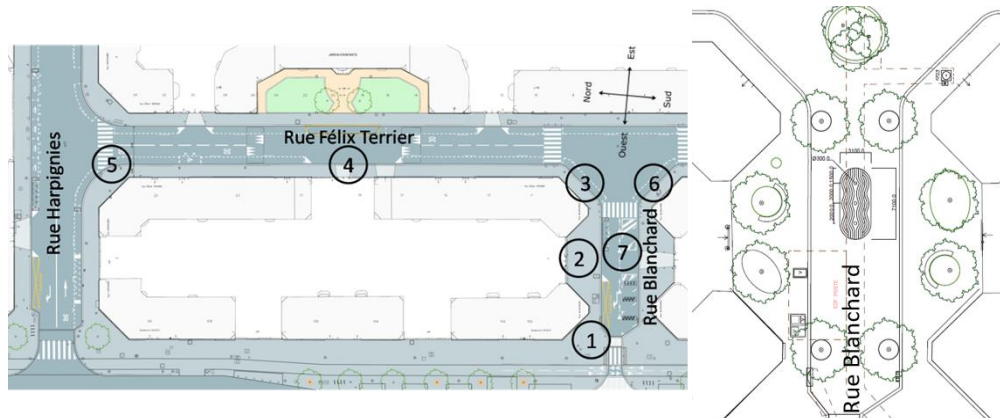


Figure 9 : Points de mesure sur le plan travaux du site (gauche). Plan d'implantation (droite).

Le

Tableau 4 liste les paramètres mesurés servant à évaluer l'UTCI, Indicateur Universel du Climat Thermique (Błazejczyk et al. 2013). L'UTCI est un indicateur de stress thermique basé sur le bilan thermique d'une personne dans un environnement de référence. Les points de mesures ont été choisis selon les aménagements prévus dans la rue Blanchard et la rue adjacente (rue Félix Terrier, Figure 2). Par exemple, le point n°7 se situe sur la zone d'ajout du dispositif AéroSeine, tandis que les points n°1, 2, 3 et 5 se trouvent à proximité de nouveaux arbres.



**Tableau 4 : Paramètres mesurés et instruments LSI-LASTEM correspondants pour la station météo mobile.**

	Notation	Instrument	Référence	Incertitude
<i>Température de l'air</i>	$T_a$	Thermomètre sous abri	DMA672.1	0,5°C
<i>Humidité relative</i>	$HR$	Hygromètre capacitif sous abri	DMA672.1	2,5%
<i>Température de globe noir</i>	$T_g$	Thermomètre globe noir	EST131	1°C
<i>Vitesse de vent</i>	$v$	Anémomètre à fil chaud	DNB004	0,3 m/s

### Analyse microclimatique de mesures mobiles

L'objectif de ces campagnes de mesures est d'étudier l'évolution du niveau de stress thermique d'un piéton avant et après travaux en différents points du site.

Il s'agit de comparer différentes zones dont les mesures microclimatiques n'ont pas été réalisées simultanément et de comparer plusieurs campagnes de mesures entre elles. Il est donc nécessaire d'harmoniser ces mesures afin de les rendre comparables entre elles. Il s'agit notamment d'une correction temporelle d'une part qui tient compte de l'évolution naturelle des paramètres microclimatiques entre le début et la fin d'une campagne de mesures donnée, et d'autre part d'une correction qui intègre la différence de conditions météorologiques synoptiques entre plusieurs campagnes de mesures réalisées à plusieurs semaines, mois, voire années d'intervalle.

A cette fin, nous comparons le stress thermique du site à un niveau de stress de référence. Il est calculé à partir des observations réelles d'une station météo témoin, localisée dans une zone théorique ombragée à l'abri du vent et non impactée par les travaux de réaménagement du site d'étude. On considère ainsi les conditions qui suivent (Karam et al. 2021) :

- $T_{air}^{ref} = T_{air}^{témoin}$
- $HR^{ref} = HR^{témoin}$
- $T_{mrt}^{ref} = T_{air}^{témoin}$
- $v^{ref} = 0,5 \text{ m/s}$  à 1,5 m de hauteur

On note  $\Delta T_{UTCI,i}$  « l'écart-UTCI » entre le point de mesure  $i$  et la situation de référence au même instant, donné par :

$$\Delta T_{UTCI,i} = T_{UTCI,i}^{mobile} - T_{UTCI,i}^{ref}(T_{air,i}^{témoin}, RH_i^{témoin}, T_{mrt}^{ref}, v^{ref}) \quad (1)$$

Cet écart peut être vu comme une sur- ou sous-chauffe par rapport à la zone de référence définie comme ci-dessus.

### Reproductibilité des mesures

Plusieurs campagnes de mesures ont eu lieu à trois périodes différentes d'avancement des travaux, dont les détails sont listés dans le Tableau 5. Le dispositif AéroSeine est étudié dans trois états différents, à savoir sec, humide (mouillage du matériau perméable seulement) et en miroir d'eau (débordement d'une lame d'eau de quelques millimètres d'épaisseur).

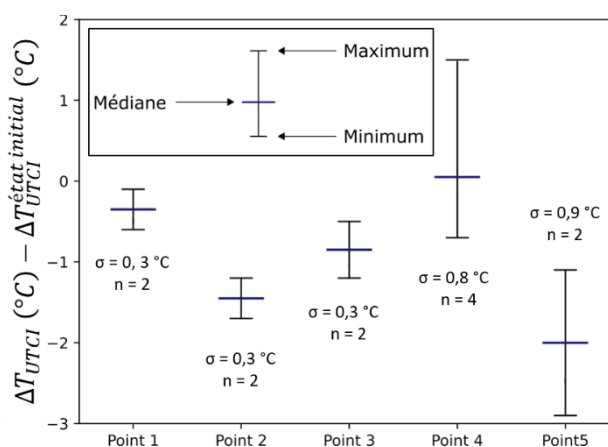
**Tableau 5 : Détail des campagnes de mesures et des étapes correspondantes du projet AéroSeine.**

	Description de l'étape	Mesures réalisées
<i>Etat initial</i>	Avant travaux	1 campagne (juin 2019)
<i>Etat intermédiaire</i>	Après installation du dispositif AéroSeine au point n°7	2 campagnes (juillet/août 2019)
<i>Etat final</i>	Après l'ajout d'arbres, d'un asphalte clair aux points n°1,2,3,5 et 6 et reprise du dispositif AéroSeine	2 campagnes (juillet/août 2020)

De ce fait, plusieurs mesures ont été réalisées à des dates différentes aux mêmes points du site, avec une redondance pour certains d'entre eux. Cette redondance permet notamment d'évaluer la reproductibilité de l'écart de stress thermique observé en différents points en l'absence de modification. La reproductibilité ou non de ces mesures permettra d'associer une incertitude aux mesures mobiles. Afin de quantifier la reproductibilité des mesures aux points n'ayant pas subi de modification, on s'intéresse tout d'abord aux points 1 à 5 dans les états initial et intermédiaire du site. La Figure 3 représente les variations des écarts-UTCI (équation (1)) par rapport à l'état initial des points n°1, 2, 3 et 5 à l'état intermédiaire et à l'état final (voir Tableau 5) pour le point n°4, soit la quantité suivante, avec  $i$  le point étudié :

$$\Delta T_{UTCI,point\ i} - \Delta T_{UTCI,point\ i}^{état\ initial} \quad (2)$$

Nous observons sur la Figure 3 des disparités entre les UTCI calculés dépendamment des campagnes de mesures malgré la correction apportée. On remarque, que selon le point de mesure, l'écart-type (noté  $\sigma$ ) varie entre 0,3 et 0,9°C.

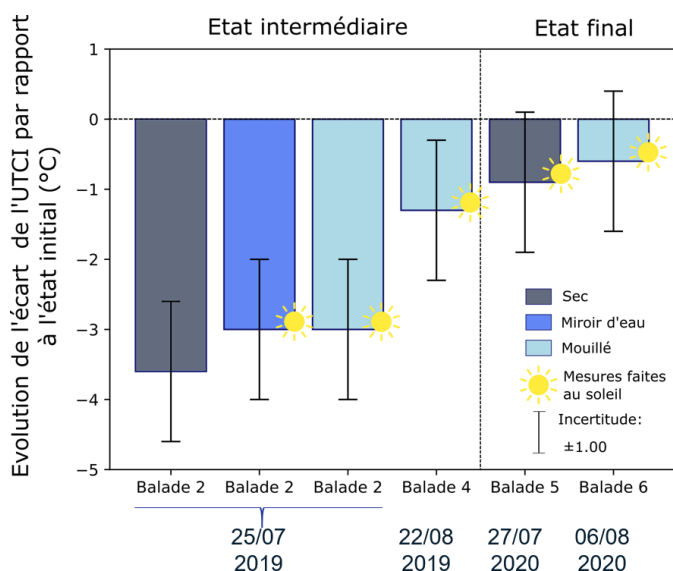


**Figure 10 : Variation de l'écart UTCI aux points n°1, 2, 3, 4 et 5 aux états initial et intermédiaire.**

Une fois, la variation de l'écart-UTCI (Equation 1) par rapport à l'état initial estimée, nous réalisons un écart-type commun. L'incertitude est ensuite calculée comme étant l'écart-type (Taylor 1997) :  $u = \sigma$ .

Cette méthode de calcul permet de tenir compte de la distribution des résultats observée. L'incertitude  $u$  obtenue est alors de  $\pm 1,0^\circ\text{C}$ . Cette dernière permet d'obtenir une estimation en première approche de l'incertitude associée à notre méthode de correction de l'UTCI (équation (1)) pour des points pour lesquels aucuns travaux n'ont été effectués entre les différentes observations.

## Résultatset discussions

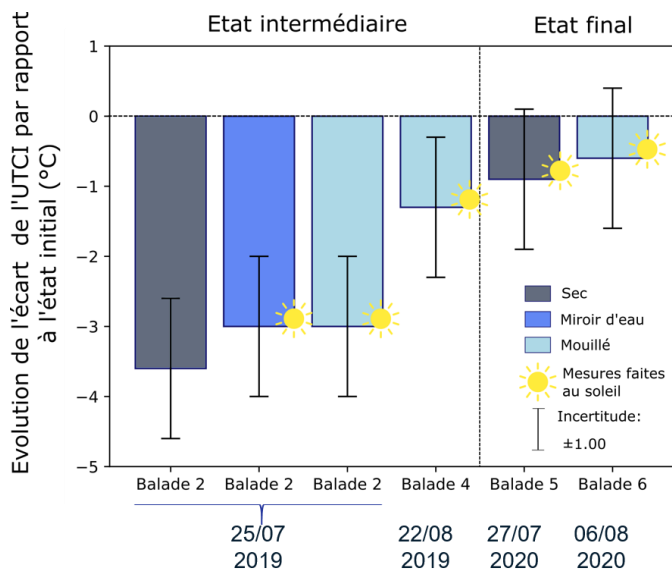


La

Figure 4 illustre l'évolution de l'écart-UTCI entre l'état intermédiaire ou final et l'état initial pour le dispositif AéroSeine (point n°7)(équation 2).

Cette quantité représente l'évolution de la surchauffe par rapport à l'état de référence entre un état donné et l'état initial (avant travaux). Les dates des différentes campagnes sont précisées en abscisse. Le type d'humidification du dispositif est également précisé. Sur la base des résultats issus de la Figure 3, une incertitude de  $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$  est considérée pour chaque point.

On constate que c'est durant les mesures du 25 juillet 2019 que l'on observe une réduction maximale de l'écart-UTCI par rapport à l'écart-UTCI de l'état initial, allant de  $3^{\circ}$  à  $3,6^{\circ}\text{C}$  dépendamment de l'état du dispositif (sec à l'ombre, mouillé ou au soleil). Les autres réductions sont plus marginales pour la journée du 22 août 2019 ( $-1,3^{\circ}\text{C}$ ), ainsi que pour l'état final (soit une fois le réaménagement de la rue totalement achevé) durant l'été 2020 (de  $-0,6$  à  $-0,9^{\circ}\text{C}$ ).

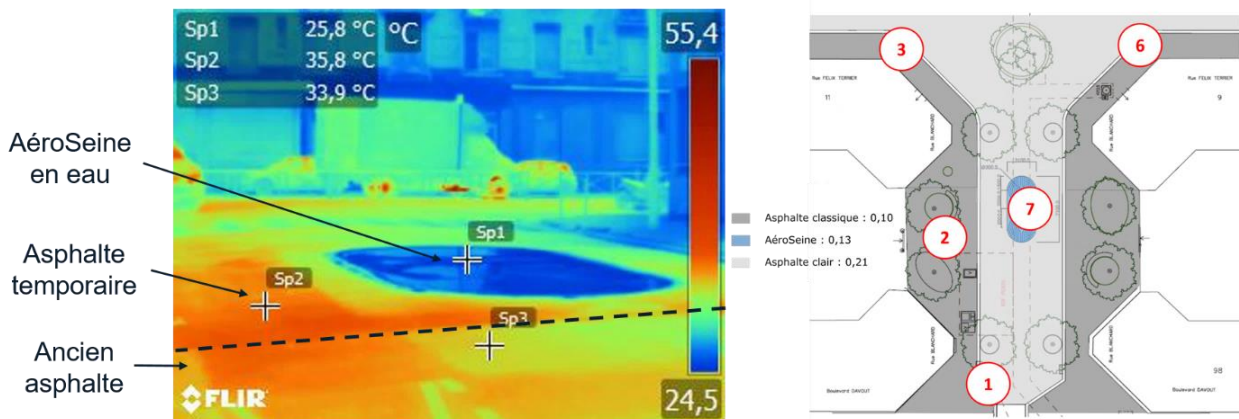


**Figure 11 : Evolution de l'écart-UTCI par rapport à l'état initial au point 7, avec dispositif sec (gris), mouillé (bleu clair) et en miroir d'eau (bleu foncé). Les soleils indiquent si le dispositif AéroSeine est au soleil.**

Au regard de notre incertitude, seuls les résultats de la journée du 25 juillet 2019 semblent montrer un impact positif significatif d'AéroSeine. Malgré le fait que nous retrouvons la même

tendance (réduction de l'UTCI) lors des autres mesures mobiles, nous n'observons pas de résultats aussi élevés, ils se confondent dans l'incertitude. De ce fait, à ce stade il n'est pas possible de conclure sur l'impact exact d'AéroSeine. Une étude plus approfondie de chaque paramètre est nécessaire afin de comprendre les résultats du 25 juillet 2019.

Plusieurs explications concernant le peu de résultats significatifs peuvent être avancées. D'une part, la taille réduite du dispositif (20 m<sup>2</sup>) rend difficile l'apparition d'un signal microclimatique mesurable à 1,5 m de hauteur. A titre de comparaison, les expérimentations d'arrosage urbain menées à Paris depuis 2013 (Parison et al. 2020, Godard et al. 2020) sont menées sur des portions de 200 m de long et sur toute la largeur de la rue. Dans ces conditions, une réduction maximale de l'UTCI de l'ordre de -3 °C est observée à 1,5 m.



**Figure 12 : Photographie infrarouge du dispositif en eau (gauche) et plan avec albédos correspondants (droite)**

Enfin, en complément des mesures microclimatiques, des mesures d'albédo et des images thermiques ont été prises. Ces mesures montrent une légère augmentation de l'albédo des matériaux du site, initialement de 0,11 pour l'enrobé bitumineux, puis de 0,13 pour le dispositif AéroSeine et de 0,21 pour l'asphalte clair. Finalement, comme attendu, les images thermiques montrent une chute des températures de surface d'une part grâce à leur albédo et d'autre part grâce à l'humidification d'AéroSeine.

### Conclusions et perspectives

Cette analyse a pour objectif l'étude de l'impact d'une bouche de rafraîchissement fonctionnant par débordement. Pour ce faire, des campagnes de mesures ont été réalisées avant et après travaux à l'aide d'une station météo mobile. Ce type de mesure permet l'étude des différents niveaux de stress thermique au sein de notre site d'étude.

L'analyse microclimatique proposée ici nécessite plusieurs corrections afin de s'affranchir des dérives temporelles des paramètres mesurés et des différences de conditions météorologiques entre chaque campagne de mesure.

Les mesures réalisées aux points n'ayant subi aucune modification mettent en avant leur variabilité. En effet, des fluctuations sont observées pour chaque zone. Cette observation permet ainsi de quantifier une incertitude de répétabilité et de juger de la significativité des résultats obtenus au niveau du dispositif AéroSeine.

L'analyse microclimatique de chacune des mesures mobiles réalisées sur le dispositif AéroSeine avec application des corrections proposées montre une réduction du stress thermique

allant de  $-0,6^{\circ}$  à  $-3,6^{\circ}\text{C}$  dépendamment de la campagne de mesure et de l'état du dispositif. Néanmoins des analyses et campagnes de mesures complémentaires sont nécessaires afin de conclure quant à l'efficacité exacte du dispositif, compte tenu de la variabilité de la réduction observée ainsi que de la forte incertitude associée à la méthode d'évaluation proposée.

## Bibliographie

- Błazejczyk, Krzysztof, Gerd Jendritzky, Peter Bröde, Dusan Fiala, George Havenith, Yoram Epstein, Agnieszka Psikuta, and Bernhard Kampmann. 2013. "An Introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI)." *Geographia Polonica* 86(1):5–10.
- Chanial, Maïlys, Sophie Parison, Martin Hendel, and Laurent Royon. 2020. "Étude Du Comportement Thermique et Microclimatique d'un Revêtement Innovant." *XXXIIIème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie* 151–56.
- Chen, Dong, Xiaoming Wang, Marcus Thatcher, Guy Barnett, Anthony Kachenko, and Robert Prince. 2014. "Urban Vegetation for Reducing Heat Related Mortality." *Environmental Pollution*.
- Godard, Eric, Lionel Grin, Kevin Ibtaten, Jérôme Lefevre, Carlos Ribeiro, Maïlys Chanial, and Sophie Parison. 2020. "Projet Cool & Low Noise Asphalt à Paris." *RGRA*, 14–23.
- Hendel, Martin, Pierre Gutierrez, Morgane Colombert, Youssef Diab, and Laurent Royon. 2016. "Measuring the Effects of Urban Heat Island Mitigation Techniques in the Field: Application to the Case of Pavement-Watering in Paris." *Urban Climate*.
- Karam, Ghid; Chanial, Maïlys; Chaumont, Maxime; Hendel, Martin; Royon, Laurent; 2021. "Cartographie Du Confort Thermique Au Sein d'une Cours d'école Parisienne : Couplage de Mesures Microclimatiques Fixes et Mobiles." *XXXIVème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*.
- Lemonsu, Aude, Raphaëlle Kounkou-Arnaud, Julien Desplat, Jean Luc Salagnac, and Valéry Masson. 2013. "Evolution of the Parisian Urban Climate under a Global Changing Climate." *Climatic Change*.
- Parison, Sophie, Maxime Chaumont, Raphaëlle Kounkou-Arnaud, Frédéric Long, Andrej Bernik, Marcos Da Silva, and Martin Hendel. 2020. "'Tierce Forêt': Greening a Parking Lot." *XXXIIIème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie* 529–34.
- Parison, Sophie, Martin Hendel, and Laurent Royon. 2020. "A Statistical Method for Quantifying the Field Effects of Urban Heat Island Mitigation Techniques." *Urban Climate* 33(April 2019).
- Santamouris, M. 2013. "Using Cool Pavements as a Mitigation Strategy to Fight Urban Heat Island - A Review of the Actual Developments." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Stewart, I. D., and T. R. Oke. 2012. "Local Climate Zones for Urban Temperature Studies." *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(12):1879–1900.
- Taylor, John R. 1997. 'An Introduction to Error Analysis'. Second edi. edited by *U. S. University Science Books*.

# FORMES D'ADAPTATION DES HABITANTS DES OASIS DU BASSIN VERSANT DE L'OUED DAOURA A LA PENURIE D'EAU : CAS D'OASIS DU TAFILALET (SUD-EST MAROCAIN)

Chanyour Yassine<sup>1</sup>, Obda Khalid<sup>2</sup> et El Achari Ouafaa<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LAGEA-DD, FLSH Saïs-Fès. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, Maroc;  
E-mail :yassinechanyour@gmail.com;

<sup>2</sup>LAGEA-DD, FLSH Saïs-Fès. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, Maroc ;  
E-mail :khalidobda@yahoo.fr;

<sup>3</sup>Laboratoire Territoire, Patrimoine et Histoire FLSH-Dhar El Mehraz, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, Maroc; E-mail :wafae.el.h22@gmail.com;

**Résumé:** L'espace oasien du Tafilalet est caractérisé sur le plan bioclimatique comme un espace aride à subdésertique. Dans ces milieux oasiens - où le contexte climatique et hydrologique est sensible et de plus en plus dégradé, suite à la conjugaison de plusieurs facteurs, dont les perturbations climatiques qui provoquent des effets déjà ressentis par les agriculteurs. Pour analyser ces effets, nous avons réalisé une étude au niveau de l'oasis du Tafilalet (province d'Errachidia). L'étude vise l'identification des perceptions des agriculteurs vis-à-vis des changements climatiques produits au niveau du climat local et l'analyse des différentes stratégies d'adaptation qu'ils ont adoptées.

Notre intervention scientifique portera sur les axes suivants :

Premièrement : les effets et la problématique de la pénurie d'eau à l'oasis du Tafilalet ;

Deuxièmement : stratégies d'adaptation à la pénurie d'eau à l'oasis du Tafilalet ;

**Mots-clés :** Adaptation ; changement climatique ; oasis ; Tafilalet.

**Abstract:** The oasis area of Tafilalet is characterized bioclimatically as an arid space to sub-desert. In these oasis environments - where the climatic and hydrological context is sensitive and increasingly degraded, following the combination of several factors, including climatic disturbances that cause effects already felt by farmers. To analyze these effects, we conducted a study in the oasis of Tafilalet (province of Errachidia). The study aims to identify the perceptions of farmers with regard to climate change in the local climate and to analyze the different adaptation strategies they have adopted.

Our scientific intervention will focus on the following areas:

Firstly: the effects and the problem of water scarcity in the oasis of Tafilalet;

Secondly: strategies of adaptation to water scarcity in the oasis of Tafilalet;

**Keywords:** Adaptation; climate change; oasis; Tafilalet.

## Introduction

La question de l'adaptation des territoires oasiens aux changements climatiques est devenue prégnante. Aussi, cette question est apparue dans le courant des années 2000 comme un nouvel objet de recherche. Citons, entre autres, les travaux du Tyndall Centre for Climate Change Research (Abramovitz et Ali, 2001 ; Adger, 2003), de l'International Union for Conservation of Nature (Ikkala et Constanza, 2008), le dossier spécial de la Revue de Géographie des Pyrénées et du Sud-Ouest intitulé « Adaptations aux changements environnementaux et territoires » paru en 2014 ou encore ceux de l'International Institute for Sustainable Development (Agoumi, 2003). Le questionnement fut renforcé par les récentes publications des Nations Unies et notamment le 5<sup>ème</sup> rapport (vol. 2) du GIEC intitulé « Changements climatiques 2014, « Impacts, vulnérabilité et adaptation » (Nations Unies, 2014). Ces différentes études ont révélé l'ampleur des chantiers à explorer et souligné les nombreuses difficultés à lever tant sur les plans théoriques que méthodologiques, difficultés qui obligent pour l'heure à la formulation d'hypothèses de travail prudentes et nécessairement provisoires. Par exemple, comment apprécier la capacité d'adaptation aux changements climatiques lorsque des incertitudes demeurent sur la nature, la fréquence et l'intensité des phénomènes à surmonter ?

L'adaptation aux changements climatiques est un processus permettant aux sociétés de s'ajuster en réponse aux modifications de leur environnement, afin de limiter les impacts négatifs des changements climatiques, voire de bénéficier des conséquences positives. Les stratégies d'adaptation réalisées par les acteurs locaux dans l'oasis du Tafilalet visent à

augmenter la résilience et réduire la vulnérabilité des milieux oasiens face aux effets connus ou anticiper de l'évolution du climat.

## 1. Localisation géographique

La zone d'étude correspond à l'oasis du Tafilalet située au sein du bassin versant de l'oued Daoura. Le Tafilalet est une région au sud-est du Maroc, regroupant les vallées du Ziz et du Rhériss, avec comme principales villes Erfoud et Errissani. (Fig.1). La superficie de la zone étudiée est environ de 22.000 ha représentant 36 % environ de la superficie globale irrigable de la zone d'action de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Tafilalet (60.000 ha).

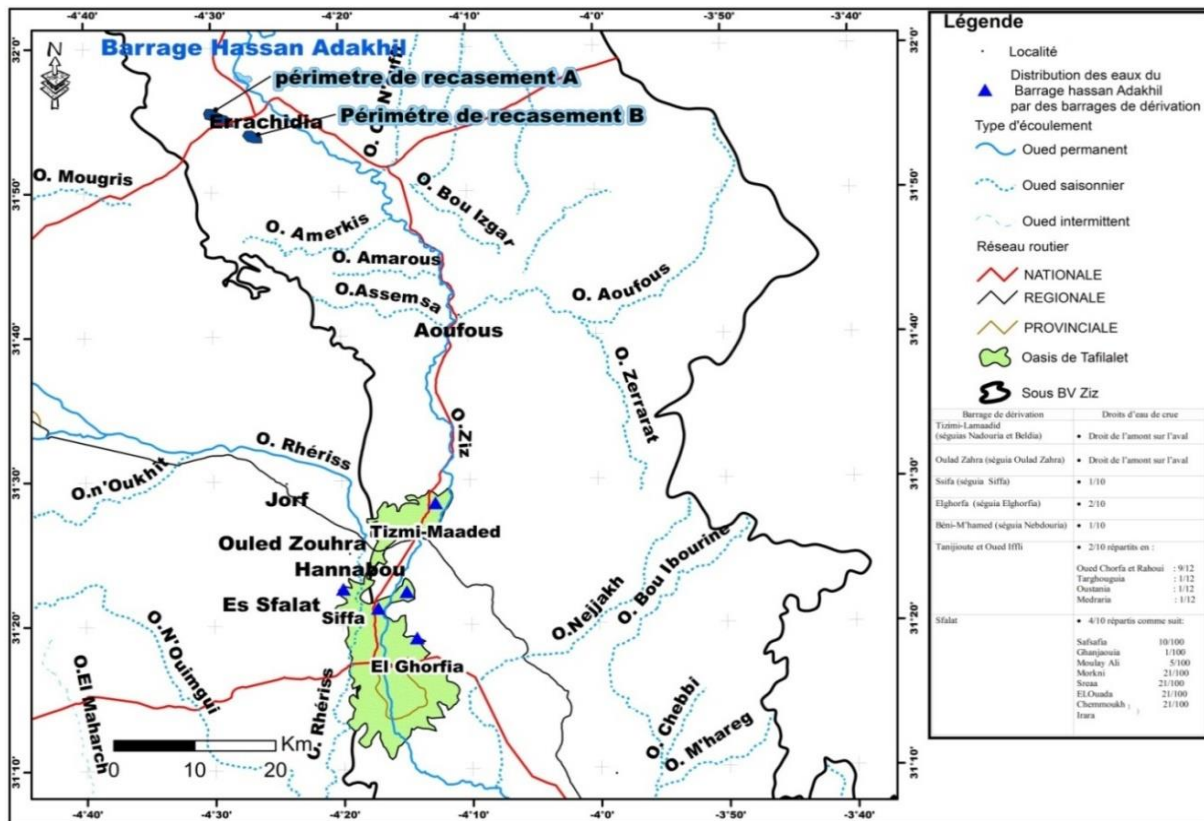


Figure 1 : Localisation géographique de la zone d'étude

L'oasis du Tafilalet fait partie des dépressions périphériques de la chaîne Anti-atlasique. C'est un système de larges vallées et de plaines alluviales creusées dans un socle primaire le plus souvent imperméable. Le déficit du bilan hydraulique superficiel, comme celui des nappes phréatiques, est dû à une évapotranspiration réelle élevée : c'est la cause principale de la forte salure et de la concentration progressive des eaux souterraines, qui arrive localement à dépasser celle de l'eau de mer.

## 2. Matériels et méthodes

L'agence du bassin hydraulique du Guir-Ziz-Rhériss est dotée d'un réseau de stations hydroclimatiques qui mesurent essentiellement les données pluviométriques. Du fait de la dominance d'un environnement désertique monotone au sud, le réseau d'observation est moins dense qu'en milieu montagnard, au nord, où les conditions climatiques sont plus contrastées. Les données pluviométriques mensuelles collectées ont concerné 3 stations dont la période d'observation est d'un peu lue d'un demi-siècle (1957-2009) (Tab.1). Elles couvrent les bioclimats aride et saharien.

Tableau 1 : Position géographique des stations étudiées (Période : septembre 1957- aout 2009)

Stations pluviométriques	Latitude	Longitude	Altitude (m)	P MA* (mm)
Barrage Hassan Addakhil	31°99'	4°48'	1130	130
Errachidia	31°93'	4°43'	1028	124
Erfoud	31°53'	4°18'	823	66

Source des données brutes : AHGZR ; 2014

En ce qui concerne la méthodologie, nous allons utiliser la méthode d'analyse descriptive des données hydroclimatiques observées dans les stations de barrage Hassan Addakhil, Errachidia et Erfoud, sans négliger la méthodologie géographique afin d'étudier l'homme en tant qu'acteur agissant dans le champ naturel, ainsi notre lecture de la bibliographie, avec un travail de terrain basé sur l'observation directe de phénomènes (33 enquêtes). Enfin le traitement des données avec Excel pour tracer les courbes des données et ARCGIS pour la cartographie.

### 3. Résultats et discussion

#### 3.1. Problématique de pénurie d'eau dans l'oasis du Tafilalet

La présence de la barrière Atlasique culminante à des altitudes supérieures à 3200 m et l'intrusion des vents brûlants d'origine saharienne sont à l'origine de la rigueur du climat de la région du Tafilalet. La température moyenne annuelle varie de 15,2 °C dans le haut Rhériss à 21,5 °C à Taouz dans la partie aval de Ziz. La pluviométrie décroît de 200 mm dans les hauts reliefs à 150 mm au piémont. Au Sud, la pluviométrie est de l'ordre de 50 mm. L'évaporation augmente de 2700 mm à Errachidia à 4500 mm à Taouz. (Fig.2).

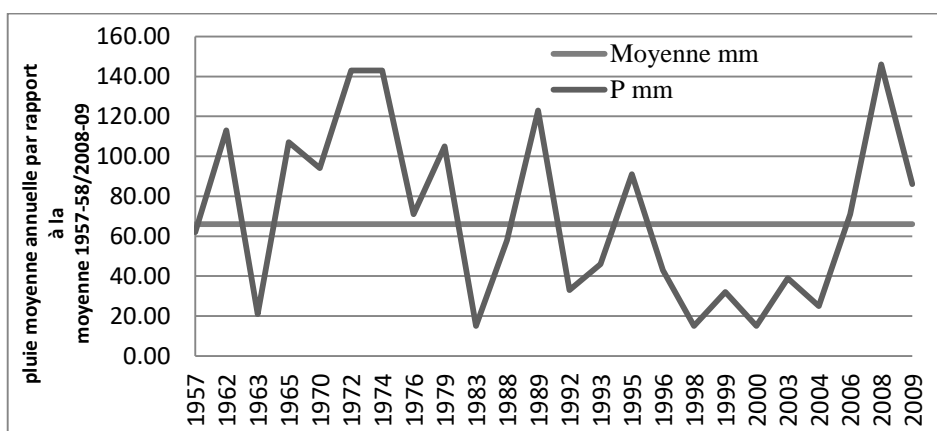


Figure 2 : Variabilité interannuelle des précipitations annuelles dans la station d'Erfoud (1957-2009)

Source des données brutes : AHGZR, 2014

La majorité des stations hydrométriques de la plaine du Tafilalet et ses bordures, notamment dans la période hydrologique 1980-1981/1984-1985 sont marquées par une indigence hydrologique très importante, à cause de la succession des années sèches qui ont frappé le Maroc pendant le début des années quatre-vingt.

Parallèlement, dans la plaine du Tafilalet et ses bordures, le débit maximum absolu est atteint en 2006-2007. Il est de l'ordre de 8,58 m<sup>3</sup>/s à la station d'Erfoud à l'entrée de la plaine alluviale du Tafilalet. De même, il est le point de confluence de plusieurs oueds (Ziz, Aoufous et l'écoulement d'Ain Meski). Cependant le minimum (0,00 m<sup>3</sup>/s) c'est-à-dire, l'assèchement total, est mesuré en 1981-1982 dans les stations de Tadighoust et de Tazarine, cette année-là, le Maroc a connu une sécheresse très sévère (Chanyour. Y, 2018). Cette irrégularité est représentée par les coefficients de variation calculées sur le tableau ci-dessous (Tab.2) :



Tableau 2: Coefficient de variation des débits moyens annuels extrêmes dans l'oasis de Tafilalet et ses bordures

Stations	Débit moyen annuel Max*. m <sup>3</sup> /s	Coefficient de variation %	Débit moyen annuel min*. m <sup>3</sup> /s	Coefficient de variation %
FoumTillicht	6,4	92	0,47	78
M'zizel	4,49	65	0,17	191
FoumZaabel	16,17	86	0,67	160
Erfoud	12,4	91	0,14	65

Source des données brutes : AHGZR,2014

Toutefois, la dégradation des ressources en eau, le stress hydrique et l'apparition des phénomènes extrêmes (crues et étiages) touchent la zone d'étude d'une année à l'autre. Il est obligatoire de mobiliser ces ressources rares dans le cadre d'une politique rationnelle et efficace.

### 3.2. Stratégies d'adaptation et gestion des ressources en eau

Les stratégies de la gestion des ressources en eau s'y exercent selon deux types: les stratégies traditionnelles, menées par la population locale, et étatiques, réalisées par les services techniques. Les observations sur le terrain ont permis de recenser les aménagements réalisés et d'évaluer leur rôle en matière de lutte contre les crues torrentielles et de la gestion conservatoire et rationnelle des ressources en eaux dans la zone d'étude.

#### 3.2.1. Séguia « Targua » : exploitation des eaux pérennes

C'est le système traditionnel de mobilisation des eaux de surface la plus répandue dans la zone d'étude et le plus important par sa densité et par les superficies qu'il permet d'irriguer. La dérivation des eaux de l'oued dans les seguias principales est faite au moyen de petits barrages traditionnels établis ici et là. Il s'agit de simples prises peu élevées (0 m 50 à 1 m) et sommairement construites de branchages, de grosses pierres, de galets et de cailloux, le tout colmaté avec de la terre.

#### 3.2.2. Ougoug : Un système de dérivation d'eau d'épandage de crues

C'est un petit barrage ou prise d'eau située en amont du territoire à irriguer. Il est généralement construit de pierres de différents calibres, de branchages, de terre, et de fibre de palmier.

#### 3.2.3. Khettara : Un système durable et écologique de mobilisation de l'eau pour maintenir la vie dans les oasis

Khettara c'est un système de galeries drainantes, équivalentes à celui des foggaras en Algérie ou quanat au Moyen-Orient. Ces ouvrages qui nécessitent des travaux considérables et coûteux fournissent une eau régulière, mais le débit faible baisse parfois jusqu'au tarissement. Leur entretien est pénible, voire dangereux, c'est pourquoi il n'est pas effectué régulièrement (Fig.3).

Il faut noter que les débits des Khettaras localisées dans l'oasis du Tafilalet ont connu une grande diminution qui est due au déficit des écoulements superficiels, et à la réalisation de plusieurs stations de pompage. Le débit d'une Khettara varie essentiellement de 5 à 15 l/s, mais au cours d'une année humide comme celle du 5/12/2014 à 16h30 min, le débit jaugé de Khettara de Ksar Agoudim est environ de 110 l/s directement après des précipitations exceptionnelles qui ont touché le Sud-est marocain.

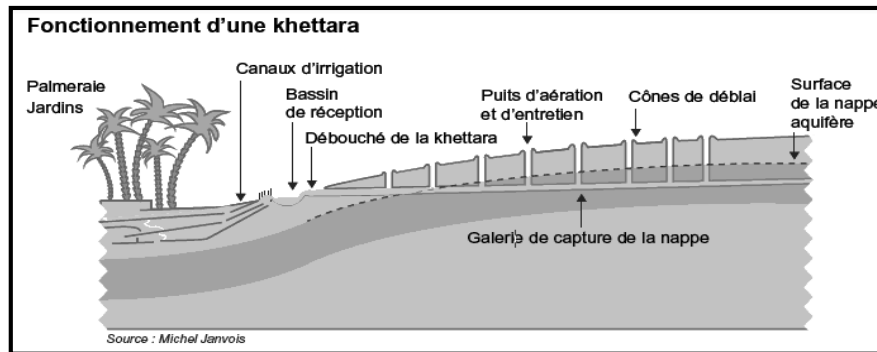


Figure 3: Caractéristiques générales d'une khattara située dans l'oasis du Tafilalet

### 3.2.4. Puits traditionnel « Aghrou »

Cette technique, entreprise avec des moyens modestes adaptés aux conditions socio-économiques de la région, fournit une eau d'appoint en période d'étiage. Les puits utilisant la force animale sont moins répandus dans la zone d'étude. Ceux à balancier sont plus fréquents dans le secteur de M'daghra situés au sud de la ville d'Errachidia.

D'après une étude réalisée par l'ORMVAT en 2009 sur la technique d'*Oughrou*, les volumes d'eau prélevés sont de 10 à 15 M<sup>3</sup>/jour, soit pour 8 à 10 heures d'exploitation, avec un débit moyen journalier de 0,15 l/s. Cette technique est remplacée par un système de pompage plus moderne et plus efficace qui utilise l'énergie thermique.

### 3.3. Adaptation à la pénurie d'eau et modernisation agricole

L'oasis du Tafilalet et les nouveaux périmètres irrigués d'Erfoud sont soumis à des contraintes économiques, sociales et environnementales différentes que les observations et enquêtes de terrain ont permis de mettre en évidence. Si la construction du barrage Hassan Addakhil sur l'oued de Ziz a stimulé la modernisation agricole et le décollage économique de la région aujourd'hui bien insérée dans les circuits de commercialisation et les filières agro-industrielles, seules les moyennes et grandes exploitations présentes dans le périmètre irrigué on peut en tirer parti du fait de l'importance des investissements requis et du coût de l'eau (40Dh/heure en 2013). Ainsi, les moyennes et grandes exploitations supérieures à 5 ha dominant désormais dans le périmètre de la grande hydraulique où 45 % des terres sont détenues en propriété privée. À l'écart vit encore une population rurale majoritairement pauvre et dépendante des aléas climatiques sur les terres sèches et les territoires les plus reculés des Ait Atta, touché par une déprise agraire avancée. Les modalités d'accès à l'eau et à la terre, de même que leur coût, sont devenues un puissant facteur d'inégalités de richesses. Sur les terroirs de Tafilalet, la force de travail jeune est descendue en plaine pour rechercher un emploi salarié dans les plantations et les usines spécialisées dans la transformation et le conditionnement des produits arboricoles (dattes). Ces départs ont conduit au vieillissement de la population et à l'abandon progressif des habitations, au développement des friches, à la dégradation des canaux de la petite hydraulique villageoise faute de bras, de moyens financiers et de soutien technique et logistique, à l'image des dynamiques rencontrées depuis le début des années 1980 dans région d'Errachidia voisin (Gauché, 2005) et plus généralement dans tous les massifs montagneux de la région Draa-Tafilalet.

### Conclusion

Les connaissances actuelles sur ce qui fonde la capacité d'adaptation d'un territoire donné sont encore insuffisantes et il serait présomptueux de vouloir ici proposer, à partir de 33 entretiens seulement, un diagnostic précis sur l'efficacité des stratégies d'adaptation des territoires face aux changements climatiques dans les oasis de l'oued Daoura. L'objet du propos

donc visait, plus modestement, à faire part d'un questionnement méthodologique pour cerner la complexité de l'objet de recherche.

En définitive, il apparaît que toute stratégie d'adaptation au changement climatique pensée à moyen et long termes ne peut faire l'économie d'une réflexion préalable sur le choix d'un modèle de développement et d'aménagement du territoire mis au service d'un projet politique qui, dans le contexte marocain, parvienne à concilier développement économique, réduction des inégalités, lutte contre la désertification et l'exode rural pour maintenir la vitalité des territoires. Weissenberger et Chouinard (2015) relevaient en effet que « Dans la pratique de l'adaptation, on peut noter que celle-ci doit être stratégique [...] et tenir compte de l'intérêt général autant que des intérêts spécifiques et doit donc appeler à la solidarité communautaire et un arbitrage négocié [...]. Parmi les conflits possibles figurent les tensions entre les différentes échelles de gouvernance [...], au sein de l'administration publique [...], entre différents acteurs socioéconomiques [...], entre différentes catégories de résidents de collectivités territoriales [...], entre territoires différemment affectés au sein d'un espace géographique [...] et bien sûr des conflits inévitables entre les pressions démographiques et économiques et les efforts de protection et de conservation d'écosystèmes oasiens [...]».

### References bibliographiques

- [1] Abramovitz, J, T. Banuri, P., O. Girot, B. Orlando, N. Schneider, E. Spanger-Siegfried, J. Switzer et A. Hammill, 2001, *Adapting to Climate Change : Natural Resource Management and Vulnerability Reduction*, Background Paper to the Task Force on Climate Change, Adaptation and Vulnerable Communities, Stockholm Environment Institute, The World Conservation Union, International Institute for Sustainable Development, Worldwatch Institute, 37 p.
- [2] Adger, W.N., 2003, Social Capital, Collective Action, and Adaptation to Climate Change, *Economic Geography*, vol. **79**, **4**, p. 387-404.
- [3] Agoumi, A., 2003, *Vulnérabilité des pays du Maghreb face aux changements climatiques. Besoin réel et urgent d'une stratégie d'adaptation et de moyens pour sa mise en œuvre, Perspectives des changements du climat. Questions et Analyses de Pays en voie de développement et de Pays à Économies en Transition*, Climate Change Knowledge Network, Winnipeg (Manitoba), Canada, IISS.
- [4] CHANYOUR Y. (2018). *Hydrologie des milieux arides et présahariens du Sud-est marocain (cas du bassin versant de l'oued Daoura)*. Thèse de Doctorat en géographie physique, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, 414p.
- [5] Gauché, E., 2005, Reconstitutions et renouveau de campagnes menacées : le cas des Beni Saïd (Rif oriental, Maroc), *Annales de Géographie*, **646**, p. 617-642.
- [6] Ikkala N. et Constanza M., 2008, Adaptation to Climate Change, Fourteenth session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (COP14), Position paper (p. 2), Poznan, Poland, **1-12** December 2008.
- [7] Lamarre, D. (dir.), 2008, *Climats et risques : changements d'approches*, Paris, Éditions Lavoisier, 170 p.
- [8] Nations Unies, 2014, 5e Rapport du GIEC sur les changements climatiques et leurs évolutions futures. Partie 2 : « Impact, adaptation et vulnérabilité », [En ligne].
- [9] Tizaoui, C., 2004, Promotion de l'irrigation localisée dans le périmètre irrigué de la basse Moulouya au Maroc, *Revue H.T.E*, **130**, p. 19.
- [10] Weissenberger S. et Chouinard O., 2015, « Adaptation aux changements climatiques en zone côtière : une perspective mondiale », *Vertig O*. La revue électronique en sciences de l'environnement, Hors-série **23**.

## “TIERCE FORET” : GREENING A PARKING LOT

Chaumont Maxime (1), Parison Sophie \* (1), Kounkou-Arnaud Raphaëlle (3), Long Frédéric (3), Bernik Andrej (4), Da Silva Marcos (4), Hendel Martin (1,5)

\*sophie.parison@univ-paris-diderot.fr

(1) Université de Paris, LIED, UMR 8236, CNRS, F-75013, Paris, France

(2) Paris City Hall, Paris, France

(3) Météo-France, Direction des Services Météorologiques, Saint-Mandé, France

(4) Fieldwork Architecture, F-75020, Paris, France

(5) Université Gustave Eiffel, ESIEE Paris, département SEN, F-93162 Noisy-le-Grand, France

**Résumé :** *Un espace extérieur privatif situé à Aubervilliers (93) a été transformé d'un parking recouvert d'enrobé bitumineux vers un revêtement en béton perméable avec plantations dense d'arbres. Le présent article s'intéressera à la présentation de résultats préliminaires portant sur l'évaluation de l'impact rafraîchissant, notamment sur le stress thermique d'un piéton, grâce à des mesures fixes et mobiles. Des effets bénéfiques pour le stress thermique sont observés suite notamment à la création d'ombrage par les nouveaux arbres se traduisant par une réduction de la température de l'air et de la température moyenne de rayonnement.*

**Mots-clés :** *rafraîchissement urbain, béton perméable, végétalisation.*

**Summary:** *A parking lot in the city of Aubervilliers (Paris metropolitan area) has been converted from an asphalt-concrete paved area to an open green space with permeable pavement as an urban heat island countermeasure. In this paper, we present preliminary results of the impact of the site's partial conversion on pedestrian heat stress, with fixed and mobile measurement campaigns. Significant improvements of pedestrian heat stress are reported, following the creation of shade from trees resulting in reductions in air temperature and mean radiant temperature.*

**Keywords:** *urban heat island countermeasure, permeable concrete, urban greening.*

### Introduction

Urban greening is among the best-known countermeasures to the urban heat island (UHI) phenomenon (Akbari, Pomerantz, and Taha 2001). Parks in particular have been the focus of many studies, but most only conduct measurements after park construction (Bowler et al. 2010). However, identifying sites early enough to prepare a measurement campaign before and after park construction can be difficult.

In the Paris Metropolitan Area, a parking lot in the municipality of Aubervilliers was converted into an urban green area. Prior to conversion, the site offered no urban amenities for pedestrians and inhabitants and its asphalt concrete strongly absorbed solar radiation. The renovation has created a green space with new functionality for pedestrians and inhabitants, including several trees and permeable concrete paving.

This project and its construction work schedule offered an opportunity to study the site before and after greening. To this aim, microclimatic measurements were conducted to determine the transformation's cooling effects. This paper presents results following the conversion of the site, i.e. after trees were planted and pervious concrete pavement slabs were laid.

## 2. Materials and Methods

### 1.1. Site Description

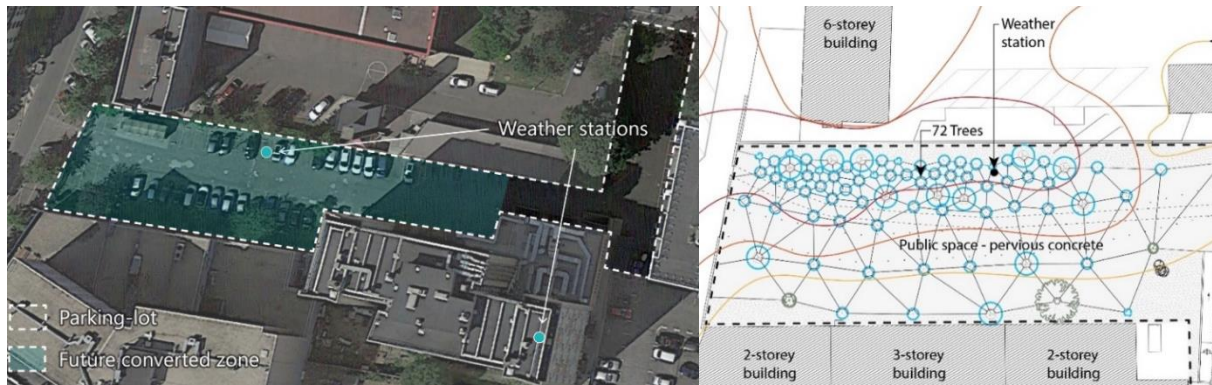
The site chosen for the study is a parking lot of about 1,200 m<sup>2</sup> for the occupants of a home for young workers in the municipality of Aubervilliers, located North of Paris. The site is located in a heterogeneous urban area surrounded by tall buildings. The site can be classified as LCZ 4 (open high rise), with adjacent constructed areas falling under LCZ 2 and a neighbouring 2.5 ha park (LCZ B) to the North. Prior to renovation, the site offered no amenities for pedestrians, such as benches, shade or footpaths. The ground was paved with old impervious asphalt concrete with an albedo of 0.13. The site offered little vegetation apart from peripheral flowerbeds and sparsely-planted trees.

Considering the initial site's characteristics, it was a good candidate for conversion to an open green area as an urban cooling measure. The renovation completely redesigned this area, by creating a friendly pedestrian space for local inhabitants, no longer accessible to vehicles. Trees were planted with high density in the sunniest areas, creating a "tertiary forest". The asphalt concrete was entirely replaced with permeable concrete with an albedo of 0.24, thanks to which rainwater can be stored underground. The permeability and underground water storage helps the trees grow properly and the soil be fertile. Photographs of the area in both its initial and current states are provided in **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**



Figure 13: Photograph of the site before (left) and after conversion in 2020 (right).

The microclimatic impact of the transformation is assessed by means of pre- and post-processing measurements. The project and its schedule offered a unique opportunity to monitor the site ahead of initial demolition works. Microclimatic measurements were conducted with two weather stations installed by Météo-France. The case station is placed in the parking lot in an area where trees were planted, while the control station is located on the rooftop approximately 30 m above the parking lot, outside of the project's area of influence. **Erreur ! source du renvoi introuvable.** shows the weather stations' position and the project's conversion plan.



**Figure 14: Site map before conversion and weather station positions (left) and project plan (right).**

The first measurements were performed during the summer of 2018 prior to demolition, while trees were planted and most of the asphalt concrete was removed after partial conversion in time for measurements during summer 2019 (with pervious concrete below the case station area while the rest remained bare). Construction works were fully completed for the 2020 measurement campaign.

## 1.2. Instrumentation

The weather stations monitor several microclimatic parameters at screen height, including those relevant to pedestrian heat stress: air temperature, relative humidity, black globe temperature, wind speed, in addition to long and shortwave upward and downward radiation fluxes, as well as a rain gauge near the control (rooftop) station. Mobile microclimatic measurements were also conducted. The position of the stations is indicated in **Erreur ! Source du renvoi introuvable. Erreur ! Source du renvoi introuvable.**(left) and a photograph is shown in **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**



**Figure 15: Rooftop (left) and parking lot (center) fixed and mobile (right) weather stations (before conversion).**

## 1.3. Data analysis

### 1.3.1 Fixed Measurements

The cooling impact created by the site's transformation is evaluated using the protocol described by Parison et al. (2020), based on the BACI method combined with the Lowry approach (Lowry 1977). Succinctly, the interstation difference between the case (parking lot) and control (rooftop) stations is monitored before (reference period) and after (countermeasure

period) conversion on days presenting radiative conditions (clear skies and wind speed < 3 m/s) with daily minimum and maximum temperatures exceeding 16° and 25°C, respectively. These weather conditions match for days of Pasquill Stability Class A or A-B (Pasquill 1961). By comparing the interstation profiles during the reference  $\Delta M_{ref}$  (before) and the countermeasure  $\Delta M_{counter}$  (after) periods, preexisting differences between stations are filtered out and the impact of the conversion  $I$  can be isolated. The procedure is summarized in equation (1), noting  $M$  as the measured meteorological parameter:

$$\Delta M_{counter} - \Delta M_{ref} = (M_{case,counter} - M_{control,counter}) - (M_{case,ref} - M_{control,ref}) = I \quad (1)$$

Results are tested for statistical significance with a confidence interval of 95%.

### ***1.3.2 Mobile Measurements***

Prior to site transformation, mobile measurements were conducted in June 2018 and in July 2020, i.e. respectively before and after conversion in order to estimate the site's microclimatic spatial distribution. These were performed on typical summer days presenting the same radiative conditions as for the fixed measurements. From these measurements, the Universal Thermal Climate Index (UTCI) -equivalent temperature was calculated. To account for weather differences between measurement campaigns conducted years apart, the mobile measurements are compared to a reference stress level. This level corresponds to a theoretical permanently-shaded sheltered courtyard where air temperature and relative humidity are those measured at the control rooftop station, while wind speed is assumed to be 0.5 m/s at a height of 1.5 m and mean radiant temperature (MRT) is equal to air temperature.

Unfortunately, for various reasons, the 2020 campaign did not fully meet the experimental requirements, but no other measurements could be conducted in 2020. The results presented here for the mobile measurement are therefore preliminary and should thus be considered with caution given that the weather conditions were different (despite our filtering criteria) and that the measurement points were not exactly located in the same position.

## 2. Results and discussions

### 2.1. Fixed Measurements

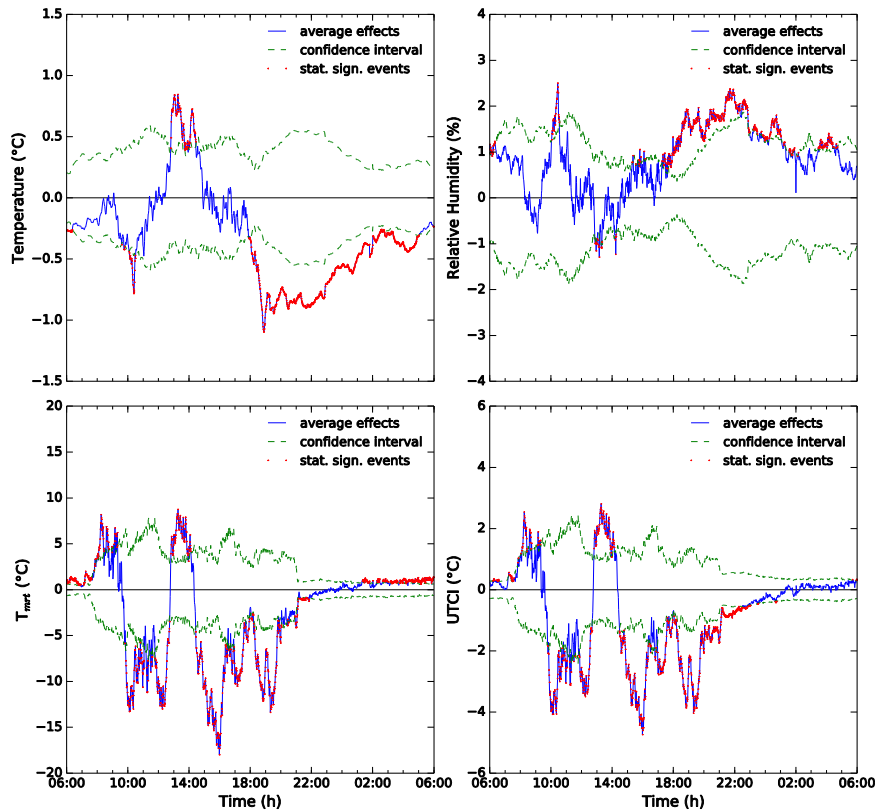


Figure 16: Microclimatic impacts of the site's renovation. Assessment based on 18 observation days before and 18 after conversion. Results are given in local time (UTC+2).

**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustrates the microclimatic impacts of the site's onversion following the removal of the asphalt concrete pavement and the planting of trees. The impacts on air temperature, relative humidity and MRT are reported as well as their combined impact on UTCI. Maximum and mean effects are summarized in **Erreur ! Source u renvoi introuvable.**.

Table 2: Maximum and mean microclimatic effects.

	<i>Air temperature</i>	<i>Relative humidity</i>	<i>MRT</i>	<i>UTCI</i>
<i>Maximum effect</i>	-1.1°C	+2.5%	-18°C	-4.7°C
<i>Mean effect</i>	-0.4°C	+1.3%	-3.6°C	-1.4°C
<i>Time of max. effect (UTC+2)</i>	18:53 pm	10:26 am	15:58 pm	15:58 pm

As can be seen, the microclimatic impacts of the site's transformation are quite significant, with three peak cooling effects visible with UTCI, the maximum effect reaching -4.7°C. These are principally attributable to morning and afternoon shade, causing a maximum reduction in MRT of 18°C. Air temperature is reduced by up to 1.1°C at the end of the afternoon, while it is briefly increased by 0.8°C around 13:00 pm. Finally, only minor increases in relative humidity of up



to +2.5% are observed during the evening and night. In addition, the change is statistically significant for all parameters at least 40% of the day.

Looking at the details, it is clear from the observations that the shade provided by the trees planted in the immediate vicinity of the weather station has a very significant impact in the morning from 10-12 am, 2:30-4:30 pm and from 6:30-8:30 pm on MRT and subsequently UTCI. However, conditions seem to have marginally worsened around 13:00-14:15 pm. Since the reason for that is currently unclear, further investigations of the long and shortwave upward and downward radiation fluxes are needed to explain this result. Those will focus on studying the impact of the reflective pervious concrete pavement on MRT, as the portion of reflected visible radiation is expected to increase, while that of infrared radiation emitted by the pavement should decrease as a result of its surface temperature reduction compared to a traditional asphalt-concrete. Finally, the presence of trees around the station appears to have increased relative humidity, although it does not have a significant detrimental impact on pedestrian heat stress given how dry conditions are to start with.

### 2.2. Mobile Measurements

The measurement points of the mobile campaigns are shown in **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, while results are shown in **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**.



Figure 17: Studied measurement points.

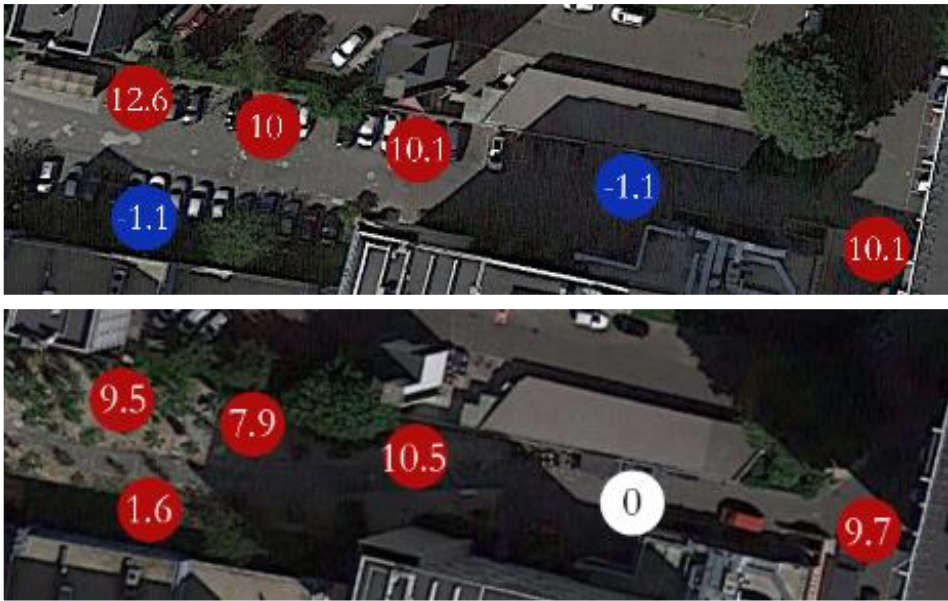


Figure 18: Thermal over-stress before (top) and after renovation (bottom). Overheating is illustrated in red.

As can be seen, overheating at points 1 and 2 is reduced following site renovation. Indeed, these areas are partly shaded by the new trees. Points 4 and 6 show an opposite trend, with a stronger difference for point 6. This may be due to the change of pavement that took place at point 6 but not point 4. The increase in albedo may have caused an increase in mean radiant temperature and thus UTCI. However, this would mean that the suspected increase in MRT is sufficient to offset the expected decrease in air temperature resulting from the site's transformation. This also requires further investigation.

## Conclusion

The conversion of a parking lot into a green space with 72 trees and pervious concrete pavement was studied as an UHI-countermeasure in the Paris metropolitan area. The site was monitored with fixed and mobile weather stations in order to determine the impact of the conversion on the site's microclimate.

The fixed measurements and the measurements recorded at points 1 and 2 by the mobile station show, for these areas where the most trees were planted, that the transformation has a positive impact on pedestrian heat stress thanks to the new tree shade.

However, it remains difficult to draw conclusions for the rest of the site. Indeed, the mobile measurements were not carried out under the exact same conditions between campaigns, as previously highlighted. Additional mobile measurements will be scheduled over the summer of 2021 to overcome these shortfalls.

## Acknowledgements

The authors acknowledge the financial and in-kind contributions of the ANR JCJC UMat4CC Project (ANR-18-CE22-0015-01), Alteralia, the French Environment & Energy Management Agency, the Paris Climate Agency and LafargeHolcim to this project.

## References

- Akbari, H, M Pomerantz, and H Taha. 2001. "Cool Surfaces and Shade Trees to Reduce Energy Use and Improve Air Quality in Urban Areas." *Solar Energy* 70 (3): 295–310.  
[https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X).
- Bowler, Diana E., Lisette Buyung-Ali, Teri M. Knight, and Andrew S. Pullin. 2010. "Urban Greening to Cool Towns and Cities: A Systematic Review of the Empirical Evidence." *Landscape and Urban Planning* 97 (3): 147–55.  
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>.
- Lowry, W. P. 1977. "Empirical Estimation of Urban Effects on Climate: A Problem Analysis." *Journal of Applied Meteorology*. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016<0129:EEOUEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016<0129:EEOUEO>2.0.CO;2).
- Parison, S., Hendel, M., & Royon, L. (2020). A statistical method for quantifying the field effects of urban heat island mitigation techniques. *Urban Climate*, 33, 100651.  
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100651>
- Pasquill, F. 1961. "The Estimation of the Dispersion of Windborne Material." *The Meteorological Magazine* 90 (1063): 33–49.

# LES ASPECTS HYDROCLIMARIQUES DANS LE BASSIN VERSANT DE SEBOU(MAROC)ET LA MODELISATION DES CRUES INONDABLES

Chkhami Khalid, Janati Idrissi Mohamed, Yazami Ztait et Elyadari Seddiki

Laboratoire des Etudes Géo-Environnementales et Aménagement et le Développement durable (LAGEA-DD),  
Université Sidi Mohamed Ben Abdellah .Faculté des lettres Sais Fès.khalidchkhami@gmail.com

**Résumé :** Le but de cette étude est d'analyser les aspects hydroclimatiques associées aux crues inondables, notamment pendant les années humides dans le bassin versant de Sebou afin d'apprécier les risques d'inondation dans la basse vallée de l'oued Sebou et de ses affluents. Alors que la période humide du 08 février 2009 a été à l'origine d'importants dégâts matériels et humains ont laissé des séquelles sur les populations sinistrées. Ce qui exige l'étude de rapport pluies/débits pour déterminer les phases hydrologiques extrêmes, et l'importance des crues dans le bassin, en effet, nous nous sommes basés sur l'approche statistique à travers l'étude des pluies et des débits journaliers. Les résultats obtenus indiquent une relation entre les pluies et les débits dans les stations étudiées, qui ont donné de nombreuses phases hydrologiques extrêmes associées aux crues dans les sous-bassins de Sebou. À cet égard, nous avons modélisé la forte crue historique (08 février 2009) dans la plaine du Gharb en utilisant des Systèmes d'Informations Géographiques (ARC-GIS 10.2 et HEC-RAS 5.0.7). En résultant, la zone submergée en aval du bassin varie en fonction de la hauteur d'eau, de l'intensité du débit et de la topographie de la plaine du Gharb.

**Mots clés :** Bassin de Sebou, Aspects hydroclimatiques, Crues, Plaine du Gharb, Risque d'inondation.

## HYDROCLIMATIC ASPECTS IN THE SEBOU WATERSHED (MOROCCO) AND FLOOD MODELING

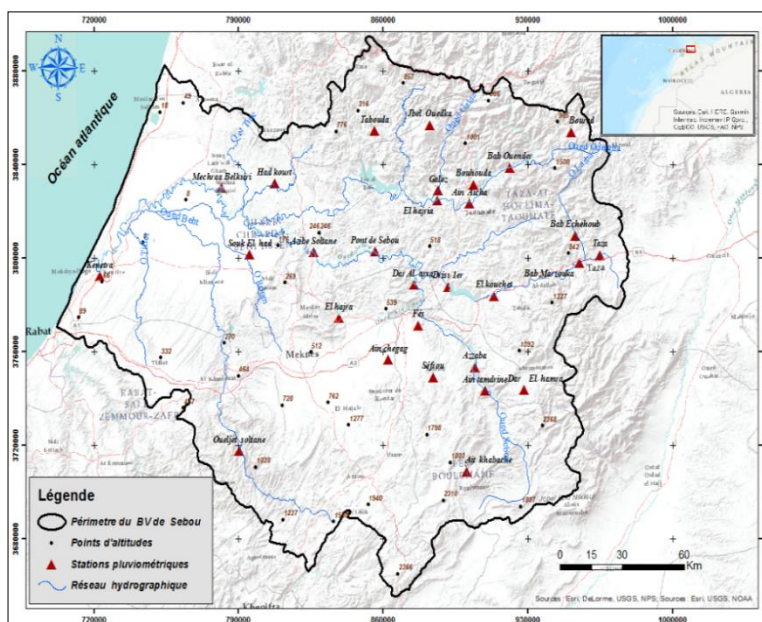
**Abstract:** The aim of this study is to analyze the hydroclimatic aspect associated with floodings especially during wet years in the Sebou watershed in order to assess the risks of flooding in the lower valley of the Sebou river and its tributaries. While the wet period of February 08, 2009 was the cause of significant material and human damage that affected the population. Hence, the study of the rainfall/flow rate aims at determining the extreme hydrological phase and the importance of floods in the basin. In fact, it is based on the statistical approach of rainfall and daily debits. The results obtained indicate a relationship between rainfall and flows in the studied stations, which gave many extreme hydrological phases associated with floods in Sebou. In this regard, we modeled the historic strong flood (February 08, 2009) in the Gharb plain using Geographic Information Systems (ARC-GIS 10.2 and HEC-RAS 5.0.7). As a result, the submerged area downstream of the basin varies depending on the water level, the intensity of the flow and the topography of the Gharb plain.

**Keywords :** Sebou watershed, hydroclimatic aspects, Floods, Gharb plain, Flood risk.

**Introduction:** La variabilité des conditions climatiques est désormais l'une des préoccupations majeures dans le monde aussi bien pour les scientifiques que pour les pouvoirs politiques. Les pluies représentent la majeure composante du climat et sont les plus concernées par la variabilité de leurs régimes aux échelles saisonnières annuelles et interannuelles. Dans le contexte actuel des changements climatiques, la variabilité des pluies se caractérise par la fréquence des événements extrêmes qui sont marqués par des années très sèches où des années très humides (HAIDA, S., 2017). Ces événements extrêmes sont prudemment imputés au changement climatique et sont considérés à l'heure actuelle comme de la variabilité interannuelle naturelle du climat (NORRANT, 2007). Ces changements climatiques abordés à l'échelle mondiale, ont fait l'objet d'études plus ciblées en Afrique de l'Ouest et Centrale (PATUREL et al, 1997) et au Sahel (LE BARBE et al. 1997; LEBEL et al., 2003). Dans ce contexte, le Maroc est parmi les pays du monde qui sont influencés par les phénomènes des crues inondables qui sont des intumescences hydrologiques dont les répercussions sont néfastes sur l'économie des pays. À l'échelle régionale, le bassin versant du Sebou de par ses caractéristiques climatiques, topographiques et lithologiques, monopolise 29% des ressources en eau du Maroc (AHBS, 2010 et 2011) en drainant un système hydrologique marqué par un écoulement irrégulier et torrentiel, principalement sur la chaîne du Rif, ce qui provoque des inondations néfastes sur les centres urbains près des oueds, ainsi qu'une submersion d'une grande partie de la plaine du Gharb.

## 1. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le bassin versant du Sebou occupe, au Nord-Ouest du Maroc, une superficie de 40503 km<sup>2</sup> soit d'environ 5,5% du territoire national. Ses limites s'inscrivent entre le méridien -3°et -6° Ouest, et 33<sup>ème</sup> et 35<sup>ème</sup> parallèles au Nord. Il est limité au Nord par les bassins versants de Loukkos et des bassins côtiers méditerranéens à l'Est par le bassin de la Moulouya, et au Sud par le bassin de Bou Reguerreg et d'Oum Er-rabia. L'oued Sebou prend naissance à 600km en amont du bassin. Son cours d'eau est subdivisé en trois tronçons: le Haut Sebou qui prend sa source dans le Moyen Atlas et collecte ensuite les eaux des oueds Inaoueneet Beht, le Moyen Sebou rejoint par l'Ouergha qui est le plus important affluent du bassin et le bas Sebou qui débouche dans l'océan Atlantique).



Carte.n°1.Situation géographique du BV de Sebou(AHBS;2010 et 2011)

## 2. MÉTHODE ET MATÉRIEL

Le présent travail nécessite la mise en œuvre d'une méthode pluridisciplinaire, qui s'appuie tout d'abord sur une large lecture bibliographique, touchant les différentes problématiques liées à la variabilité hydroclimatique du Bv. Ensuite, nous avons adopté l'approche statistique pour établir les hyétogrammes hydro-pluviométriques des années pluvieuses dans le Bv de Sebou afin d'apprécier le rapport pluies/débits qui permet de savoir les phases humides provoquant des crues inondables. Puis, nous avons essayé de cartographier la crue inondable du 08 février 2009 dans la plaine du Gharb. Finalement, les données hydroclimatiques adoptées par des fichiers de l'Agence du bassin hydraulique du Sebou. Ladurée d'observation varie de 27 à 34 ans (Tab.n°1) :

Tableau. n°1. Stations hydrologiques et période d'observation dans le Bv. de Sebou.

Stations	Séries statistiques	X	Y	Z
Azzaba	1980/81 -2011/12	559,95	359,57	478
Ain Aicha	1980/81 -2011/12	565,2	428,8	230
BabOuender	1980/81 -2006/07	559,5	440,1	312
BabMarzouka	1980/81 -2006/07	615,85	400,85	368
AzibeSoltane	1980/81 -2006/07	492	413,9	45
M Belksiri	1980/81 -2011/12	448,25	441	16
O Soltane	1980/81 -2011/12	456,25	338,06	305

## 3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### 3.1. Aspects hydrologiques et pluviométriques dans le BV de Sebou

Dans ce titre, nous allons traiter les années les plus humides et de forts débits, afin de dégagerle déroulement de leurs saisons hydrologiques à travers l'élaboration des hyéto-

grammes hydrométriques. Le débit journalier durant l'année pluvieuse diffère dans le Bv selon les principaux affluents de Sebou (CHKHAMI.; 2020):

**Dans le Haut Sebou** (Fig. n°1), la répartition journalière pluies/débits à la station d'Azzaba pour l'année 2008-09, présente trois saisons hydrologiques distinctes : l'automne hydrologique débutant le 9 septembre 2008 (5,8 mm) le débit est augmenté rapidement le 11 septembre jusqu'à 126m<sup>3</sup>/s à cause des pluies notables, soit 14,1mm en 2 jours à la station étudiée. Ces valeurs sont sûrement plus élevées sur les montagnes. Cependant, malgré des ressauts de débits, la décrue s'effectue rapidement, car l'aspect orageux et intense de la pluie automnale et les caractéristiques sèches du sol n'ont pas permis une bonne infiltration. Cependant, les nappes étant alimentées par les pluies d'automne, soit 284,4mm d'apport.

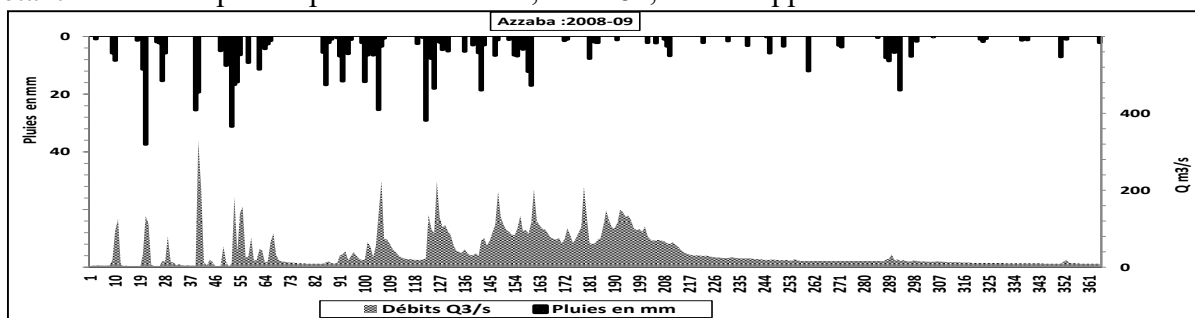


Figure. n°1 :Hyétogrammes hydro-pluviométriques des années pluvieuses dans le Haut Sebou.

L'hiver hydrologique s'est annoncé vraiment avec un très haut débit qui dépasse 225 m<sup>3</sup>/s après des épisodes pluviométriques très importants du premier à la mi-décembre 2008; le total pluviométrique hivernal étant de 260mm pendant 37 jours pluvieux. Ainsi les apports pluviométriques précédents ont alimenté les réservoirs potentiels karstiques qui ont soutenu le débit du 11 mars 2009 qui a atteint 149m<sup>3</sup>/s. Le printemps hydrologique a débuté par une saison d'instabilité de l'écoulement, malgré le pouvoir de régularisation des zones karstiques traduisant quand même la dépendance de l'oued Sebou vis-à-vis de l'apport pluvial qui a dépassé 56,2mm pendant 17 jours de pluie. La prédominance de la stabilité atmosphérique et la médiocrité pluviométrique à partir du mois de mai, la décrue s'est effectuée depuis le premier de ce mois en passant de 20m<sup>3</sup>/s à 9m<sup>3</sup>/s à mi-août. Cette décrue tout de même a été bien soutenue par les sources karstiques qui ont gardé un écoulement régulier d'étiage aux alentours de 10m<sup>3</sup>/s, une caractéristique hydrologique différente de celle du domaine rifain.

• **Au Bv d'Inaouene** (Fig. n°2), la distribution pluie/débit de l'oued Inaouène à deux stations et en deux périodes différentes, apparaît à travers la figure d'évolution des courbes de la station BabMarzouka en 2009-10. Sur cet affluent de l'oued Sebou, l'automne hydrologique, semble faiblement pluvieux; 86mm au total en 11 jours de pluie en 2009. L'oued Inaouène cependant n'a écoulé aucun débit, or, l'apport pluvial était médiocre car le bassin était asséché par l'évaporation liée aux hautes températures estivales. En saison hivernale, le déclenchement de l'écoulement s'effectue le 20-12-2009 (5m<sup>3</sup>/s) pour atteindre un débit maximum de 498m<sup>3</sup>/s le 14 novembre 2010 à la station de BabMarzouka. Le printemps est une saison de décrue de l'oued Inaouène, malgré la régularisation des sources karstiques de Moyen Atlas oriental (système de siphonage). Car après un hiver hydrologique pluvieux les séquences pluviométriques de fin février et du début mars (55,4mm le 09-03-2010) sont à l'origine de la crue maximale de l'année qui a atteint un débit de 888m<sup>3</sup>/s à BabMarzouka le 09-03-2010. Cependant avec l'établissement de la sécheresse climatique depuis la fin du mois de mars la décrue de l'oued Inaouènes'est instaurée rapidement jusqu'au débit d'étiage qui a caractérisé une grande partie de la saison printanière et la totalité de la saison estivale.

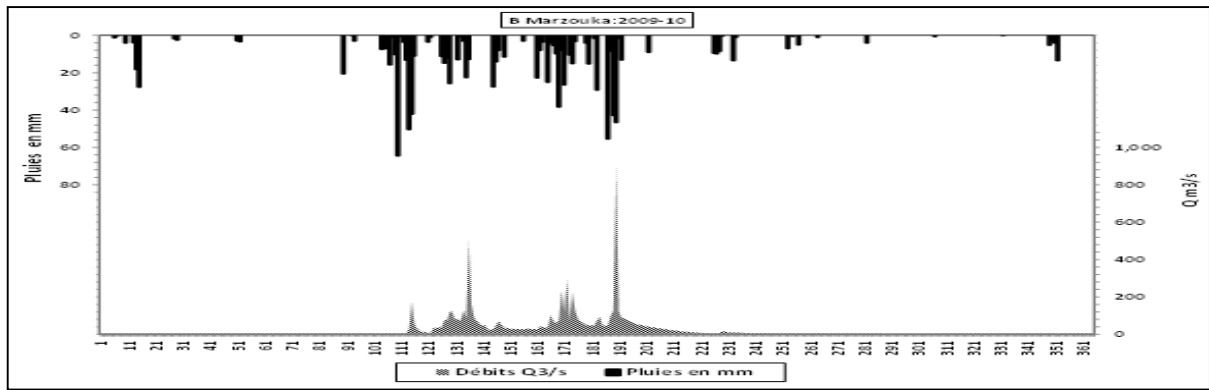
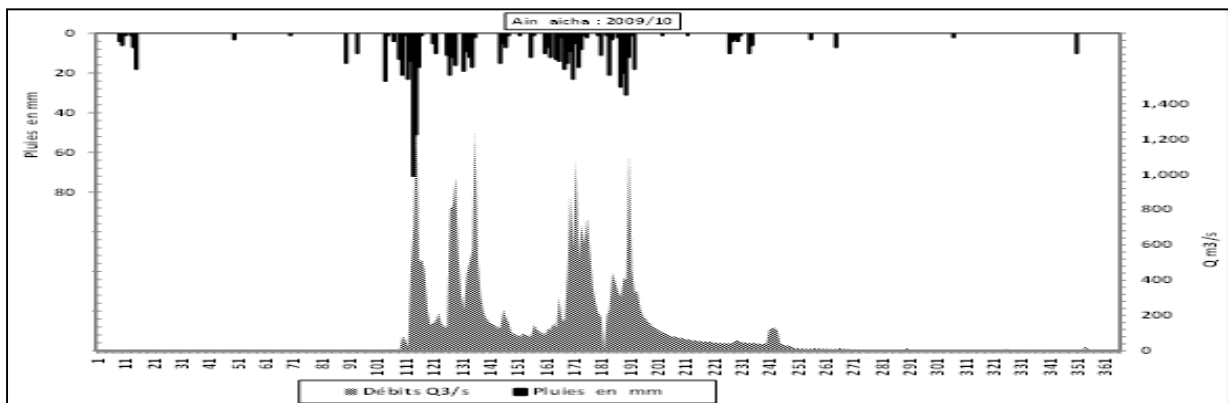


Figure. n°2 :Hyétogrammes hydro-pluviométriques des années pluvieuses au B.v. d'Inaouene.

• **Dans B.v. l'oued Ouergha** (Fig.n°3), l'année 2009-10 est considérée l'une des années les plus pluvieuses dans le bassin avec 850 mm en 79 jours de pluies à Ain Aicha et 1347mm en 83 jours à BabOuender. Cette année présente une bonne répartition des jours pluvieux qui sont regroupés à leur tour en épisodes dont l'apport pluviométrique n'était pas très excessif. En effet, ces épisodes ont constitué trois saisons : une de très faible pluviosité de mi-septembre à la fin de novembre (56mm), avec un débit automnal de 5m<sup>3</sup>/s. La deuxième plus concentrée de mi-décembre jusqu'à la fin de février (596mm), est responsable de la montée successive du débit journalier moyen à 1297m<sup>3</sup>/s le 24-12-2009 après un passage pluvieux qui a apporté 72mm le 23 du même mois. La troisième saison s'étale entre mars et le 21 avril (176mm), où le débit de la crue printanière a atteint 1127m<sup>3</sup>/s le 10-03-2010 après l'avènement d'épisodes pluvieux de 4 jrs; 90mm à la station d'Ain Aicha.



Figures. n°3 :Hyétogrammes hydro-pluviométriques des années pluvieuses au Bv d'Ouergha.

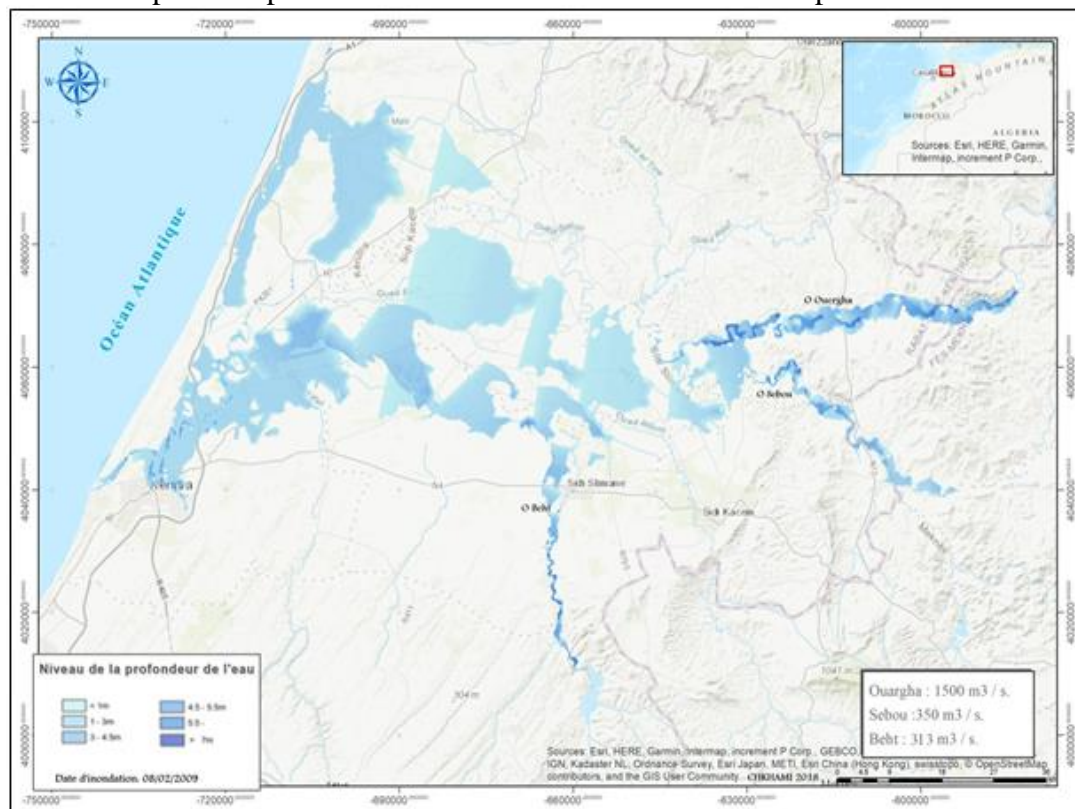
Enfin, le Bvde l'Ouergha, pendant l'année hydrologique 2009-10 a connu une des saisons hivernales les plus pluvieuses, qui est susceptible d'engendrer des crues et des inondations dans le Bvde Sebou, en particulier dans le Gharb. Ainsi l'oued Ouergha a connu pendant cette année quatre crues qui ont charrié un débit journalier excédant 1000m<sup>3</sup>/s à la station Ain Aicha, ce qui montre la menace qu'elle peut y avoir pour les zones aval du bassin.

### 3.2. La cartographie d'inondation historique du 08 février 2009 dans la plaine du Gharb et leurs genèses hydrométéorologiques

La carte n°2 représente la crue inondable de la plaine du Gharb le 08 février 2009. Cette crue est classifiée parmi les événements hydro-climatiques exceptionnels dans le bassin versant de Sebou en prenant en compte le volume d'eau déplacé vers l'aval du bassin et particulièrement la zone du Gharb ont été le théâtre de crues exceptionnelles. Dans ce sens, la situation pluviométrique dans le Bvdu Sebou à la veille de l'épisode pluvieux du 30 janvier au 08 février 2009 a été caractérisée par une grande vallée froide qui a occupé l'Océan Nord

Atlantique marquant le déplacement du courant-Jet subtropical vers le Maroc. Le centre dépressionnaire sur l'atlantique proche a poussé un temps perturbé de NO en direction du bassin. Cette situation pluvieuse a été accompagnée de pluies diluviennes sur les zones rifaines les plus exposées à ce flux humide. Les cumuls des pluies journalières sur le domaine rifain du 30 janvier au 07 février 2009 ont atteint 198mm à Tabouda, 334 mm à la station Ratba en amont de Rafsai, 175mm à la station de BabOuender, et Tissa, 103mm à Ain Aicha. Au bassin d'Inaouene il est tombé; 152,9mm à BabMarzouka et 106mm à BabEchehoub. Au bassin de Behtà Sidi Mokhfi a été arrosée par 212mm lors de cet épisode pluvieux.

On peut noter que la genèse de la crue du 08 février 2008 est due au changement de comportement hydrologique de l'oued Ouergha qui a enregistré un débit journalier de 615 m<sup>3</sup>/s le 06-02-2009 à la station d'Ain Aicha et 397m<sup>3</sup>/s le 02-02-2009 à la station de Galaz. En ce qui concerne le débit journalier de l'oued Sebou il est resté inférieur de 113m<sup>3</sup>/s à la station de Dar Arsa à cause du barrage Idriss I. Cependant, l'oued Beht à la station OueljetSoltane a écoulé 310m<sup>3</sup>/s le 07-02-2009 sur l'oued Beht. Étant donné que l'activité pluviométrique de cette année a débuté depuis le mois de septembre, le cumul enregistré depuis le 1er septembre 2008 au 7 février est considérable sur le Rif; 968mm à la station Ratba, 802mm à BabOuender et 810mm à Tabouda, le barrage d'Al Wahda avait atteint sa capacité maximale de rétention d'eau, ce qui a obligé un écrêtement de 1500m<sup>3</sup>/s sur l'oued Ouergha, 350m<sup>3</sup>/s sur l'oued Sebou par le barrage Allal Al fassi et Idriss I, et 313m<sup>3</sup>/s sur l'oued Beht par le barrage El Kansera. La surface inondée par ces opérations était estimée à 210300ha dans la plaine du Gharb.



Carte. n°2: Spatialisation des inondations historiques (08-02-2009) dans la plaine du Gharb.

La spatialisation de cette crue inondable (carte. n°2), nous a permis de dégager les limites de propagation de l'inondation dans la plaine du Gharb. Comme lors des cas précédents la nuance de profondeur de l'eau est hétérogène d'un endroit à l'autre, puisque la lame d'eau augmente comme nous l'avons dit précédemment dans les fonds des vallées et les dépressions topographiques qui peuvent dépasser plus de 7m, dont l'oued Ouergha et ses bordures.

Concernant l'oued Sebou il y a le douar Mograne (carrefour entre oued Ouergha et Sebou), OuledJerrar et Tekna. Également on retrouve l'inondation de Dar Bellemer et la commune de Sidi Yahya par le débordement des eaux du barrage El Kensara sur l'oued Beht. Dans les zones plus basses du Gharb, les plans d'eau de submersion de l'oued Sebou et ses affluents diminuent à moins de 3m, dans la province de Kenitra-Sidi Yahya (Dar Gueddari, Allal Tazi et Labrahma). Et entre 1 et 2 m dans les zones plus au moins élevées à l'intérieur de la plaine, notamment à la commune de MechrâaBelksiri et au Douar Sidi Kacem Harouch. Cet événement hydrologique catastrophique a laissé de graves répercussions sur les populations de la région surtout avec la submersion de plusieurs milliers d'hectares de terrains agricoles, la destruction des infrastructures et l'effondrement de maisons, ce qui a nécessité l'évacuation de plusieurs familles sinistrées. Les dommages économiques et sociaux sont considérables dans le Gharb (Bouchaib M. ; 2010, Magrane. B. ; 2010).

**Conclusion :** Les années humides associées aux crues inondables dans le Bv de Sebou semblent plus fréquentes dans la série statistique étudiée. Ces phénomènes hydrologiques se manifestent seulement en saison hivernale et printanière selon l'importance des pluies, leurs évolutions dépendent de la durée, de l'intensité et de la répartition spatiale, ainsi que de l'état hydrologique des différents réservoirs avant le début de pluies. Par conséquent, la plaine du Gharb reste le théâtre de ce phénomène hydrologique, dont l'inondation historique du 08 février 2009, qui a permis l'extraction de la hauteur d'eau de l'oued Sebou, Ouergha, et Beht. Elle explique aussi la propagation spatiale des crues qui a changé d'une zone à l'autre suivant la topographie de la plaine et le volume de plan d'eau écoulée. Ainsi la modélisation de cette crue pourra être un outil d'élaboration des cartes informatives des phénomènes hydrologiques historiques, une base des données pour la gestion durable du risque des inondations, et un support cartographique pour les décideurs en matière d'aménagement et d'urbanisme.

### Références bibliographiques

- ABHS (2011) : Etude d'actualité du plan directeur d'aménagement intègre des ressources en eau du BHS.
- ABHS (2010) : Evénements hydrologiques des mois de décembre 2009 et janvier 2010. Royaume du Maroc.
- BOUCHAIB MARGANE (2010) : Evénement hydro-pluviométrique dans la province de Kenitra 2010 ; Inondation du Gharb en janvier –mars 2010; chef du service d'eau, Kenitra.
- CHKHAMI. K (2020): Les caractéristiques hydroclimatiques du bassin versant de Sebou et études des crues inondables: (Genèse Atmosphérique, Spatialisation et Impact sur la plaine du Gharb). Thèse de doctorat, CED : Langues, patrimoine et aménagement spatiale. Faculté des lettres ; Sais- Fès. 342P.
- CHKHAMI K et JANATI IDRISSE A, (2018): Le comportement hydrologique et la genèse des crues inondables dans le bassin versant de l'oued Ouergha (Maroc) ; Revue : Espace et Développement sous-titre : les ressources territoriales entre fragilité et perspectives de durabilité ; N° 1-janvier 2018. p 17-35.
- HAIDA. S ; 2017 : Analyse De La Variabilité Hydroclimatique Et Impacts Des Barrages Sur le Régime hydrologique d'une rivière de zone semi-aride : Le Sebou au Maroc ; European Scientific Journal February 2017 édition vol.13, No.5.
- LE BARBE. L., LEBEL. T., 1997. Rainfall climatology of the HAPEX Sahel region during the years 1950–1990, Journal of Hydrology, Volume 188-189, February 1997, Pages 43-73.
- LEBEL. T., DIEDHIOU. A., LAURENT. H., 2003. Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at hydrological scales, Volume 108, Issue D8, 27 April 2003.
- MAGRANE. B (2010): Evénement hydro-pluviométrique dans la province de Kenitra 2010.
- NORRANT. C., 2007. Variabilité climatique passée, changement climatique futur : Que peut-on réellement observer ? Air Pur N° 72 - Deuxième semestre 2007.
- PATUREL. J.E., Servat E., Kouame B., Lubes-Niel H., Fritsch J.M., Masson, J.M., 1997. Manifestation d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale, IASH 240, 21-30.



# THE VARIABILITY OF PRECIPITATION AMOUNTS ALONG THE LOWER DANUBE. CASE STUDY: CĂLĂRAȘI-PĂTLĂGEANCA SECTOR (ROMANIA)

Constantin (oprea) D. M.<sup>1</sup>, Onțel I.<sup>2</sup>, Grigore E.<sup>1</sup>, Ilea r.G.<sup>1, 2</sup>

(1) University of Bucharest, Faculty of Geography, 1 N. Bălcescu Boulevard, 010041, Bucharest, Romania, [oprea.constantin@geo.unibuc.ro](mailto:oprea.constantin@geo.unibuc.ro); [elazigzag@gmail.com](mailto:elazigzag@gmail.com)

(2) National Meteorological Administration, 97 București-Ploiești Street, 013686, Bucharest, Romania, [irina.ontel@gmail.com](mailto:irina.ontel@gmail.com); [raul11\\_bv@yahoo.com](mailto:raul11_bv@yahoo.com)

**Summary:** The aim of our study is to analyze the space-time variability of the precipitation amounts which ensures the possibility to objectively evaluate the consequences on water resources. The analysis of precipitation variability was made for Călărași-Pătlăgeanca Sector of the Lower Danube, which is distinguished by water surfaces that occupy a fairly high percentage and by the largest width of the meadow. The analyzed pluviometric parameters, for the period 2000-2019, are the monthly average, annual and the maximum amounts falling within 24 hours. The meteorological data come from Călărași and Galați weather stations, which belong to the National Meteorological Administration. Also, the precipitation anomalies at the level of January, July and yearly were calculated and the Normalized Difference Drought Index (NDDI) was extracted from the MODIS satellite images. For the study area, there was found a great variability of the precipitation amounts, both from the point of view of the registered values and from the inconsistency of the years in which they occurred.

**Key words:** variability, regime, precipitation, Călărași-Pătlăgeanca, Lower Danube.

**Résumé :** L'objectif de notre étude est d'analyser la variabilité spatio-temporelle des quantités de précipitations, ce qui permet d'évaluer objectivement les conséquences sur les ressources en eau. L'analyse de la variabilité des précipitations a été faite pour le secteur Călărași-Pătlăgeanca du Bas Danube, qui se distingue par des surfaces d'eau qui occupent un pourcentage assez élevé et par la plus grande largeur de la prairie. Les paramètres pluviométriques analysés, pour la période 2000-2019, sont les quantités moyennes mensuelles, annuelles et maximales tombant en 24 heures. Les données météorologiques proviennent des stations météorologiques de Călărași et Galați, qui appartiennent à l'Administration Météorologique Nationale. De plus, les anomalies de précipitation au niveau de janvier, juillet et annuel ont été calculées et l'Indice de Différence de Sécheresse Normalisé (NDDI) a été extrait des images satellites MODIS. Pour la zone d'étude, on a constaté une grande variabilité des quantités de précipitations, tant du point de vue des valeurs enregistrées que de l'incohérence des années au cours desquelles elles se sont produites.

**Mots clés :** variabilité, régime, précipitations, Călărași-Pătlăgeanca, Le Bas-Danube.

## Introduction

In the current context of global warming, a hydrological cycle has been observed, so that the effects of climate change on water resources are reflected in: water supply, water quality, water requirements and in extreme events (floods and droughts) (IPCC, 2018). Precipitation is an essential feature of the climate due to the importance they have on the other meteorological elements as well as on the different activities in the social sectors. The atmospheric precipitation are directly or indirectly the natural source of water supply to the soil and contributes to its formation. The knowledge of the space-time variability of the precipitation regime offers the possibility to objectively evaluate the effects on the water resources. The course of the Lower Danube represents a significant part of Romania's surface water resources, through the length of 1075 km (38% of the total length of the river) and 28.4% of its catchment area (Institutul de Geografie, 2005).

In this article we will analyze the variability of precipitation amounts in Călărași-Pătlăgeanca Sector (Figure 1) is distinguished by the largest width of the river meadow (25-30 km), the branching of the river into two main arms that include two large islands and a length of 328 km (30.5% of the length of the Lower Danube) (Pătru et al., 2006). From a climatic point of view, it is characterized by a temperate continental climate with arid influences (Institutul de Geografie, 2005).

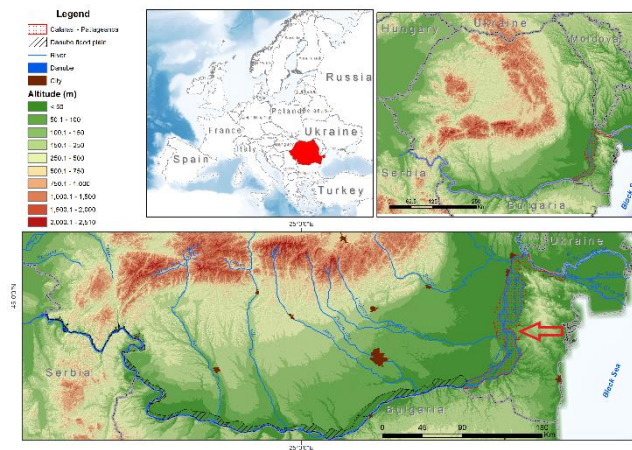


Figure 1. The location of the study area

## 1. Data and methods

The analysis of the variability of precipitation amounts (the average monthly amounts and the maximum amounts falling within 24 hours) will be made for the weather stations (WS) Călărași and Galați, belonging to the National Meteorological Administration (NMA), for the period 2000-2019. These stations are representative for the study area, both by the geographical location and by the difference in altitude between the stations (Călărași-18 m and Galați-69 m) (Figure 2). The used meteorological data are extracted from the NMA databases, being also used to calculate the standardized anomalies at the year level, January and July. These meteorological data are supplemented by the MODIS satellite images on the basis of which the Normalized Difference Drought Index (NDDI) was extracted. The monthly NDDI was calculated based on daily surface reflectance from MOD09GA v006, 500 m resolution (Vermote and Wolfe, 2015).

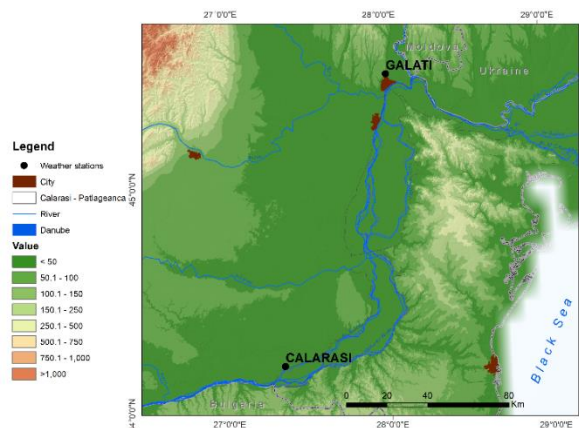


Figure 2. The location of the weather stations in the study area

## 2. Results and discussions

On the Romanian territory, the precipitation are predominantly in the form of rains, being very uniform in time and space (Constantin, 2013). The annual precipitation amounts, for the average latitudes of Europe, have not registered significant changes since 1960, and the heavy precipitation have registered an increase of both frequency and intensity (EEA, 2017). Along the Lower Danube, the amounts of precipitation decrease from the West to the East, as a result of the decrease of the altitude and the decrease of the influence of the maritime air

simultaneously with the increase in the same sense of the continentalism degree. In the analyzed sector of the Lower Danube, the weakening of the thermic convection above the water is also added (Institutul de Geografie, 2005). For the analyzed period, at Călărași and Galați WS, there were registered annual precipitation amounts of 557.1 mm and 509.4 mm, respectively, distributed monthly, according to Figure 3.

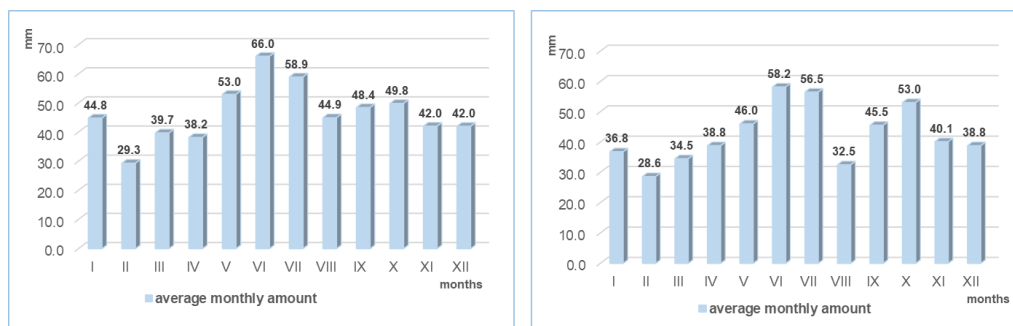


Figure 3. The annual average monthly precipitation at Călărași (left) and Galați (right) weather stations for the period 2000-2019. (Source: NMA archive for precipitation values)

### 2.1. The variability of the monthly and annual average precipitation amounts

The non-periodic variations of precipitation from one year to another are highlighted by the variability of their monthly and annual amounts. The succession and instability of the barrel centers which act over Romania determine significant fluctuations of the monthly and annual precipitation amounts at different spatial scales (ANM, 2008). The high variability of the monthly precipitation amounts results both from the lowest and highest values of the analyzed stations, as well as from the inconsistency of the years in which they occurred (Table 1).

Table 1. The variation of monthly precipitation amounts (mm) in Călărași-Pătlăgeanca Sector, for the period 2000-2019. (Source: NMA archive for precipitation values)

Călărași WS												
months	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
highest amount	101.9	72.0	98.4	85.1	154.3	135.6	164.6	99.6	137.8	138.5	93.6	135.9
year	2012	2015	2015	2006	2012	2014	2010	2004	2003	2002	2015	2014
monthly average amount	44.8	29.3	39.7	38.2	53.0	66.0	58.9	44.9	48.4	49.8	42.0	42.0
lowest amount	13.4	2.0	5.6	4.6	15.6	12.9	4.1	6.1	2.8	4.4	1.0	3.1
year	2001	2014	2012	2018	2000	2003	2007	2008	2011	2000	2011	2013
Galați WS												
months	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
highest amount	78.9	61.0	76.5	84.8	95.9	128.2	185.1	116.2	111.0	207.8	122.2	111.7
year	2014	2018	2015	2017	2012	2001	2005	2004	2016	2016	2015	2012
monthly average amount	36.8	28.6	34.5	38.8	46.0	58.2	56.5	32.5	45.5	53.0	40.1	38.8
lowest amount	5.7	2.1	3.5	0.6	11.0	11.9	2.6	1.2	3.2	3.0	0.7	1.8
year	2001	2008	2011	2018	2015	2003	2007	2018	2017	2018	2011	2015

The highest monthly precipitation amounts ranged between 72.0 mm and 164.6 mm at Călărași station, exceeding the multiannual average of the respective months by 42.7 mm (February) and 105.6 mm (July), respectively. For Galați station, the registered values were between 61.0 mm and 207.8 mm, exceeding the monthly average by 32.4 mm (February) and 154.8 mm (November), respectively. The deviation of November 2016 (Galați) is the largest positive deviation in the study area (Table 1). The lowest monthly precipitation amounts vary between 1.0 mm and 15.6 mm at Călărași station and between 0.7 mm and 19.9 mm for Galați station (Table 1). In terms of percentage, compared to the respective multiannual monthly averages,

the values are less than 30%. Based on Table 1, it is found that the positive quantitative deviations are much higher than the negative ones and follow, in general, the evolution of the annual regime of the monthly multiannual averages.

The high variability of the annual precipitation amounts materialized during the analyzed period (2000-2019), both in excess of precipitation and in the drought phenomenon. Generally, dry or rainy years are grouped in 2-3 consecutive years (Constantin, 2013). For Călărași station, both the highest annual amount of precipitation (858.0 mm-2005) and the lowest annual amount of precipitation (336.4 mm-2000) were registered in the first part of the analyzed period (Figure 4). For Galați station, the highest and lowest values of the annual amount of precipitation were recorded in the second part of the analyzed period, being of 740.5 mm (2016) and 280.8 mm (2019) respectively (Figure 4).

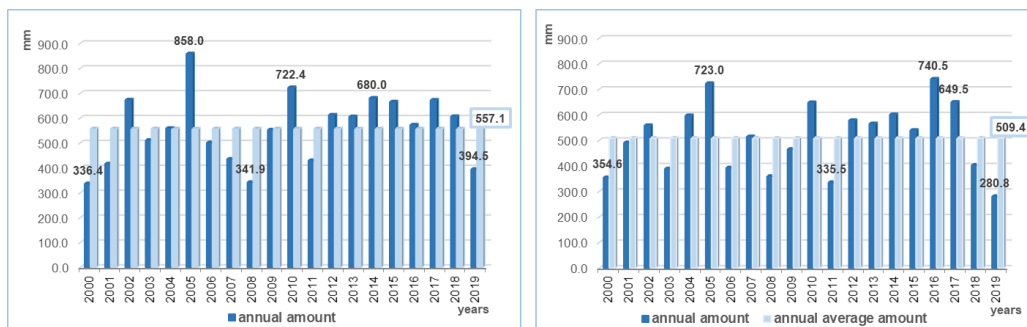


Figure 4. The variation from one year to another of the annual precipitation amounts compared to the multiannual average at Călărași WS (left) and Galați WS (right) for the period 2000-2019. (Source: NMA archive for precipitation values)

In the period 2000-2019, there is a higher frequency of positive precipitation anomalies, at both weather stations, for January and year-round. In July, negative anomalies have a higher frequency (Figure 5).

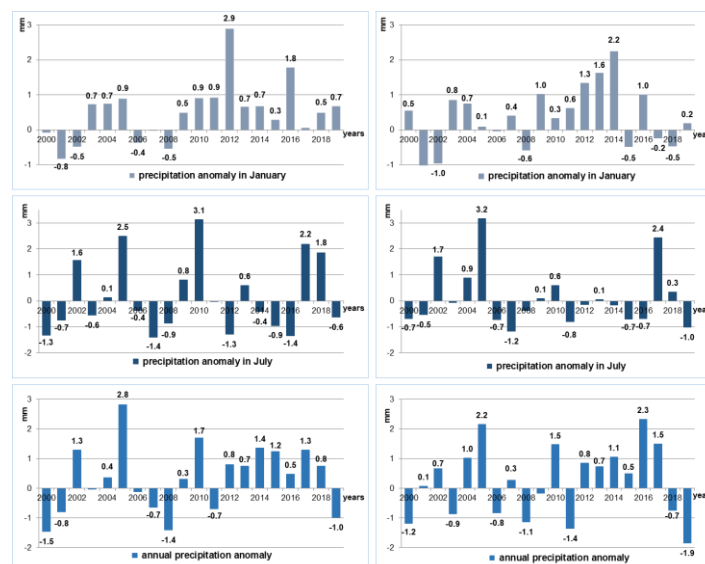


Figure 5. The precipitation anomalies at Călărași WS (left) and Galați WS (right) for the period 2000-2019. (Source: NMA archive for precipitation values)

## 2.2. The variability of the maximum precipitation amounts falling within 24 hours

The accumulation of large amounts of precipitation falling within 24 hours is random both in space and in time, being subjected to thermo-baric processes inside the air mass, and can have an advective and frontal character, but also a local one. There is a slight increase in the frequency and values of precipitation in 24 hours in the second part of the analyzed period, after 2011, for both weather stations (Table 2).

Table 2. The maximum monthly precipitation falling within 24 hours (mm) in Călărași-Pătlașeanca Sector, for the period 2000-2019. (Source: NMA archive for precipitation values)

Călărași WS												
decade / months	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2001-2010	20.6	20.0	22.7	26.0	28.1	33.0	68.6	66.9	60.8	54.2	21.0	23.7
2011-2019	38.1	17.6	30.2	22.6	36.4	40.3	37.4	39.8	42.0	75.4	34.7	55.6
2000-2019	38.1	20.0	30.2	26.0	36.4	40.3	68.6	66.9	60.8	75.4	34.7	55.6
Galați WS												
decade / months	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2001-2010	34.5	18.3	27.1	19.0	28.5	43.3	99.2	36.3	39.4	47.7	36.6	36.7
2011-2019	32.8	19.0	32.6	30.8	33.8	32.6	73.2	17.2	44.8	90.6	31.4	39.1
2000-2019	34.5	19.0	32.6	30.8	33.8	43.3	99.2	36.3	44.8	90.6	36.6	39.1

### 2.3. The Normalized Difference Drought Index (NDDI)

NDDI is a relatively new index in the scientific literature, used in monitoring the drought phenomenon. This index was analyzed for the years: 2000 (negative precipitation anomalies for both stations), 2007 (negative anomaly for Călărași WS and positive for Galați WS) and 2015, 2017 (positive precipitation anomalies for both stations). Values greater than 0.5 of the NDDI highlight the areas affected by drought (Nerțan and Panaitescu, 2016). The drought phenomenon is present in Călărași-Pătlașeanca Sector, in the four years analyzed (Figure 6), due to the descending air currents that occur over large areas of water, thus destroying the cloud systems and reducing the precipitation amounts (Institutul de Geografie, 2005). The year 2007 stands out in the analysis of the NDDI index, with values higher than 0.5, on a large area of the study area (Figure 6b). This year occupies the second place, in the ranking of the warmest years in Romania, for the period 1900 - 2018 (Mateescu, 2019).

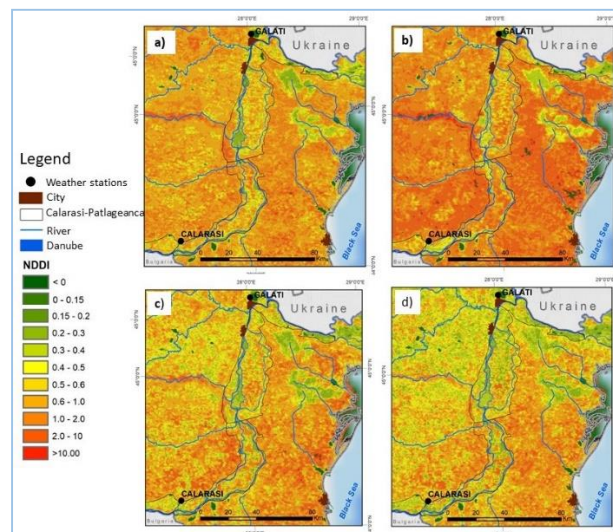


Figure 6. The spatial distribution of the NDDI Index for the years: 2000 (a), 2007 (b), 2015 (c) and 2017 (d) in Călărași-Pătlașeanca Sector.

## Conclusions

In Călărași-Pătălăgeanca Sector of the Lower Danube, for the period 2000-2019, the dominant note is the decrease of the precipitation amounts from the South (Călărași WS) to the North (Galați WS). There was also a large variability of the amounts of monthly, annual and maximum precipitation within 24 hours, both in terms of values recorded and inconsistent with the years in which they occurred. The values of the NDDI index have indicated the presence of the drought phenomenon in the study area, being a paradox for a region in which the water surfaces occupy a rather high percentage.

The analysis of the time-space variability of the precipitation amounts can ensure a better management, both in the management and security of the waters and in the socio-economic adaptation to the climatic changes.

## References

- ANM (Administrația Națională de Meteorologie/National Meteorological Administration), 2008. *Clima României*, Editura Academiei Române, București, 365 p.
- Constantin D.M., 2013. *Relația climă-poluarea mediului înconjurător în arealul municipiului Slatina*, Editura Universitară, București, 257 p.
- EEA (European Environment Agency), 2017. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report accessed to <https://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-impacts-and-vulnerability-2016>.
- Institutul de Geografie, 2005. *Geografia României*, vol V, Editura Academiei Române, București, 967 p.
- IPCC, 2018. Special report: global warming of 1.5°C, accessed to <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-3/>.
- Mateescu E., 2019. Dependența producțiilor de schimbările climatice—evoluția acestora în sezonul agricol următor, *Conferință AGROW*, București.
- Nerțan A.T., Panaitescu V., 2016. Importanța utilizării datelor de teledetecție pentru monitorizarea stării de vegetație a culturilor agricole, a *XVI-a Conferință internațională – multidisciplinară „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”*, Sebeș, accessed to <http://stiintasiinginerie.ro/wp-content/uploads/2016/07/30-33-IMPORTAN%C8%9AA-UTILIZ%C4%82RII-DATELOR-DE-teledetecție.pdf>
- Pătru I., Zaharia L., & Oprea R., 2006. *Geografia fizică a României. Climă, ape, vegetație, soluri*, Editura Universitară, București, 175 p.
- Vermote E., & Wolfe R., 2015. MOD09GA MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 1km and 500m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, accessed to <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD09GA.006>.

# IMPACTS DE LA PLUVIOMÉTRIE DE L'HIVERNAGE 2019 SUR LES CULTURES ET LES STRATÉGIES D'ADAPTATION DES PRODUCTEURS DANS LA COMMUNE DE MABO (RÉGION DE KAFFRINE, SENEGAL)

Sambou Pierre Corneille, Yade Madiop, Diedhiou Yaya Mansour

Laboratoire de Climatologie et d'Environnement / Département de Géographie (FLSH/UCAD), Dakar – Sénégal, [pierre.corneille.sambou@ucad.edu.sn](mailto:pierre.corneille.sambou@ucad.edu.sn), [yademadiop@hotmail.com](mailto:yademadiop@hotmail.com), [dyayamansour@yahoo.fr](mailto:dyayamansour@yahoo.fr)

**Résumé :** Cette étude analyse les impacts de la pluviométrie de 2019 dans la commune de Mabo sur les espèces cultivées et sur les stratégies d'adaptation des populations à Mabo. Les données pluviométriques journalières de 2019 de Mabo sont collectées au niveau du Service Départemental du Développement Rural (SDDR) de Birkelane. Les températures de la station synoptique de Kaolack permettent de calculer l'ETP et les besoins en eau des cultures. La collecte des données est complétée par une enquête de terrain qui a concerné 172 ménages répartis sur 14 villages. Les résultats montrent un hivernage caractérisé par une pluviométrie irrégulière entraînant un début de la saison culturale tardif dû à l'apparition d'une pause ayant entraîné des resemis de l'arachide et du maïs. Les besoins en eau de ce dernier n'ont pas été satisfaits, surtout à partir de la dernière décennie de septembre, d'où un déficit de ses rendements de 33 %. Parmi les stratégies d'adaptation, nous notons la pratique de l'élevage et du commerce mais aussi l'emploi des variétés hâtives.

**Mots-clés :** pluviométrie 2019, besoins en eau des cultures, stratégies d'adaptation, Commune de Mabo (Sénégal).

**Abstract:** This study analyzes the impacts of the 2019 rainfall in the municipality of Mabo on cultivated species and on the adaptation strategies of populations in Mabo. Mabo's 2019 daily rainfall data is collected at the Departmental Rural Development Service (SDDR) of Birkelane. The temperatures of the Kaolack synoptic station are used to calculate the ETP and the water requirements of the crops. Data collection is completed by a field survey which involved 172 households spread over 14 villages. The results show a rainy season characterized by irregular rainfall leading to a late start to the growing season due to the appearance of a pause which led to reseeded of peanuts and corn. The latter's water needs were not met, especially from the last decade of September, resulting in a yield deficit of 33%. Among the adaptation strategies, we note the practice of breeding and trading but also the use of early varieties.

**Keywords:** Rainfall 2019, crop water needs, adaptation strategies, Municipality of Mabo (Senegal).

## Introduction

La commune de Mabo se situe dans la région de Kaffrine, au Sénégal. Elle est localisée dans l'arrondissement qui porte le même nom et au Sud du Département de Birkelane (figure 1). Elle fait partie du domaine climatique nord-soudanien continental, avec en moyenne des quantités annuelles de pluie variant entre 500 et 1000 mm (Sagna, 2007). Faisant globalement partie du bassin arachidier qui constitue 42,1 % des terres arables (CSE, 2018), 80 % de sa population a comme principale activité l'agriculture (PDC Mabo, 2016-2021). Or, du fait de la variabilité pluviométrique des pays sahéliens (Sagna *et al.*, 2021) et dans le bassin arachidier (Sow *et al.*, 2020), les rendements et les productions sont tantôt excédentaires tantôt déficitaires. En se basant sur l'hivernage 2019, cette étude analyse les impacts de la pluviométrie sur les espèces les plus cultivées et les stratégies mises en œuvre par les producteurs pour mieux faire face à cette variabilité pluviométrique. D'après les données tirées de la Direction de l'Analyse de la Prévision et des Statistiques Agricoles (DAPSA), les rendements de 2019 de l'arachide, du mil et du maïs font partie des plus bas durant ces 5 dernières années.

## Données et méthode

L'analyse de la pluviométrie de l'hivernage 2019 s'effectue grâce aux données journalières du poste pluviométrique de Mabo sur la période allant du 1<sup>er</sup> juin au 31 octobre. Ce poste est suivi par le Service Départemental du Développement Rural (SDDR) de Birkelane. Cependant, pour déterminer les besoins en eau des plantes, nous avons utilisé les données de température de la station synoptique de Kaolack sur la normale 1981-2010. Cette station dispose de données journalières régulières sur une longue période et est proche du poste de Mabo de près de 50 km. Ses données ont été obtenues à l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie

(ANACIM). Elles nous ont permis de déterminer l'évapotranspiration potentielle (ETP) à partir de la formule de Oudin *et al.* (2005). Les coefficients culturaux (kc) de l'arachide, du mil et du maïs sont ceux de Dancette (1983, cité par Sarr *et al.*, 2005).

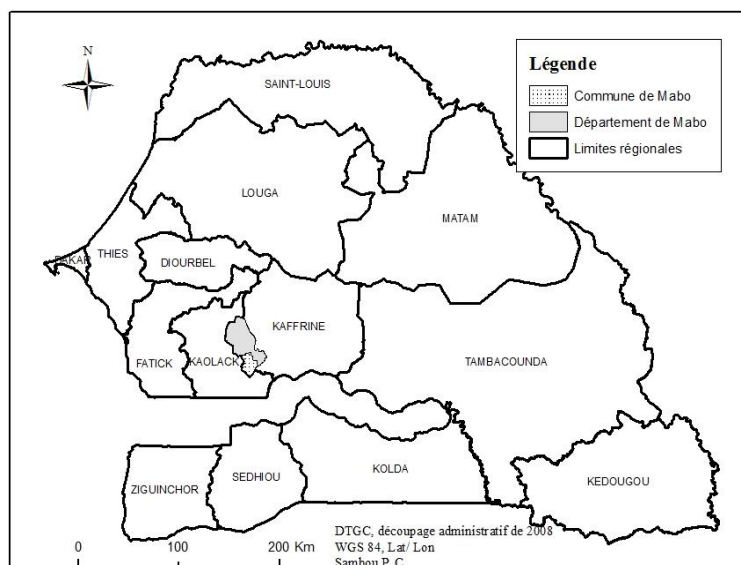


Figure 19. Localisation de la commune de Mabo.

Les données sur les rendements ont été collectées au niveau de la DAPSA. Ce sont celles de 2014 à 2019, période qui a permis de procéder, comme cela se fait en statistiques agricoles, à une comparaison entre la situation de 2019 et celle de la moyenne des 5 dernières années, soit 2014-2018.

Pour les enquêtes de terrain, les données démographiques ont été collectées au niveau de l'Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD). Elles sont issues du dernier Recensement Général de la Population et de l'Habitat de l'Agriculture et de l'Élevage (RGPHAE, 2013). Les enquêtes ont concerné 1/3 des villages de la commune soit 14 localités comprenant un total de 1032 ménages (ANSD, 2013). Ce sont 50 % du tiers de cet effectif, soit 172 ménages qui sont enquêtés.

## 2. Résultats

### 2.1. Evolution de la pluviométrie de l'hivernage 2019

#### 2.1.1. La chronologie de la pluviométrie

La pluviométrie a démarré le 30 juin et s'est terminé le 7 octobre (figure 2), avec 81 % des précipitations tombées entre mi-août et mi-septembre soit 618 mm sur un cumul total de 760,2 mm. Cette situation confirme la variabilité pluviométrique intra-saisonnière fréquente au Sahel.

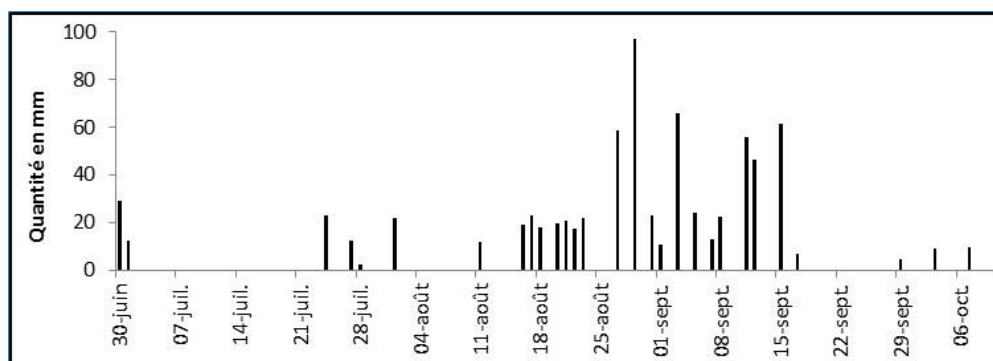


Figure 20. Cumuls pluviométriques journaliers (en mm) entre le 30 juin et le 9 octobre 2019, à Mabo.



### 2.1.2. Les début, fin et durée de la saison des pluies et de la saison culturale 2019

Après la première pluie de 29,3 mm reçue le 30 juin et celle du lendemain qui a enregistré 12,5 mm, les producteurs ont semé l'arachide et le maïs. Les enquêtes de terrain menées auprès de la population locale ont montré que ces deux espèces ont été cultivées par 100 et 68 % des producteurs. Les semis ont été favorisés par le fait que la quantité de pluie minimum requise (20 mm) était atteinte. La seconde pluie reçue le lendemain a conforté les producteurs dans leurs opérations de semis. C'est ce qui justifie le fait que 60 % des semis se soient opérés à la fin du mois de juin et au début du mois de juillet (figure 3). Toutefois, si on tient compte du critère agro-climatique de démarrage de la saison culturale<sup>3</sup>, le véritable démarrage de la saison est à partir du 23 juillet, soit 23 jours après la première date utilisée par les producteurs pour semer. La 1<sup>re</sup> date de semis de 2019 représente donc un « faux départ » ayant entraîné un échec de semis. En effet, elle a été suivie d'une longue pause ayant poussé les paysans à semer à nouveau l'arachide et le maïs à partir du 23 juillet.

La pause est intervenue durant la phase de germination des plantes, soit 4 à 5 jours après les semis, et post-germination. Cette situation a été évoquée par le Groupe de Travail Pluridisciplinaire (GTP) comme suit : « Dans le Centre Sud (Kaffrine et Kaolack), de longues pauses pluviométriques ont été notées, occasionnant à Nioro un faux départ suite à un arrêt des pluies de plus de 21 jours, après la pluie du 29 juin »<sup>4</sup>.

Les semis qui se sont déroulés de la fin mai au milieu de juin, sont ceux du mil, cultivé d'après les enquêtes de terrain par tous les producteurs. Cette céréale est pratiquement la seule qui est semée sur sol sec, c'est-à-dire avant les premières pluies. Ce type de semis lui assure un meilleur rendement (Ndiaye *et al.*, 2005) et permet aux producteurs de gagner du temps lors du semis de l'arachide. En effet pour cette dernière, plus on s'éloigne de la date de la première pluie utile, plus les pertes en rendements s'accroissent. En effet, sa date de semis doit être le plus précoce possible (Ba *et al.*, 2005).

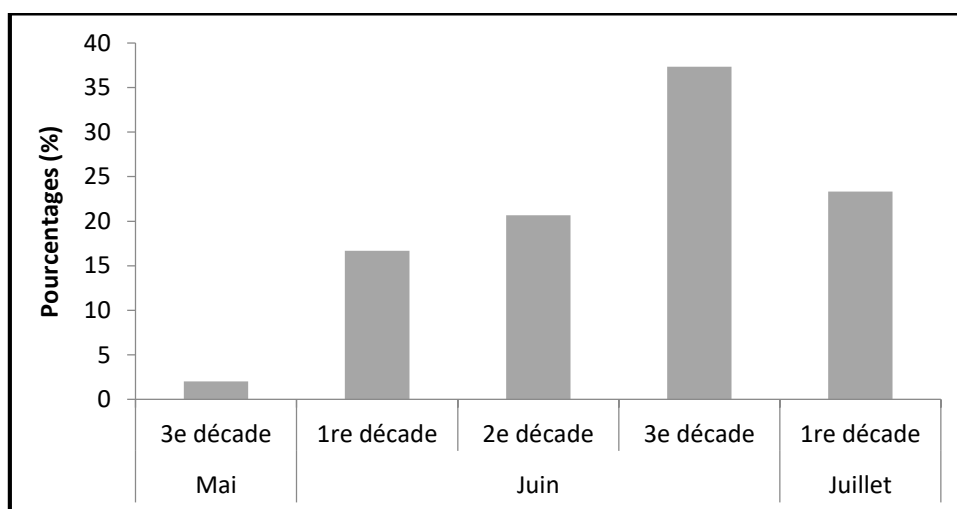


Figure 21. Fréquence des semis durant l'hivernage 2019 à Mabo (source : enquêtes de terrain).

<sup>3</sup> Nous avons adapté la définition de Guèye et Sivakumar avec comme date de début de la saison culturale celle durant laquelle, après le 1<sup>er</sup> juin, on reçoit une quantité de pluie  $\geq$  à 20 mm en 1 ou 2 jours consécutifs sans pause sèche supérieure à 10 jours dans les 30 jours qui suivent (Guèye et Sivakumar, 1992 ; Sarr, 2006).

<sup>4</sup> Bulletin agrométéorologique décadaire du 11 au 20 juillet 2019 rédigé par le GTP. Ce dernier est coordonné par l'ANACIM. Il se penche sur le déroulement de l'hivernage chaque 10 jours ou décade.

La fin de l'hivernage est observée le 7 octobre. La fin de la saison culturale la suit de 4 jours, enregistrée le 11 octobre. Cette légère différence confirme les résultats de Diop (1996) et de Guèye et Sivakumar (1992) selon lesquels les fins d'hivernage sont moins variables que les débuts. La fin de la saison culturale correspond à « *l'interruption des apports en eau (arrêt des pluies et épuisement de la RU)* » (Diop, 1996). Cette définition est complétée par Stern *et al.* (2006) qui tiennent compte d'une demande évaporative de 5 mm/jour relativement à une capacité de rétention du sol de 100 mm. Au bout de deux décades ou 20 jours, la réserve utile s'épuise (5 mm/jour x 20 jours = 100 mm). La date de fin d'hivernage est donc celle où, après le 1<sup>er</sup> septembre, la réserve utile (RU) s'épuise.

L'hivernage a donc duré 99 jours et la durée de la saison culturale est plus courte de 20 jours que celle de l'hivernage, soit 79 jours. Les variétés de 90 jours auront un manque à gagner de 11 jours pour boucler leur cycle.

## 2.2. Les impacts sur les rendements

### 2.2.1. Analyse des rendements de 2019

Par rapport à la moyenne des 5 dernières années, les rendements obtenus en 2019 ont été déficitaires de 33 % pour le maïs et de 5,3 % pour le mil (tableau 1). L'arachide note un excédent quasi nul de 0,4 %.

Tableau 1. Les rendements des cultures dans le département de Birkelane (source : DAPSA, 2019).

Cultures	Mil	Arachide	Maïs
<b>Rendements 2019 (kg/ ha)</b>	900	1200	957
<b>Rendements 2014-18 (kg/ ha)</b>	950	1195,5	1426
<b>Ecart en %</b>	-5,3	+ 0,4	-33

### 2.2.2. Le bilan hydrique des cultures

Le bilan hydrique sert à apprécier les apports en quantité d'eau tombée par rapport aux besoins en eau des plantes qui dépendent de leurs coefficients culturaux (kc). Les 718,4 mm reçus entre la dernière décade de juillet et la 2<sup>e</sup> décade d'octobre sont supérieurs de 89, 116 et 31 % aux besoins en eau des différentes spéculations qui sont de 379,4 mm pour le mil de 90 jours, 332,7 mm pour l'arachide de 90 jours et 547 mm pour le maïs de 100 jours. Cependant, à l'échelle décadaire, une insatisfaction des besoins en eau est notée au niveau de la deuxième décade postérieure aux semis et à partir de la dernière décade de septembre (figure 4). Les déficits ont été de 1, 43, 24 et 39 mm pour le mil et de 9, 35, 15 et 32 mm pour l'arachide. Le maïs a été le plus impacté sur les deux premières et les 4 dernières décades. Ses déficits en eau ont été de 8, 24, 60, 43, 53 et 36 mm.

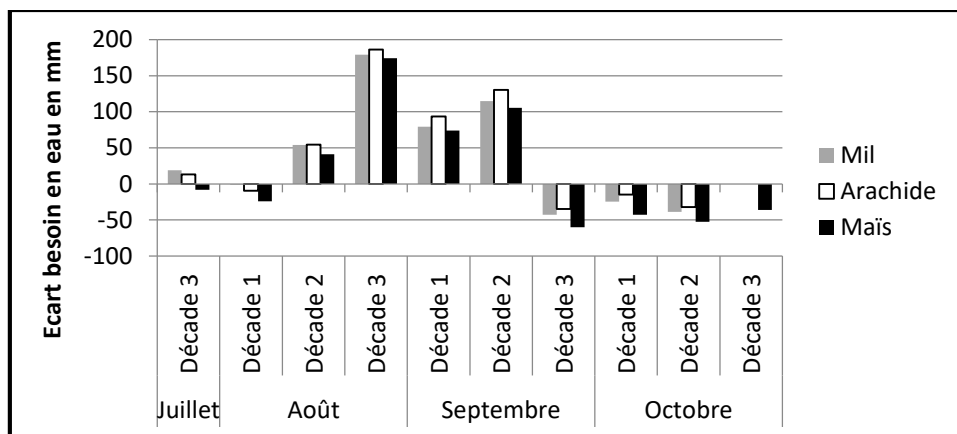


Figure 22. Ecart par rapport aux besoins en eau décadaires des plantes

### 2.3. Quelques stratégies d'adaptation des producteurs

Les enquêtes de terrain ont révélé que les producteurs de Mabo ont, habituellement, plusieurs alternatives pour mieux faire face à l'irrégularité des rendements induite par la variabilité pluviométrique.

En effet, à part l'agriculture, les producteurs s'activent surtout dans l'élevage et le commerce avec 89 et 37 % des enquêtés. Les activités les moins notées sont la pratique du maraîchage, de la maçonnerie, du transport en charrettes, l'enseignement et la couture avec 11, 6, 5 et 3 %. Les deux premières activités sont très liées à la pratique de l'élevage. En effet, d'après les enquêtes 89 % disposent de chevaux, qui vont aider dans le transport aussi bien de marchandises que des populations. 77, 65 et 45 % élèvent des chèvres, moutons et bœufs qui sont parfois vendus pendant les « loumas » ou marchés hebdomadaires et cérémonies religieuses.

Pour mieux faire face au démarrage tardif de la saison des pluies, les producteurs emploient ces dernières années des variétés à cycle moins long. D'après les enquêtes menées à Mabo, en 2019, ce sont, pour le mil, le *Souna 3* et le *Thialack 2*, avec des cycles de 90 et 95<sup>5</sup> jours, qui ont été les plus cultivées. Pour l'arachide, ce sont les variétés *55-437* ou « Fouré<sup>6</sup> » et *Fleur 11*. Leurs cycles varient de 80 à 90 jours. Pour le maïs, ce sont les variétés *Early Thai* et *Obatampa* avec des cycles de 80 jours et 95-100 jours.

### Conclusion

La saison des pluies étudiée, celle de 2019, a connu un début irrégulier caractérisé par l'apparition d'une pause de plus de 20 jours après les pluies du 30 juin et du 01<sup>er</sup> juillet. Cette situation a entraîné dans la région d'étude des resemis de l'arachide et du maïs. La saison culturale a été par conséquent décalée de plusieurs décades, commençant à la dernière de juillet pour se terminer à la 2<sup>e</sup> du mois d'octobre. Le maïs a été la spéculation qui a le plus souffert de l'insatisfaction des besoins en eau au début et surtout à la fin de la saison culturale, compromettant sa maturation et par conséquent son rendement. Les stratégies mises en œuvre par les populations concernent surtout la pratique de l'élevage et du commerce et l'utilisation de variétés à cycles courts.

<sup>5</sup> Les durées des cycles ont été obtenues à partir du catalogue des espèces et variétés cultivées publié par l'ISRA en 2012.

<sup>6</sup> Ce nom est issu de *Fourier* qui a été le premier vulgarisateur de la variété *55-437* (Martin *et al.*, 1999).

## Références bibliographiques

- Ahmadi N., Chantereau J., Hekimian Lethève C., Marchand J. L., Ouendeba B., 2002 : Les céréales. *Mémento de l'agronome*, CIRAD, GRET, 777-829.
- Ba A., Schilling R., Ndoye O., Ndiaye M., Kane A., 2005 : La production et la transformation des produits : l'arachide. *Bilan de la recherche agricole et agroalimentaire au Sénégal*, ISRA, ITA, CIRAD, 163-188.
- Diop M., 1996 : A propos de la durée de la saison des pluies au Sénégal. *Sécheresse*, 7, 7-15.
- Guèye M., Sivakumar M.V., 1992 : *Analyse de la longueur de la saison culturale en fonction de la date des pluies au Sénégal*. Niamey, ICRISAT, 42 p.
- Martin J., Senghor I. et Ndiaye A., 1999 : *Rapport Analytique sur les Tests de Variétés d'Arachide en Culture Paysanne*. ISRA, CNRA de Bambey, 43 p.
- Ndiaye A., Fofana A., Ndiaye M., Mbaye D. F., Sène M., Mbaye I., Chantereau J., 2005 : La production et la transformation des produits : les céréales. *Bilan de la recherche agricole et agroalimentaire au Sénégal*, ISRA, ITA, CIRAD, 241-256.
- Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andréassian V., Anctil F. et Loumagne C., 2005 : Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303 (1-4), 290-306.
- République du Sénégal, Ministère de l'agriculture et de l'équipement rural (MAER), Institut sénégalais de recherches agricoles (ISRA), 2012 : *Catalogue officiel des espèces et des variétés cultivées du Sénégal*, 191 p.
- République du Sénégal, Ministère de l'environnement et du développement durable (MEDD), Centre de suivi écologique (CSE), 2018 : *Annuaire sur l'environnement et les ressources naturelles du Sénégal*, 4<sup>e</sup> édition, 386 p.
- République du Sénégal, Région de Kaffrine, Département de Birkelane, Arrondissement de Mabo, Commune de Mabo : *Plan de Développement Communal de Mabo*, (PDC), 2016-2021, 104 p.
- Sagna P., 2007 : Caractéristiques climatiques. *Atlas du Sénégal*. Paris, Les éditions J.A., 66-69.
- Sagna P., Dipama J. M., Vissin E. W., Diomandé B. I., Diop C., Chabi P. A. B., Sambou P. C., Sané T., Karambiri, Koudamilo O., Diédhiou Y. M., Yade M., 2021 : Climate change and water resources in West Africa: A case study of Ivory Coast, Benin, Burkina Faso and Senegal. In Diop S., Scheren P., Niang A. (ed.): *Climate change and water resources in Africa. Perspectives and solutions towards and imminent water crisis*. Springer, 55-86.
- Sarr B., Diagne M., Dancette C., 2005 : L'environnement : le climat. *Bilan de la recherche agricole et agroalimentaire au Sénégal*. ISRA, ITA, CIRAD, 33-49.
- Sarr B., 2006 : *INSTAT+ en bref, Manuel d'utilisation destiné aux ingénieurs en agrométéorologie et en météorologie aéronautique. SOFTWARE : Intat+ sous WINDOWS – Version 3.030*. CILSS, Département Formation et Recherche, 74 p.
- Sow O. C., Sambou P. C., Dorego G. S., Konté O., Touré K., Dubreuil M., Fall M. M., 2020 : Analyse du risque de base dans l'assurance pluviométrique indicielle au Sénégal. *Actes de l'Association Internationale de Climatologie*, 33, 643-648.
- Stern R., Rijks D., Dale I., Knock J., 2006 : *Instat Climatic Guide*. University of Reading, Reading, UK, 330 p.

# ANALYSE DE LA VEGETATION ET DE SON IMPORTANCE MICROCLIMATIQUE SUR LES PLACES PUBLIQUES DE LA VILLE DE TRÊS LAGOAS - BRÉSIL

Diego Da Silva Borges<sup>1</sup> et Mauro Hernique Soares Da Silva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Biogéographie et Climatologie Géographique - UFMS - Brésil. [diego98borges@gmail.com](mailto:diego98borges@gmail.com)

<sup>2</sup>Laboratoire de Biogéographie et Climatologie Géographique - UFMS - Brésil. [mauro.soares@ufms.br](mailto:mauro.soares@ufms.br)

## Résumé

*La ville de Três Lagoas est située dans la région centre-ouest du Brésil, dans une zone de climat tropical. Son périmètre urbain a connu différentes formes d'utilisation des terres basées sur l'élimination de la végétation naturelle et le remplacement par des constructions anthropiques. Cette recherche analyse la couverture végétale de trois places publiques de la ville de Três Lagoas (Brésil) et évalue l'interférence du microclimat dans les caractéristiques thermiques locales. Pour cela, une analyse quantitative des arbres a été réalisée, par nombre d'individus, hauteur et diamètre ; et aussi, une analyse qualitative, par occupation de la surface, de la cime des arbres et du type de végétation. Pour l'analyse du microclimat, des Datalogger fixes ont été installés (modèle Hobbo Onset U23) le 17 octobre 2019 (printemps, et historiquement le mois le plus chaud de l'année dans la région) à 15h00 (le moment le plus chaud de la journée), l'un à l'intérieur de la place et l'autre à l'extérieur, à moins de 50 mètres l'un de l'autre. Les résultats ont montré des températures plus élevées dans les zones externes de chaque place. La place "Ferroviários" enregistrait une température interne de 36,9°C et une température externe de 40,1°C, avec 3,2°C d'amplitude thermique, 48% de sa superficie couverte des arbres, une prédominance de surface perméable constituée de végétation de type herbacé. C'est aussi proportionnellement la place la plus boisée, avec 63 individus dont 84% sont des arbres adultes et 16% des jeunes. La place "Senador Ramez Tebet" enregistrait une température interne de 38,1°C et une température externe de 41,5°C, avec une surface végétale de 22%, contenant 144 individus, 74% adultes et 26% jeunes. Cependant, de ce pourcentage de taille adulte, 38% sont des espèces de palmiers, qui n'ont pas de cimes denses. Il est donc évident que ce point présentait une plus grande amplitude thermique entre interne et externe, de 3,4°C, également liée à la caractéristique de centralité urbaine du lieu. Enfin, la place "Nova Europa", avec 92,67% de la superficie totale sans végétation, compte 65 individus, parmi ceux-ci 78% sont encore jeunes, enregistrait une température interne de 38,4°C et une température externe de 40,3°C, avec une amplitude de 1,9°C. Il peut ainsi être conclu que les zones internes de la place où se trouve le couvert végétal, ainsi que celles qui présentent une proportion plus élevée d'individus adultes dont les cimes permettent un ombrage assurent un refroidissement thermique local.*

**Mots clés :** climat urbain, qualité environnementale urbaine, climat tropical.

## Introduction

Les espaces verts urbains, selon Londe e Mendes (2014) offrent plusieurs avantages qui garantissent la qualité environnementale des villes, parmi lesquels le confort thermique, la stabilisation de surface en fixant le sol grâce aux racines des plantes, en plus d'atténuer la pollution de l'air ainsi que la pollution sonore et visuelle, vérifiant ainsi que les espaces verts contribuent directement à la qualité de vie. Cependant, Nabucet (2018) explique que dans les villes les espaces verts occupent des lieux relativement limités et artificiels, sous des formes très différentes : alignements d'arbres dans les rues, dans les parcs urbains, en passant par les jardins privés individuels, les places publiques ou sur les ronds-points.

Dans les discussions sur les concepts d'espaces verts urbains, Minaki (2007) souligne que les places publiques urbaines constituent l'une des catégories d'espaces verts et qu'elles doivent être composées principalement de végétation, formant un paysage multifonctionnel, qui doit avoir un minimum d'asphaltage. Comme il a été cité par Souza (2018), le boisement dans les lieux à usage public qualifie et définit la qualité de l'environnement, qui à son tour infléchit sur son utilisation. Cette recherche analyse la couverture végétale de trois places publiques de la ville de Três Lagoas (Brésil), et évalue l'interférence du microclimat dans les caractéristiques thermiques locales.

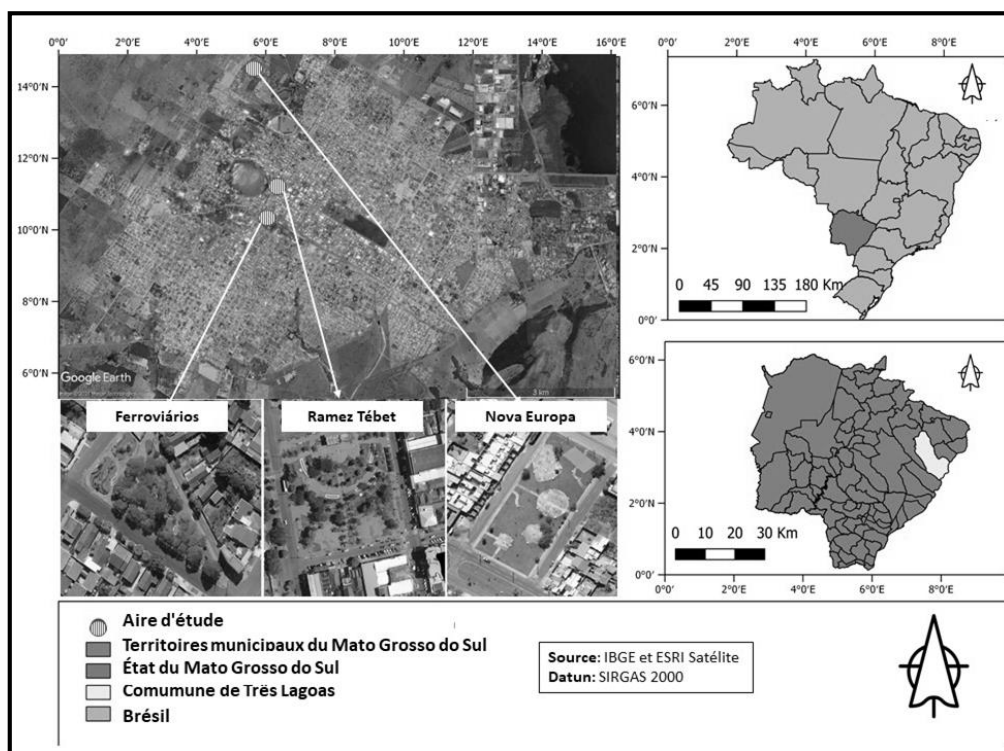
## 1. Méthodologie

La méthodologie est composée de trois phases distinctes, cependant interconnectées : analyse du couvert végétal des différentes places publiques dans la ville de Três Lagoas, suivie d'un essai mené sur les différences de microclimat de ces places publiques et leurs différentes configurations de couvert végétal, et enfin une analyse de corrélation entre ces variables.

La ville de Três Lagoas est située dans la région Centro-ouest du Brésil dans l'Etat de Mato Grosso do Sul (Figure 1). Selon Zavattini (2009), dans cette région domine un climat tropical avec des températures élevées en été et une alternance de périodes sèches et humides au cours de l'année. Comme tous les centres urbains, Três Lagoas tend à créer des îlots de chaleur, grâce aux changements thermiques de l'espace urbain par rapport aux zones rurales voisines, perceptible par la population locale, notamment en ce qui concerne les modèles thermiques et le confort thermique humain, liés aux différentes caractéristiques de l'utilisation des sols et de l'occupation des surfaces urbaines, déjà mentionné par Ponso (2012), Silva et Cerqueira (2017), Silva et al (2020) e Ortiz Porangaba et. al. (2020).

Les procédés méthodologiques ont été appliquées sur trois places publiques urbaines dans la ville de Três Lagoas, ayant pour critères les résultats obtenus par Eugênio (2017) concernant l'analyse des infrastructures. La place "Senador Ramez Tebet", la place "Ferroviários", et la place "Nova Euorpa" (Figure 1) ont donc été choisies pour cette étude.

Figure1 – Localisation de la zone d'étude



Source : Les auteurs

## 1.1. Données et Méthodes de mesures de la végétation

Pour cela, une analyse quantitative des arbres a été réalisée, par nombre d'individus, hauteur et diamètre ; et aussi, une analyse qualitative, par occupation de la surface, de la cime des arbres et du type de végétation.

Dans chaque place publique sélectionnée, une étude de la couverture végétale a d'abord été réalisée, quantifiant chaque arbre ainsi que sa hauteur et son DHH (diamètre à hauteur d'homme), en suivant les recommandations de Minaki (2007) pour l'analyse de la végétation d'espaces verts urbains.

Les résultats sur le couvert végétal de taille arboricole, ont pris en compte le DHH comme critère pour définir les jeunes arbres et les arbres adultes selon le manuel Serviço Florestal Brasileiro (2015) et sur les observations de terrain, une classification a été opérée, où: les arbres

avec un DHH <5,0 cm, ont été considérés comme des individus jeunes, c'est-à-dire en développement, et donc avec peu de potentiel d'ombrage ; les arbres avec un DHH => 5,0 ont été considérés comme des individus adultes, déjà développés, et donc à fort potentiel d'ombrage.

Avec l'utilisation d'un drone, l'enregistrement photographique aérien des trois places a été réalisé. Les photos obtenues ont été adaptées à un modèle en mosaïque, réalisé dans le logiciel Agisoft Metashap (Version gratuite). Ensuite, les mosaïques ont été projetées dans Quantum Gis - QGis (logiciel libre), pour calculer les mesures des couronnes d'arbres, par un processus de vectorisation, ainsi que les herbacées et le périmètre total des zones d'étude, puis convertis en données de pourcentage, pour une analyse comparative.

### ***1.2. Données et Méthodes de mesures microclimatiques***

Pour comprendre l'influence du couvert végétal sur la qualité de vie des utilisateurs de chaque place publique analysée, un essai sur le microclimat a été réalisé à partir de l'identification des conditions thermo-hygrométriques de chacune des places publiques. Pour cela, un Datalogger fixe HobboOnset U23 Pro V2 a été installé, dans le périmètre de la place, sous l'influence de l'ombrage de la cime des arbres, et un deuxième appareil installé à une distance à peu près de 15 m, exposé dans une zone sans couverture végétale, aux abords de chaque place, avec une exposition directe aux rayons du soleil, pour l'analyse comparative, de deux milieux proches, aux conditions végétales différentes.

L'expérimentation a été réalisée au printemps, dans l'hémisphère sud, le 17 octobre 2019 à 15h00, puisque, selon les normes climatologiques de la région, le printemps d'octobre est historiquement la période la plus chaude de la ville en question, et le temps entre 12h00 et 16h00 est le plus chaud de la ville selon Ponso (2012) et Cerqueira e Silva (2017).

### ***1.3. Données et Méthodes d'analyses de la relation entre Végétation et Microclimat***

Pour analyser la relation entre les données de végétation et du microclimat, en évaluant leur influence sur la qualité de vie de la population qui fréquente les places analysées, il a d'abord été évalué le confort thermique humain en fonction des données de température et d'humidité. Pour cela, les données ont été organisées dans des feuilles de calcul Excel afin d'appliquer une formule pour obtenir l'indice de Température Effective – TE (équation 1) et l'indice d'inconfort thermique - IDT (équation 2) suivant les recommandations de Ribeiro et. al (2018). Les auteurs montrent que ces indices, en plus d'être basés sur des variables environnementales facilement accessibles, sont couramment utilisés pour évaluer le confort thermique dans des environnements ouverts exposés à la radiation solaire, et peuvent être convenablement adaptés et appliqués aux régions tropicales.

$$IDT = Ta - 0,55 * (1 - 0,01UR) * (Ta - 14,5) \text{ (Équation 1)}$$

$$TE = Ta - 0,4 * (Ta - 10) * (1 - 0,01UR) \text{ (Équation 2)}$$

Où : Ta = Température (en °C) e UR = Humidité (en %), dans les deux équations

Dans un deuxième temps, afin d'évaluer la corrélation entre la végétation des places analysées et les conditions du microclimat, le Coefficient de Corrélation (R) a été appliqué, à l'aide d'un outil spécifique du logiciel Excel, cet outil étant appliqué parmi les variables suivantes Température (T), humidité relative (HR), indice d'inconfort thermique (IDT), température effective (TE), correspondent à l'intérieur de chaque place, avec les variables Nombre d'individus (N°I) et le pourcentage de couverture végétale (% CV).

Pour l'interprétation de la corrélation entre les variables, les recommandations de Figueiredo Filho et Silva Junior (2009) ont été suivies, permettant ainsi une classification basée sur la

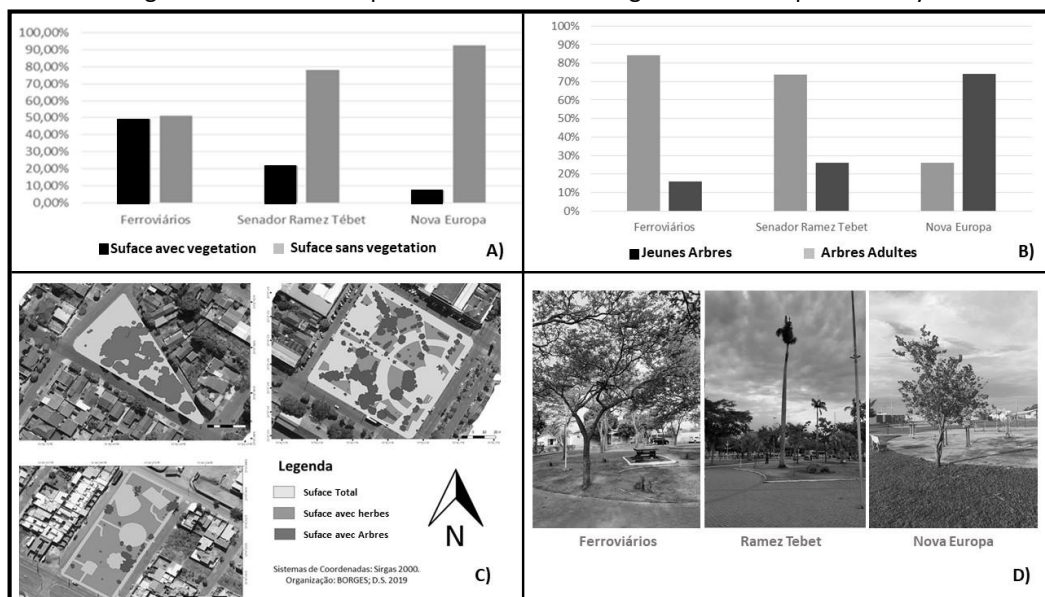
valeur de “R”, qui varie entre 0 et 1 où, le plus proche de 1 représente une relation entre les variables plus grande ; une relation “très faible” lorsque R est inférieur à 0,29, “faible” entre 0,30 et 0,49, “modéré” entre 0,50 et 0,69, “fort” entre 0,70 et 0,89 et “très fort” supérieur à 0,89. Si “R” est positif, cela signifie qu'une variable augmente et l'autre aussi, et de l'autre côté, quand “R” est négatif, une des variables diminue par rapport à l'augmentation de l'autre.

## 2. Résultats et discussions

Concernant la composition du couvert végétal, les places analysées ont montré des distinctions significatives. 48% de la superficie de la place “Ferroviários” est couverte par des arbres, avec une prédominance de surface perméable constituée de végétation de type herbacé, c’est aussi proportionnellement la place la plus boisée, avec 63 individus dont 84% sont des arbres adultes et 16% des jeunes. La place “Senador Ramez Tebet” est couverte par la surface végétale à hauteur de 22%, contenant 144 individus, 74% adultes et 26% jeunes. Et enfin, la place “Nova Europa”, avec 92,67% de la superficie totale sans végétation, compte 65 individus, parmi ceux-ci 78% sont encore jeunes.

Les distinctions dans la composition de la couverture végétale identifiées sur les places analysées peuvent interférer directement avec les conditions de température, puisque selon Gomes et Amorim (2003) la végétation est une composante régulatrice importante de la température urbaine, car elle absorbe le rayonnement solaire beaucoup plus facilement qu’il est utilisé dans ses processus biologiques : photosynthèse et transpiration. Une grande quantité de végétation implique alors une modification du bilan énergétique, en raison de la nécessité pour les plantes d’absorber la chaleur en raison de leurs processus vitaux.

Figure 2 – Caractéristiques de la couverture végétale dans les places analysées



A) Couverture Végétale des places ; B) Nombre d'individus arboricoles ; C) Cartographie de la couverture végétale ; D) Vue de les places analysés. Source : Les auteurs.

Les résultats ont montré des températures plus élevées dans les zones externes de chaque place. La place “Ferroviários” enregistre une température interne de 36,9°C et une température externe de 40,1°C, avec 3,2°C d'amplitude thermique, La place “Senador Ramez Tebet” enregistre une température interne de 38,1°C et une température externe de 41,5°C,

Cependant, de ce pourcentage de taille adulte, 38% sont des espèces de palmiers, qui n'ont pas de cimes denses, et il est donc évident que ce point présente une plus grande amplitude thermique entre la zone interne et externe, de 3,4°C, également liée aux caractéristiques de



centralité urbaine du lieu. La place “Nova Europa”, enregistre quant à elle une température interne de 38,4°C et une température externe de 40,3°C, avec une amplitude 1,9°C.

Concernant l'humidité relative, les conditions sont également différentes entre les places et en fonction de leurs conditions végétales. La place “Ferroviários” a révélé une humidité de 28% à l'intérieur et de 25% à l'extérieur, avec une différence de 3%. La place “Senador Ramez Tebet” enregistre une humidité de 27% à l'intérieur, et dans sa zone externe de 24%, présentant une différence significative également de 3%. Dans la place “Nova Europa” les données ont enregistré 27% dans le périmètre de la place et 25% à l'extérieur, avec une différence de 2%.

Tant les températures enregistrées dans l'expérimentation de cette recherche que l'humidité sont directement liées à la présence et à la constitution du couvert végétal puisque le coefficient de corrélation entre la température interne des places et le nombre d'individus d'arbres a été classé comme "Fort", alors que sa relation avec le pourcentage de couverture végétale a été classée "Très fort", montrant le potentiel d'influence de l'ombrage de la végétation dans les espaces verts urbains. À son tour, l'humidité a montré une "très forte" corrélation avec le nombre d'espèces d'arbres (tableau 2).

Tableau 2. Corrélation entre la composition et le couvert végétal et le microclimat dans les places analysés \*

Correlation	TxN°I	Tx%CV	URxN°I	UR%CV	IDTxN° I	IDT% C V	TExN°I	TEx%CV
Coefficient de Corrélation	-0,76	-0,97	0,91	0,63	-0,98	-0,78	-0,78	-0,78
Classification	Fort	Très fort	Très fort	Moderne	Très fort	Fort	Fort	Forte

\*T (Température), UR (humidité Relative, IDT (indice d'inconfort thermique), TE (température effective), N°I (nombre d'arbres), %CV (pourcentage de couverture végétale) Source : Les auteurs

Ces conditions de température et d'humidité, révèlent une période (saisonnière et horaire) qui présente un déficit d'humidité dans l'atmosphère et des températures élevées dans la ville de Très Lagoas, situation qui peut compromettre la qualité environnementale dans les places analysées. Les indices d'inconfort thermique à l'intérieur des places "Ferroviário", "Ramez Tebete" et "Nova Europa", s'élevaient respectivement à 28,0, 28,6 et 28,8, tandis que dans la zone externe, celles-ci s'élevaient à 29,5, 30,2 et 29,7, étant classés comme "chaud modéré" et le stress physiologique dans cette condition se lie à la transpiration du corps. Cependant, il est à noter que les zones internes des places, végétalisées, ont montré des valeurs plus faibles, plus proches des limites inférieures classées comme "légèrement chaudes"

La température effective indiquait les zones externes des places avec la classe d'inconfort la plus élevée, indiquée comme "chaude" et avec un degré de stress physiologique indiquant la sueur profusion, puisque les valeurs TE dans les zones externes des places étaient supérieures à 31, 0. À son tour, la TE effective dans la zone interne des places analysées était comprise entre 29,2 et 30,1, ce qui est classé comme "modéré chaud".

Il est évident que pour l'IDT et la TE, les valeurs vérifiées sur la place "Ferroviários" étaient les moins élevées, et a montré un potentiel pour atténuer l'inconfort lié à la présence de végétation arborée sur les places publiques. Cette affirmation est cohérente avec l'indice de corrélation entre l'IDT et le TE avec le nombre d'individus d'arbres et le pourcentage de couvert végétal dans chaque place analysée, dont la valeur "R" indique une corrélation "forte" et "très forte" respectivement.

### 3. Conclusion

Les zones internes de la place où se trouve le couvert végétal, ainsi que celles qui présentent une proportion plus élevée d'individus adultes dont les cimes permettent un ombrage assurent un refroidissement thermique local. Localement, les données de confort thermique humain ont montré une situation d'inconfort, notamment dans les zones extérieures des places, révélant ainsi l'importance de la végétation pour le microclimat et la qualité de vie de la population utilisant ces espaces publics. Le coefficient de corrélation entre la végétation et le microclimat a d'ailleurs montré une relation classée de "fort" à "très fort" entre les variables.

### 4. Remerciements

A l'Université Fédérale du Mato Grosso do Sul, à la FUNDECT pour disponibilisé bourse de recherche et à la CAPES pour l'aide financière au projet CAPES/COFECUB (Processo: 88881.191765/2018-01)

### 5. Bibliographie

- Eugênio, T. N.O.B. Praças Urbanas: análise quanti-qualitativa, importância, aspectos e influência sob a qualidade de vida da população de Três Lagoas/MS. Três Lagoas: 2017. 76f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2017
- Cerqueira, A. S. & Silva, M. H. S. A sazonalidade do conforto térmico em Três Lagoas (MS), para o ano de 2016. Geografia (Londrina) v. 26. n. 1, jan/jun, 2017..
- Figueiredo Filho, D. B. & Silva Junior, J. A. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). Revista Política Hoje, Vol. 18, n. 1, 2009
- Gomes, M. A. S. & Amorim, M. C. C. T. Arborização e Conforto Térmico no Espaço Urbano: Estudo de Caso nas Praças Públicas de Presidente Prudente (SP). Revista Caminhos de Geografia 7(10)94-106, set/2003
- Londe, P. R.; Mendes, P. C. A Influência das Áreas Verdes na Qualidade de Vida Urbana. Hygeia: Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde (Uberlândia), v. 10, p. 264-272, 2014.
- Minaki, M. As Praças Públicas de Araçatuba/SP: análise de um indicador da qualidade ambiental urbana. Três Lagoas, MS. Presidente Prudente: 2007. 202f. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual Paulista, 2007.
- Nabucet. J. Apport des données de Télédétection à Très Haute Résolution Spatiale pour la Cartographie de la Végétation en Milieu Urbain. Tese (Docteur. Mention: Géographie) Ecole Doctorale Société Temps Territoire, Université Rennes 2 (Sous le sceau de l'Université Bretagne Loire), 2018. 327f.
- Ortiz Porangaba, G. F.; Bacani, V. M. ; Milani, P. H. . Risco e vulnerabilidade socioambiental urbana: análise comparativa entre os dados socioeconômicos e a temperatura superficial de Três Lagoas (MS). Brazilian Geographical Journal:, v. 11, p. 100-112, 2020
- Ponso. et al. Campo térmico da Cidade de Três Lagoas (MS): comparação urbano/rural. Revista Geonorte, edição especial, v.2, nn.4, p.770 – 781, 2012.
- Ribeiro, C. R.; Gonçalves, A. P.; Bastos, F. P. Lhas de Calor Urbanas e Conforto Térmico Humano em Cidades de Porte Médio: Estudo Aplicado em Juiz de Fora (MG). Revista Ra'e Ga Espaço Geográfico em Análise. Curitiba, v.45, n. 1. p. 281-300, Dez/2018.
- Serviço Florestal Brasileiro Manual de campo: procedimentos para coleta de dados biofísicos e socioambientais. / Serviço Florestal Brasileiro. – Brasília: SFB, jan. 2015.67 p
- Silva, Mauro Henrique Soares, ORTIZ-PORANGABA, Gislene Figueiredo, FREITAS, Juliana C. Pereira. Perfil Térmico Nocturno a Três Lagoas - MS (BRÉSIL). In:.. Actes du XXXIIIème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie. Rennes, 2020. (p. 631 a 636).
- Souza, S. A., Avaliação do conforto térmico em praças públicas no período de estiagem na região central de Cuiabá-MT, Instituto, Federal de Educação, Ciência e tecnologia de Mato Grosso, Cuiabá- MT, Agosto de 2018.
- ZAVATTINI, J. A. As chuvas e as massas de ar no estado de Mato Grosso do Sul: estudos geográficos com vista à regionalização climática. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2009.

# CONSÉQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'USAGE DES RESSOURCES EN EAU DANS LES HAUTES PLAINES SÉTIFIENNES (EST DE L'ALGÉRIE): CAS DU BASSIN VERSANT DE L'OUED BOUSSELAM

Djellouli Y.<sup>1</sup>, Bougherira A.<sup>1,2</sup>, Messner F.<sup>1</sup>, Louail A.<sup>1,3</sup>, Gharzouli R.<sup>3</sup> et Missaoui K.<sup>3</sup>

1 : ESO-UMR 6590, Le Mans Université, France.

2 : Université de Mostaganem, Algérie.

3 : Université de Sétif 1, Algérie.

**Résumé :** La région méditerranéenne, « hotspot » du changement climatique, est confrontée à des impacts climatiques de plus en plus sévères, notamment dans sa partie méridionale. Nos précédentes recherches, portant sur les hautes plaines sétifiennes (Est algérien), ont montré que cette région est soumise à un climat méditerranéen, évoluant vers une aridification croissante (Djellouli et al., 2020). L'objectif est d'appréhender les conséquences de cette évolution sur la durabilité des ressources en eau et des activités agricoles du bassin versant de l'Oued Bousselam, affluent de la Soummam. Dans cette perspective, une enquête est menée auprès des acteurs locaux, notamment des agriculteurs, afin d'explorer leurs perceptions et représentations du changement climatique, d'évaluer leurs vulnérabilités vis-à-vis des aléas climatiques et de mettre en évidence les pratiques d'adaptation face aux impacts environnementaux.

Nos résultats montrent que les usagers de l'eau perçoivent le changement climatique depuis plus de 20 ans, à travers la perturbation et le décalage des saisons, la pénurie de l'eau, les extrêmes climatiques (sécheresses et inondations). Ces phénomènes ont eu des impacts négatifs sur le système de production agricole et le cadre de vie local. Face à cette vulnérabilité, les agriculteurs développent plusieurs pratiques d'adaptation culturelle et d'utilisation rationnelle de l'eau. Néanmoins certaines pratiques ne semblent pas en mesure de prendre en charge durablement cette vulnérabilité.

**Mots clés :** Changement climatique, Perception, Vulnérabilité-Adaptation, Algérie.

**Abstract :** The Mediterranean region, a climate change "hotspot", is facing increasingly severe climatic impacts, especially in the southern region. In our previous research carried out on the high plains of Setif (eastern Algeria), we have shown that this region is subject to a Mediterranean climate, evolving towards increasing aridification (Djellouli et al., 2020b). The objective is to understand the consequences of this evolution on the sustainability of water resources and agricultural activities in the watershed of the Bousselam Wadi, a tributary stream of the Soummam. In this perspective, we conducted a survey among local actors, particularly farmers, in order to explore their perceptions and representations of climate change, to assess their vulnerabilities to climatic hazards and to highlight adaptation practices to environmental impacts.

Our results show that water stakeholders perceive climate change since more than 20 years, through the disruption and shifting of seasons, water scarcity, climatic extremes (droughts and floods). These phenomena have negatively impacted the agricultural production system and the local living environment. Faced with this vulnerability, farmers are developing several practices for agricultural adaptation and rational use of water. Nevertheless, some practices are ineffective in the face of this vulnerability.

**Keywords :** Climat change, Perception, Vulnerability-Adaptation, Algeria.

## Introduction

La région méditerranéenne représente un « hotspot » du changement climatique, comme confirmé, par plusieurs auteurs et par le cinquième rapport d'évaluation du GIEC (2014). Les pays de la Méditerranée méridionale sont confrontés à plusieurs impacts climatiques : stress hydrique, désertification, pertes de biodiversité, événements extrêmes. Ces impacts s'aggravaient dans le futur, en dépit des mesures engagées pour y faire face. Les conséquences sont parfois préjudiciables, notamment sur les ressources naturelles, les activités socio-économiques et les systèmes de productions agricoles.

Dans ce contexte, le volet climatologique est étudié, afin de mieux comprendre l'évolution des conditions climatiques à l'échelle régionale, au niveau de l'ensemble des hautes plaines sétifiennes (Algérie). Afin de mieux assoir nos résultats, un travail empirique (questionnaires et entretiens) est réalisé sur le bassin versant de l'Oued Bousselam, affluent de la Soummam. Ceci nous a permis de construire une base de données pour mettre en évidence les conséquences du changement climatique sur la durabilité des ressources en eau et des activités agricoles.

## 1. Contexte climatique de la zone d'étude

Les hautes plaines sétifiennes, situées au Nord-Est algérien, sont limitées par l'Atlas tellien au nord et par l'Atlas saharien au sud.

Cette zone est soumise à un climat méditerranéen humide et subhumide au Nord et semi-aride et aride au Sud (au sens d'Emberger, 1971). L'étude menée par Djellouli et *al.*, (2020) sur l'évolution des iso-bioclimats, selon la classification de Rivas Martinez (WBCS), a été appliquée sur trois périodes principales : avant 21000 ans (BP), de 1973 à 2013 et de 2041 à 2060. Elle a mis en évidence une évolution accélérée du climat, qui tend vers une aridification progressive du territoire (Figure 23). Cette évolution entraînerait de forts impacts sur les écosystèmes naturels et agricoles, dans le futur, avec de lourdes conséquences socio-économiques inévitables. Un processus de *steppisation* (au sens de Le Houérou, 1995) semble gagner une grande partie de la zone étudiée.

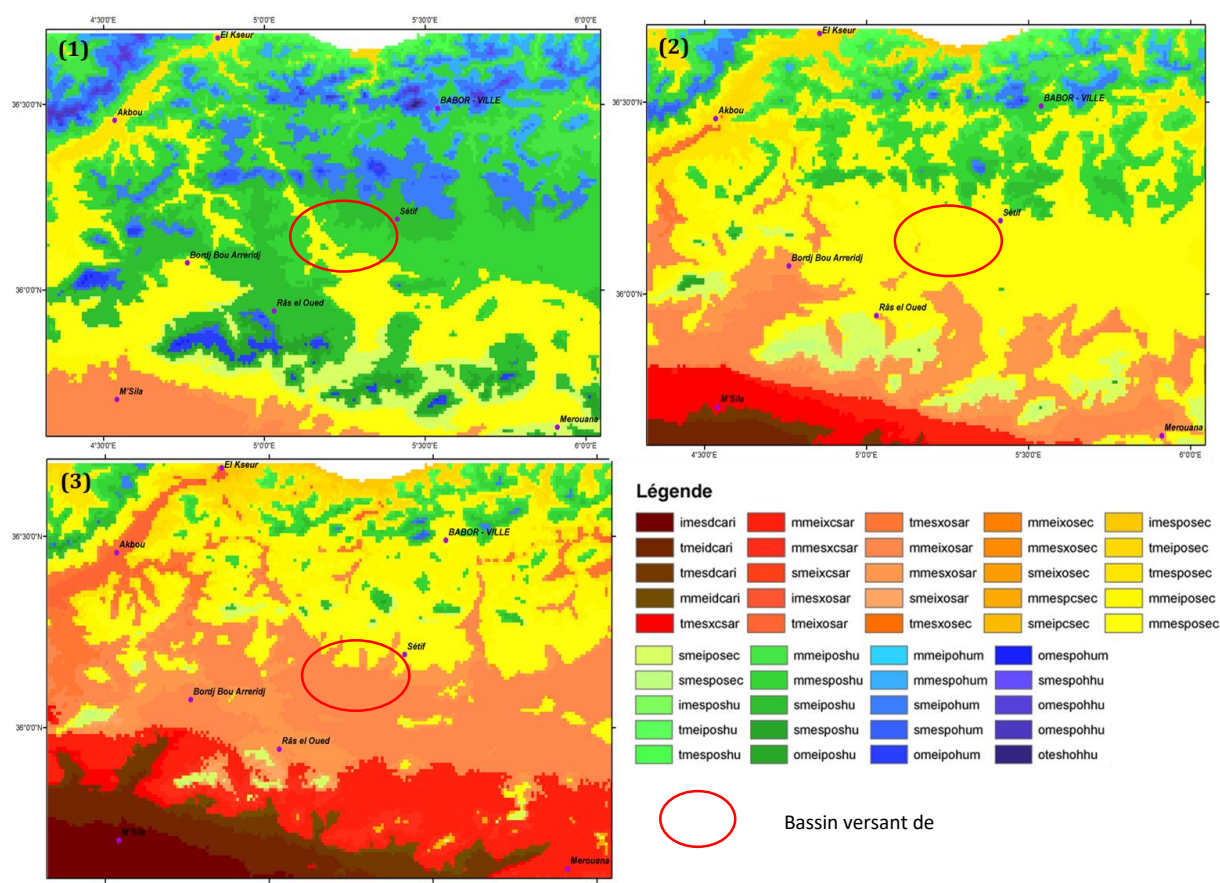


Figure 23 : Cartes d'évolution des bioclimats au niveau des hautes plaines sétifiennes. (1) Iso-bioclimats : PMIP Dernier maximum glaciaire, (2) Iso-bioclimats : Actuel (1979-2013), (3) Iso-bioclimats : CMIP RCP45 (2041-2060).

## 1. Perception et représentation des effets du changement climatique sur l'usage de l'eau au niveau du bassin versant de l'Oued Boussemam

### 1.1. Démarche méthodologique et objectifs de la recherche

Nous avons réalisé une enquête sur le terrain, afin de cerner les conséquences de l'évolution des conditions climatiques sur la durabilité des ressources en eau et des activités agricoles, à une échelle plus fine. Cette enquête a été menée auprès des usagers de l'eau, notamment les agriculteurs, au niveau du bassin versant de l'oued Boussemam. A l'aide d'un questionnaire, composé de 75 questions (48 fermées et 27 questions ouvertes), notre recherche empirique s'intéresse aux trois éléments suivants : les perceptions et les représentations du changement

climatique, l'évaluation des niveaux de vulnérabilité vis-à-vis des aléas climatiques et la mise en évidence des pratiques d'adaptation.

La mise en œuvre de cette enquête de terrain nous a permis de réaliser 80 questionnaires, qui ont été analysés et traités par le logiciel Sphinx IQ2.

## **1.2. Présentation générale des enquêtés**

Les personnes enquêtées ont été choisies selon leur lien avec le bassin versant et l'utilisation des ressources en eau douce. Au cours de cette enquête nous avons interrogé 80 personnes, dont la grande majorité est de sexe masculin (95%). Les femmes sont moins représentées dans l'échantillon de l'enquête, au regard des spécificités socio-culturelles de la région et de la faible attractivité de l'activité agricole pour elles. La majorité des enquêtés ont plus de 40 ans (environ 75 %) et sont pratiquement tous natifs de la région. Ils représentent à la fois les usagers et les habitants, dont plus de 80% d'entre eux habitent depuis au moins 35 ans dans la région. Cet échantillon donne plus de représentativité à notre enquête et permet d'avoir des résultats plus proches de la réalité.

Notons que les enquêtés sont principalement des agriculteurs et éleveurs. L'ensemble de ces usagers occupe des terrains agricoles relativement grands, dont la taille moyenne est de 50 ha environ. Ces dernières sont pour la plupart des Exploitations Agricoles Collectives (EAC) et/ou Individuelles (EAI), concédées par l'État, ainsi que quelques exploitations privées.

## **1.3. Perception du climat et du changement climatique**

- *Perception vis-à-vis du climat*

La majorité des enquêtées indique que le climat a changé depuis environ deux décennies. Ce changement est majoritairement perçu à travers plusieurs indicateurs : l'augmentation des températures, la diminution des précipitations et les effets du vent. En plus, le gel et le froid constituent un véritable risque, pour les sites situés à plus de 1000m d'altitude.

- *Perception vis-à-vis du changement climatique*

Le changement climatique est connu pour 95 % des enquêtés, mais son origine diverge dans les perceptions. Pour la plupart d'entre eux, il est avant tout causé par une combinaison des processus naturels et anthropiques (46 %) et, dans une moindre mesure, uniquement par l'activité humaine (43 %). Pour le reste, le changement climatique est dû aux processus naturels uniquement (12 %), dont une partie non négligeable des agriculteurs estiment que c'est la volonté du Dieu<sup>7</sup>.

Ce changement est perçu à travers la perturbation des saisons, les conditions climatiques, les catastrophes climatiques (sécheresses et inondations) et l'environnement (Figure 24 et Figure 25). En effet, les saisons (à 85%), leurs perturbations et décalages, influent particulièrement sur les périodes d'ensemencement et le cycle de développement des cultures. Ces perturbations saisonnières se traduisent par des précipitations abondantes en automne et plus faible en hiver ; des gelées néfastes peuvent impacter les cultures.

En outre, les acteurs perçoivent le changement climatique à travers des aléas climatiques, comme les épisodes de pluies torrentielles de plus en plus fréquents, qui engendrent des

---

<sup>7</sup>Lors des périodes de fortes sécheresses météorologiques, le ministère des affaires religieuses organise une prière nationale « *Salat el-Istiska* », afin d'implorer Dieu de conjurer ce phénomène et d'avoir des pluies.

inondations récurrentes, ainsi que la dégradation des cultures au moment de la récolte et/ou de l'ensemencement.

Aux problèmes hydriques, liées aux précipitations, s'ajoutent la sécheresse, dont la période est de plus en plus longue. Par ailleurs, les enquêtés conçoivent l'idée que l'évolution du climat va accentuer les phénomènes climatiques extrêmes, notamment les sécheresses et les inondations, dont les conséquences sont fortes sur l'environnement, les ressources en eau disponibles et leurs exploitations agricoles.

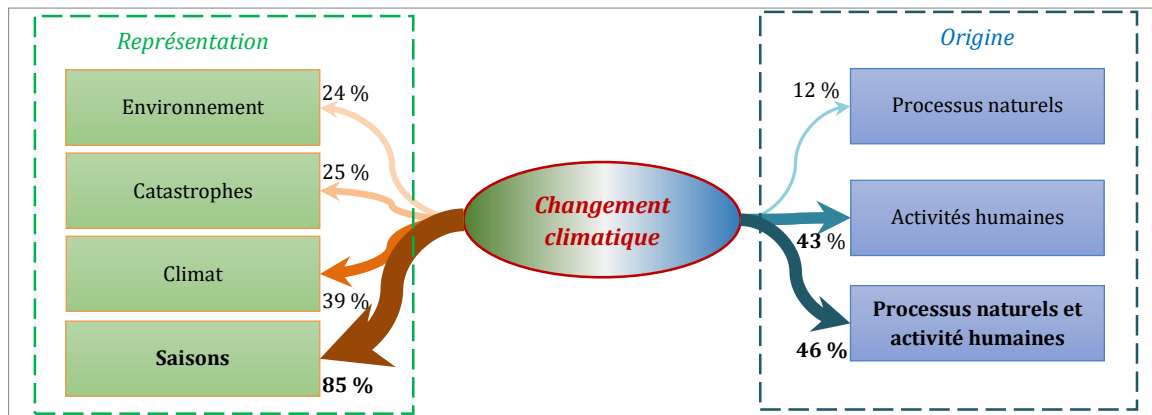


Figure 24 : Représentation de la perception et de l'origine du changement climatique selon les enquêtés.

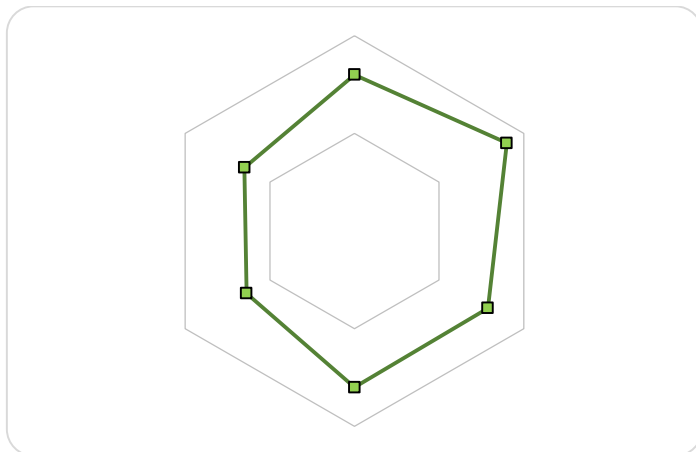


Figure 25 : Signes du changement climatique observés par les usagers de l'eau douce.

#### 1.4. Perception du risque et des vulnérabilités

Les effets du changement climatique sont perçus à travers plusieurs impacts environnementaux, que l'on peut distinguer dans la Figure 26. L'eau est la première des préoccupations, à cause du stress hydrique (44%), qui se manifeste par une diminution des précipitations (sécheresse météorologique : 28%) et la pénurie de l'eau (sécheresse hydrographique : 16%). A ces aléas climatiques extrêmes s'ajoutent des risques naturels (33%), comme les inondations (16%), l'érosion et glissement du terrain (10%) ainsi que l'appauvrissement et la dégradation de la qualité agroécologique du sol (désertification : 7%). A ces impacts d'ordre environnemental, des problèmes sanitaires (37%) apparaissent, notamment les maladies qui touchent les productions agricoles animales et végétales.

Ces contraintes climatiques et environnementales ont provoqué des changements au niveau du rendement agricole des exploitations (Figure 26). Ces changements ont émergé au cours des 15 dernières années pour 67% des agriculteurs enquêtés, dont environ la moitié (44%) d'entre eux enregistre une diminution du rendement agricole, un quart estime qu'elle est relativement stable et le reste constate une évolution progressive.

La vulnérabilité des agriculteurs et de leurs activités est amplifiée par des contraintes administratives supplémentaires. En effet, les agriculteurs déplorent les difficultés d'accès à l'eau (48%), en raison de rigidités administratives pour l'autorisation d'effectuer des forages et pour le manque des moyens matériels (23%).

Dans ce contexte difficile qui pèse fortement sur l'activité agricole locale, de multiples menaces touchent le cadre de vie (24%) : sécurité alimentaire, diminution des revenus et santé publique. Cette dégradation du cadre de vie risque de redéclencher l'exode rural, difficilement maîtrisé par les pouvoirs publics, et peut amener à une émigration des habitants vers l'étranger.

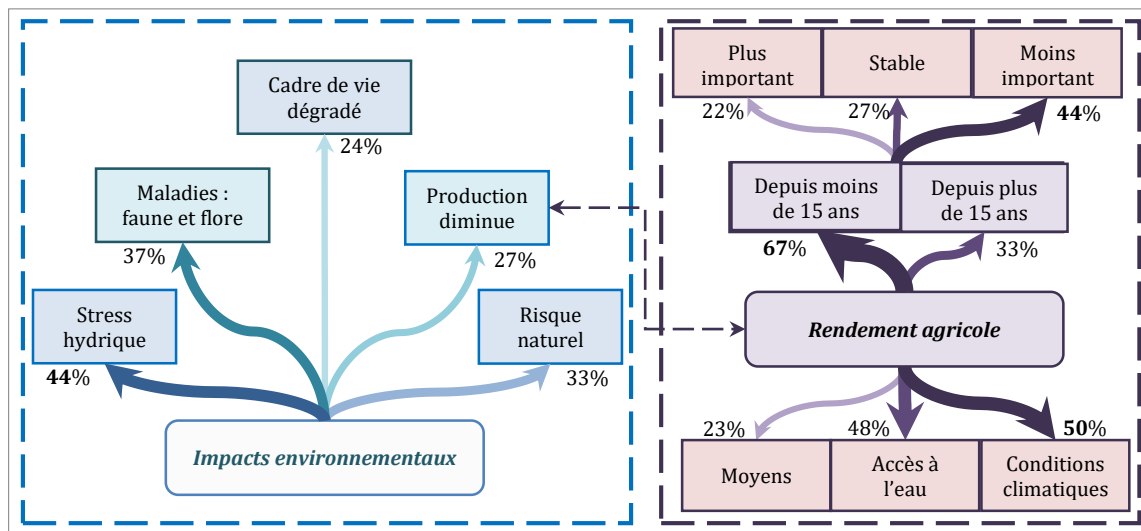


Figure 26 : Impacts environnementaux et conséquences du changement climatique sur l'évolution du rendement agricole, selon les usagers de l'eau.

### 1.5. Pratiques d'adaptation développées

Face aux risques et menaces sur la durabilité des ressources et de l'activité agricole locale, plus de la moitié des usagers ont déclaré avoir modifié leurs pratiques agricoles (58%). D'autres ont choisi d'initier une activité secondaire (40%), afin de compenser la diminution des revenus et de prévenir les pertes économiques dus aux risques imprévisibles (Figure 27).

Les agriculteurs développent de nouvelles pratiques culturales afin de s'adapter aux impacts environnementaux. Pour ce faire, ils ont eu recours à la fertilisation du sol (24%) et l'acquisition des semences améliorées (20%), afin d'améliorer le rendement de leurs exploitations. Les agriculteurs s'adaptent aussi à la perturbation et au décalage des saisons, selon le type de culture par les semis tardifs (22%) et le moissonnage précoce (21%).

Par ailleurs, les agriculteurs commencent à mettre en place des mesures de prévention face au stress hydrique, notamment par l'installation des bassins de stockage d'eau (15%), le recours au système d'irrigation du goutte à goutte (10%) et la plantation d'arbres fruitiers (11%) en les substituant au maraîchage, gourmand en eau.

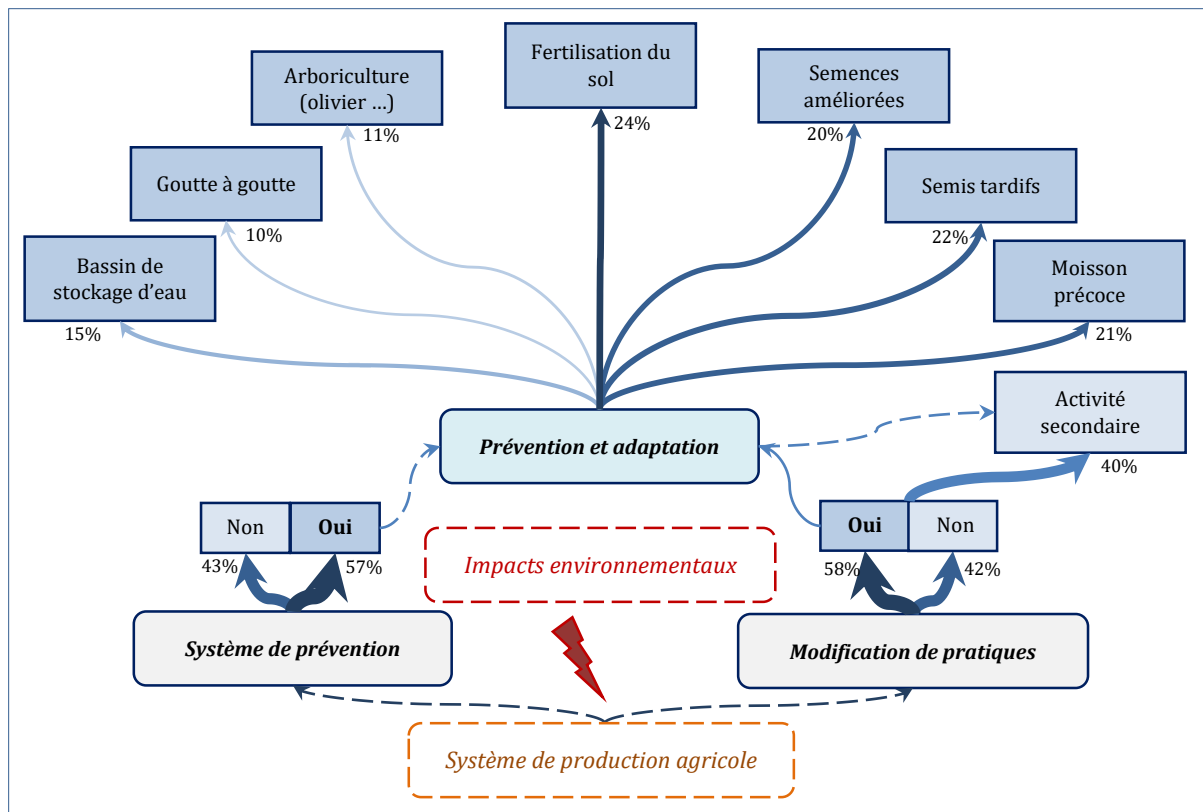


Figure 27 : Pratiques d'adaptation et de prévention des impacts environnementaux, dus au changement climatique, développées par les agriculteurs.

## Conclusion

Les travaux bioclimatiques réalisés sur les hautes plaines sétifiennes montrent une évolution régressive du climat vers une aridification certaines de 2040 à 2060, dans les parties centrale et méridionale. Cette évolution a entraîné de forts impacts sur les écosystèmes naturels et agricoles, avec de lourdes conséquences socio-économiques. Les perceptions et représentations des acteurs locaux vis-à-vis du changement climatique se traduit par les perturbations et les décalages des saisons, par l'augmentation de la température et du stress hydrique. Ces éléments ont des conséquences sur les productions (animales et végétales) et amènent les acteurs à mettre en place des systèmes de prévention et d'adaptation.

## Bibliographie

Emberger L., 1971. *Travaux de Botanique et d'Écologie*. Masson, 520 p.

Djellouli Y. et al., 2020. Les écosystèmes naturels de l'Est algérien face au risque du changement climatique. *Geo-Eco-Trop*, 4, 609-621.

GIEC., 2014. *Changements climatiques 2014 : Incidences, adaptation et vulnérabilité – Résumé à l'intention des décideurs*. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 34 p.

Le Houérou H.-N., 1995. *Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique : diversité biologique, développement durable et désertisation*. CIHEAM - Options Méditerranéennes, 396p.

Rivas-Martinez S., Rivas-Saenz S., Penas A., 2011. Worldwide Bioclimatic Classification System. *Global Geobotany*, 1, 1-638.



# 2020, PREMIÈRE ANNÉE SANS GEL DANS LE CENTRE-VILLE DE RENNES !

Dubreuil V. (1), Brabant C. (1), Delaunay G. (1), Quenol H. (1), Nabucet j. (1), Amorim M. (2)

(1) LETG-Rennes-COSTEL, Université Rennes 2, UMR 6554 CNRS, Vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr

(2) UNESP, Presidente Prudente, Brésil

**Résumé :** Pour la première fois depuis le début des mesures, il n'a pas gelé dans le centre-ville de Rennes au cours de l'année 2020. Cette observation a été rendue possible grâce à la mise en place d'un réseau d'observation de l'îlot de chaleur à Rennes depuis 2003. Avant cette date, la plus haute température minimale observée à la station Météo-France de Saint Jacques était de  $-2,9^{\circ}\text{C}$  en 2002, rendant peu probable l'absence de gel en ville avant 2002. En effet, alors qu'on observait  $-1,7^{\circ}\text{C}$  à Saint Jacques en 2020, la température de trois stations du centre-ville est restée positive, autour de  $0,4^{\circ}\text{C}$ . La tendance historique de diminution du nombre de jours de gel à Saint-Jacques est donc renforcée dans le centre de Rennes par le phénomène d'îlot de chaleur : alors que le nombre de jours de gel à Saint-Jacques est passé en dessous de 10 (9 en 2020 comme en 2014), dans le centre-ville, le gel est devenu encore plus rare : moins de 5 jours en 2011 et 2014, un seul jour en 2019 et aucun en 2020.

**Mots clés :** Climat urbain; gel; Bretagne; changement climatique.

**Summary :** 2020, first year without freezing in the city center of Rennes ! For the first time since the start of the measurements, it did not freeze in the city center of Rennes during the year 2020. This observation was made possible thanks to the establishment of a monitoring network of the heat island in Rennes since 2003. Prior to this date, the highest minimum temperature observed at the Météo-France station in Saint Jacques was  $-2.9^{\circ}\text{C}$  in 2002, making it unlikely the absence of freezing in the city before 2002. Indeed, while we observed  $-1.7^{\circ}\text{C}$  in Saint Jacques in 2020, the temperature of three stations in the city center remained positive, around  $0.4^{\circ}\text{C}$ . The historical trend of a decrease in the number of frost days in Rennes-Saint-Jacques is therefore reinforced in the center of Rennes by the heat island phenomenon: while the number of frost days in Saint-Jacques has fallen below of 10 (9 in 2020 as in 2014), in the city center, frost has become even rarer: less than 5 days in 2011 and 2014, only one day in 2019 and finally none in 2020.

**Key words:** Urban Climate ; Frost; Brittany; Climate Change;

## Introduction

A l'échelle des agglomérations urbaines, le changement climatique observé résulte d'un cumul de phénomènes de large échelle (notamment le réchauffement global) mais aussi d'échelle locale via l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU). Ainsi, l'extension des surfaces urbanisées provoque un réchauffement accentué dans les centres villes où les deux effets global et local s'additionnent (Merot et al, 2012 ; Alcoforado et al, 2014). Cet effet est souvent mis en avant lors de phénomènes extrêmes comme lors des vagues de chaleur estivales où les canicules rendent les températures urbaines insupportables de jour mais surtout la nuit (Oke 2017 ; Amorim & Dubreuil, 2017). Cependant, les deux échelles du changement climatique se manifestent aussi pendant la saison froide (Pigeon et al, 2007) avec une conséquence marquée sur les minima et notamment la fréquence des épisodes de gel qui a diminué dans de nombreuses villes dans le monde comme au Japon (Fujibe, 2008), en Chine (Bian et al, 2015), aux Etats-Unis (Schatz & Kucharik, 2016) et en France (Dettwiller, 1970 ; Dubreuil et al, 2020). Après une année déjà remarquable avec un seul jour de gel observé en 2019, l'année 2020 constitue à Rennes un moment historique avec, pour la première fois depuis le début des mesures, une absence totale de gel observé dans le centre-ville. Cet article propose donc de faire le point sur l'évolution du nombre de jours de gel dans la métropole rennaise en 2020 et sa spatialisation.

## 1. Données et Méthodes

Pour mettre en évidence ce phénomène, nous avons utilisé deux séries de mesures : tout d'abord les relevés effectués par Météo France dans la station synoptique de Saint Jacques de la Lande, située à environ 6 kilomètres au sud-ouest du centre de l'agglomération : les relevés y

sont continus depuis 1945 et constituent donc la série de référence. Sur la période 1991-2020, la température moyenne annuelle atteint 12,3°C (contre 13,4°C en 2020, record historique), la moyenne des minimales 8°C (8,8°C en 2020) et 16,8°C (17,9°C en 2020) pour les maximales.

Un second jeu de données est issu du réseau de suivi du climat urbain rennais mis en place à partir de 2003 par le LETG-Rennes (Dubreuil et al, 2010 ; Foissard et al, 2019). Au départ constitué d'une douzaine de stations réparties sur toute l'agglomération, le réseau était constitué en 2020 de 25 stations automatiques (modèle DAVIS Vantage-Pro) et d'une quarantaine de micro-capteurs (HOBO) qui permettent de réaliser une cartographie détaillée de l'ICU rennais au pas de temps horaire : les capteurs sont positionnés à environ 3 mètres au-dessus du sol et permettent de couvrir la diversité des types urbains, traditionnellement définis par les Local Climate Zone (Oke, 2017 ; Dubreuil et al, 2020). L'analyse comparée des mesures effectuées à Saint Jacques de la Lande et dans le centre de Rennes permet de mesurer l'effet local de réchauffement climatique entre la ville et sa périphérie. Notons que Rennes est située dans une cuvette topographique peu marquée avec des dénivelés modestes au niveau de l'agglomération (figure 1).

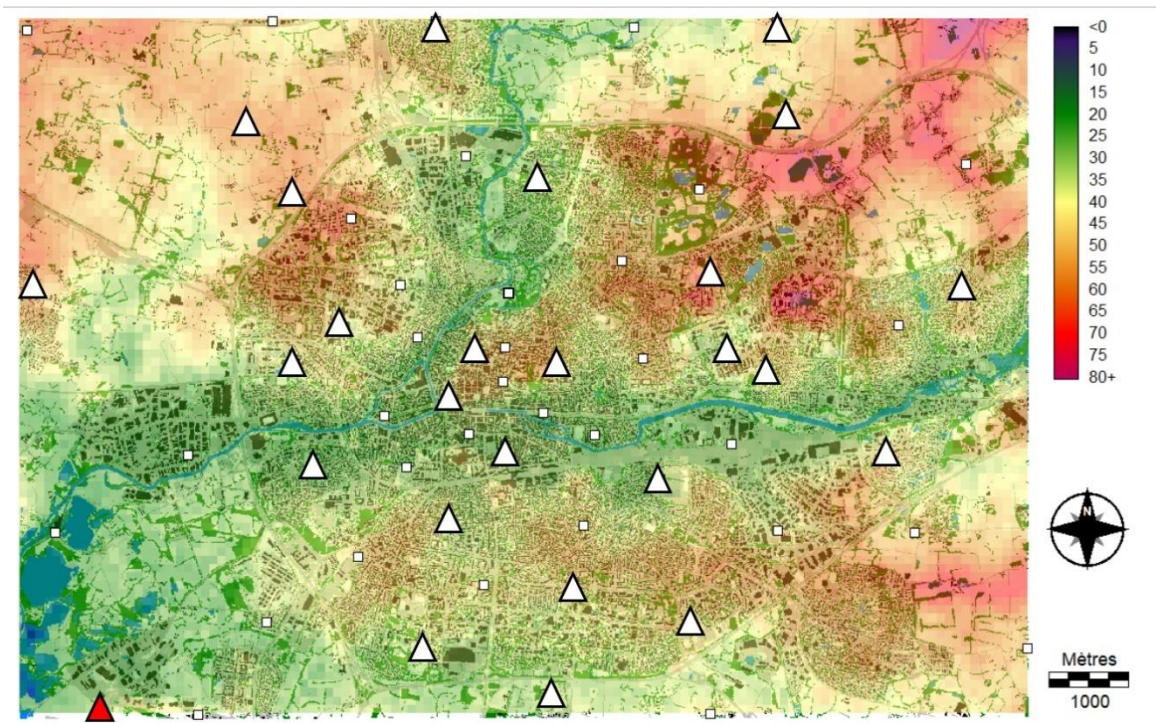


Figure 1. Réseau d'observation climatologique sur Rennes en 2020 : triangles blancs = stations automatiques Davis ; triangle rouge = station synoptique Météo France de Saint Jacques de la Lande ; petits carrés blancs = micro-capteurs HOBO ; Modèle numérique de terrain (couleur) et bâti (noir) en arrière-plan.

Dans cette étude, seules les séries ne comportant pas plus de 20% de lacunes des observations horaires ont été retenues. Les lacunes ont été comblées par régression avec la station la plus proche et appartenant à la même LCZ. Au total, sur la proche commune de Rennes, espace couvert par la figure 1, ce sont 40 séries horaires sans lacunes qui étaient disponibles, 4 avec moins de 10% de lacunes et 12 avec entre 10 et 20% de lacunes, soit un total de près de 500.000 données horaires réparties sur 56 points de mesures.

## 2. Résultats

La série historique de Saint-Jacques de la Lande permet d'observer que le nombre de jours de gel a atteint un minimum de 9 journées en 2020, soit autant qu'en 2002 et 2014 (figure 2). La tendance multi-décennale montre la tendance à la diminution de la fréquence du gel à Rennes-Saint-Jacques : 41 jours en moyenne pour la période 1951-1980 contre 30 jours pour la période 1991-2020. La variabilité est forte puisque certaines années ont connu près de 70 jours de gel (1963 ou 2010). Le record pour Saint-Jacques de la Lande en 2020 se situe ailleurs : c'est la température minimale absolue observée qui n'a atteint « que »  $-1,7^{\circ}\text{C}$ ., la valeur la plus haute précédente étant celle de 2002 soit  $-2,9^{\circ}\text{C}$  (figure 2).

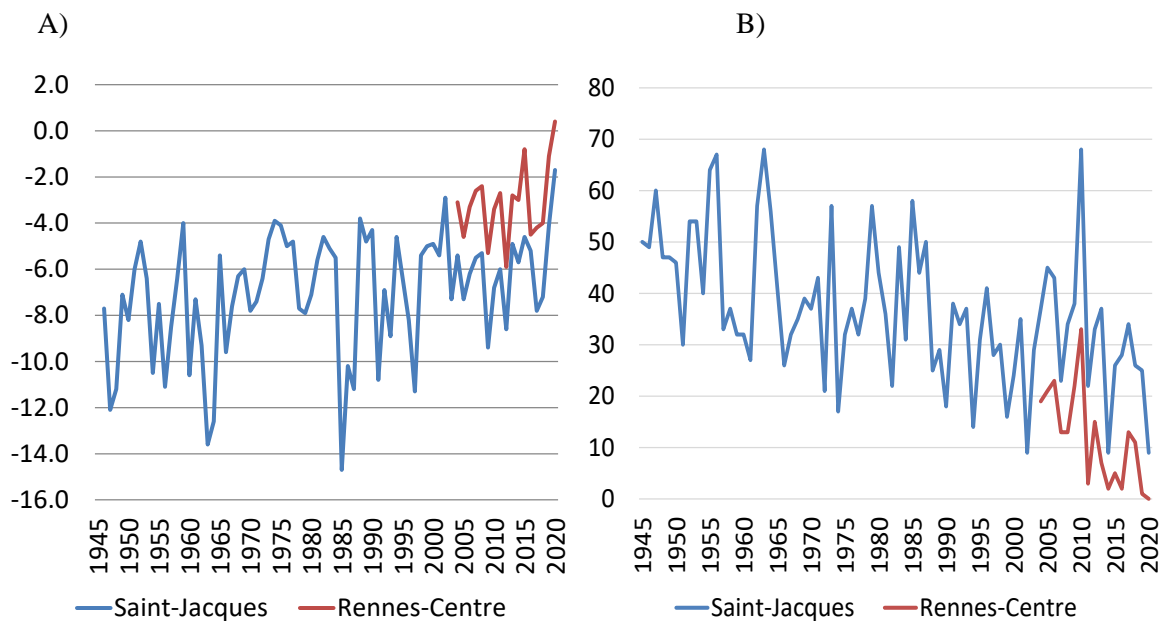


Figure 2. A) Température minimale absolue à Rennes-Centre et à Saint Jacques de 1945 à 2020. B) Nombre de jours de gel par an à Rennes-Centre et à Saint Jacques de 1945 à 2020

Dans le centre-ville de Rennes, la série de mesures n'est pas aussi longue mais elle permet déjà de se faire une idée de la différence avec Saint-Jacques de la Lande. Ainsi, la différence moyenne observée entre les températures minimales est de l'ordre de  $2^{\circ}\text{C}$ , effet que l'on peut attribuer au phénomène d'ICU. Notons qu'avant la mise en place du réseau de suivi de l'ICU, la plus haute température minimale observée à la station Météo-France de Saint Jacques était de  $-2,9^{\circ}\text{C}$  en 2002, rendant donc peu probable l'absence de gel en ville avant 2002.

Le nombre moyen de jours de gel calculé dans le centre de Rennes est nettement plus faible qu'à Saint-Jacques : sur la période commune de 2004 à 2020 il s'établit à 12 jours dans le centre contre 31 à Saint-Jacques : il gèle donc presque deux à trois fois moins souvent dans le centre de Rennes ! Mais certaines années, quand les gelées en campagne ne sont pas très sévères, le nombre de jours de gel dans le centre-ville est presque inexistant : 3 journées en 2011, deux journées en 2014 et 2016 et déjà un record d'un seul jour de gel en 2019. En 2020, nouveau record donc puisque cette fois ci, dans le centre de Rennes (pour schématiser de la cathédrale à la gare), la température la plus basse observée en 2020 n'a pas été inférieure à  $0,4^{\circ}\text{C}$ . Mieux encore, au 31/12/2020, la dernière gelée à Rennes remonte au 31/01/2019, soit presque deux années consécutives sans gel dans le centre de Rennes !

La spatialisation de l'ICU et du gel à Rennes en 2020 permet de mieux faire ressortir les contrastes intra-urbains et l'influence des conditions climatiques.

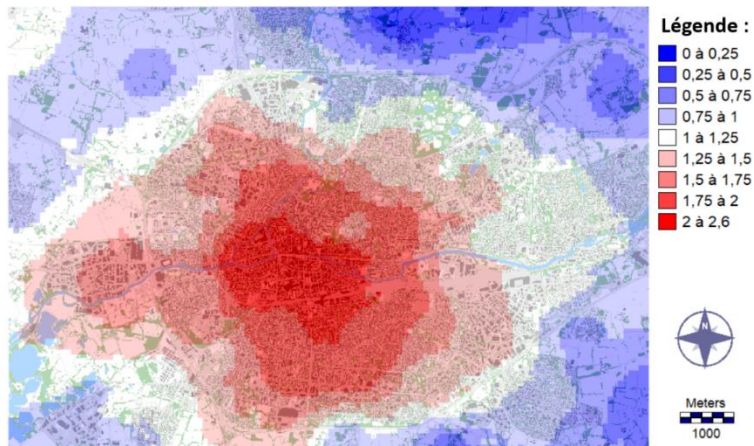


Figure 3. Intensité moyenne de l'ICU nocturne à Rennes en 2020 : écart avec la moyenne des températures minimales de la station la plus froide.

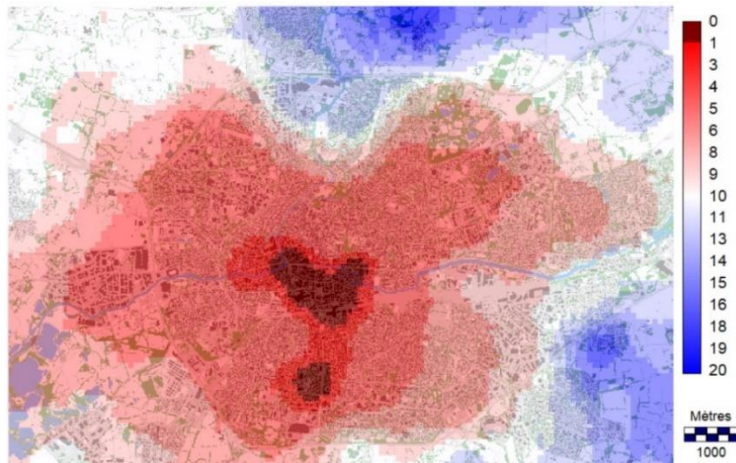


Figure 4. Nombre de jours de gel à Rennes en 2020.

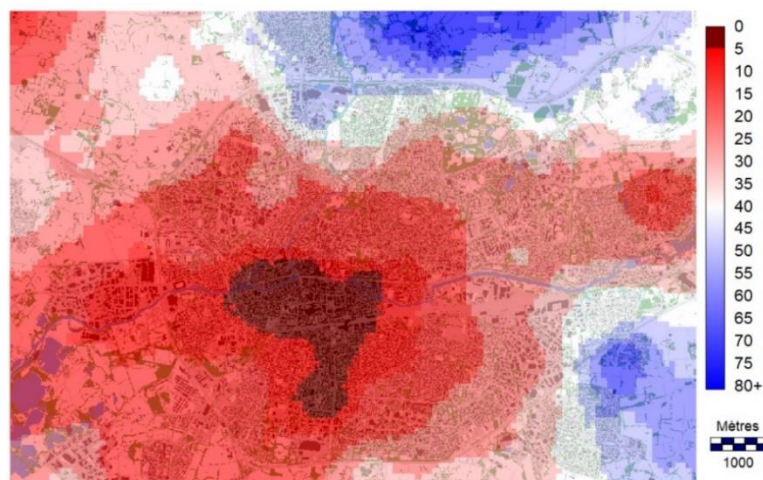


Figure 5. Nombre d'heures de gel à Rennes en 2020.

La figure 3 représente l'intensité moyenne de l'ICU nocturne à Rennes en 2020 exprimée à partir de la différence entre la moyenne des minimales pour chacune des stations et la moyenne

de la station la plus froide située au nord : pour simplifier cette valeur a été ramenée de 8,3°C à 0°C de manière à produire directement une carte d'intensité relative de l'ICU, la valeur la plus élevée au centre-ville dépassant 10,8°C, ramenée donc à +2,6°C. A la station de Saint-Jacques, la moyenne des minimales atteint presque 9°C, la troisième valeur la plus élevée depuis 1945. La carte montre l'aspect très concentrique des intensités d'ICU, l'ensemble de l'espace intra-rocade connaissant un ICU nocturne supérieur à 1 degré et la majeure partie des quartiers centraux un ICU supérieur à 2°C. Une légère excroissance de l'ICU peut s'observer en direction des quartiers plus urbanisés vers l'est, le sud et l'ouest mais pas vers le nord.

Les figures 4 et 5 montrent la durée du phénomène gélif exprimé en jours (figure 4) et en nombre d'heures pendant lesquelles la température est restée inférieure ou égale à zéro (figure 5). Notons que ces 2 cartes, comme la précédente, sont construites par de simples méthodes d'interpolation en fonction de l'inverse de la distance au carré afin de ne pas induire un comportement des températures forcé par des paramètres présumés. On retrouve la forte anomalie chaude du centre-ville, sans gel en 2020, mais aussi une grande partie de l'espace urbanisé intra-rocade qui a connu moins de 5 jours et moins d'une vingtaine d'heures de gel en 2020. Le gradient vers le sud-est et surtout le nord est spectaculaire : on y atteint 12 jours de gel et plus de 50 heures de températures négatives même à l'intérieur de la rocade, dans des espaces urbanisés peu denses. A moins d'un kilomètre au nord de la rocade, les zones humides de la vallée de l'Ille ont connu 20 jours et près d'une centaine d'heures de gel.

La situation est très différente vers le sud et l'ouest où le nombre d'heures et de jours de gel reste très bas, bien au-delà des espaces urbanisés, y compris dans les secteurs déprimés autour de l'aéroport et de la vallée de la Vilaine. C'est ici la dynamique particulière des conditions météorologiques lors des journées froides qui est en cause. La figure 6 montre ainsi que la provenance des vents était très différente pendant les journées de gel : en moyenne à Rennes en 2020, les directions prédominantes étaient de sud et de sud-ouest alors que lors des journées froides, le flux prédominant était très largement en provenance du nord ou de l'est-nord-est, très rarement du sud et jamais de l'ouest. Cette situation permet donc d'illustrer le déplacement fréquent de l'ICU rennais vers les quartiers sud et ouest avec un réchauffement de l'air qui se fait même sentir bien au-delà de la rocade dans les campagnes environnantes.

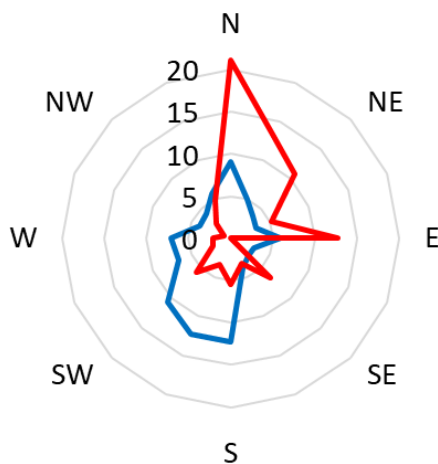


Figure 6. Fréquence des directions des vents à Rennes-Saint-Jacques en 2020 (en %).

Bleu : toutes journées confondues.

Rouge : journées de gel à Rennes-Saint-Jacques.

## Conclusion

L'année 2020 a donc été marquée par une absence historique de gel dans le centre de Rennes. En effet, alors qu'on observait  $-1,7^{\circ}\text{C}$  à Saint Jacques en 2020, la température de trois stations du centre-ville est restée positive, autour de  $0,4^{\circ}\text{C}$ . La tendance historique de diminution du nombre de jours de gel à Saint-Jacques est donc renforcée dans le centre de Rennes par le phénomène d'îlot de chaleur : alors que le nombre de jours de gel à Saint-Jacques a atteint 9 en 2020, dans le centre-ville, le gel est devenu encore plus rare : moins de 5 jours en 2011 et 2014, un seul jour en 2019 et aucun en 2020. La cartographie du nombre de d'heures et de jours de gel montre que la répartition du phénomène dépend du tissu urbain mais aussi du vent dominant, les situations à flux d'est et nord-est ayant tendance à déplacer l'ICU (et l'absence de gel) vers l'ouest et le sud. La comparaison avec des données satellitaires permettra par la suite de mieux préciser ce décalage entre ICU et occupation du sol.

## Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du programme CAPES/COFECUB Sh 941/19, CiCIAMEn (Cities, Climate And vegetation: Modeling and Environmental public policies). Les recherches s'inscrivent également dans les dispositifs « Zone Atelier Armorique » et DIPEE (Dispositifs de partenariat en écologie et environnement) du CNRS. Les données de Rennes Saint-Jacques ont été acquises sur la publitheque de Météo-France : <https://publitheque.meteo.fr>. Les auteurs remercient l'ensemble des institutions et personnes (trop nombreuses pour être citées ici) qui ont participé aux campagnes de mesures depuis 2004.

## Bibliographie

- Alcoforado M. J., Lopes A., Alves E. D. L., Canario P., 2014. Lisbon Heat Island - Statistical Study 2004-2012. *Finisterra*, **98**, 61–80.
- Amorim, M. C. C. T., Dubreuil, V., 2017. Intensity of Urban Heat Islands in Tropical and Temperate Climates. *Climate*, (5), 91-104.
- Bian, T., Ren, G., Zhang, B. et al. 2015. Urbanization effect on long-term trends of extreme temperature indices at Shijiazhuang station, North China. *Theor Appl Climatol*, **119**, 407–418.
- Dettwiller J., 1970. Evolution séculaire du climat de Paris. Influence de l'urbanisation. *Mémorial de la Météorologie Nationale*. Paris, 83.
- Dubreuil V., Quénot H., Foissard X., Planchon O., 2010. Climatologie urbaine et îlot de chaleur urbain à Rennes, in P.Clergeau (dir.) *Ville et biodiversité: les enseignements d'une recherche pluridisciplinaire*. Presses Universitaires de Rennes. P.105-122.
- Dubreuil V., Foissard X., Nabucet J., Thomas A., Quenol H., 2020. Fréquence et intensité des îlots de chaleur à rennes : bilan de 16 années d'observations (2004-2019). *Climatologie*, 17 (6), 1-17.
- Foissard, X., Dubreuil, V., Quénot, H., 2019. Defining scales of the land use effect to map the urban heat island in a mid-size European city: Rennes (France). *Urban Climate*, 29.
- Fujibe F., 2008. Detection of urban warming in recent temperature trends in Japan. *Intern. Journ. Climatol.*, **29(12)**, 1811-1822
- Merot P., Dubreuil V., Delahaye., Desnos P., 2012. *Changement climatique dans l'Ouest : Évaluation, impacts, perceptions*. Presses Universitaires de Rennes. Coll. Espaces et Territoires.
- Oke T. R., Mills G., Christsen A., Voogt J. A., 2017. *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- Pigeon G., Legain D., Durand P., Masson V., 2007. Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France). *Int. J. Climatol.* **27**, 1969–1981.
- Schatz J., Kucharik C.J., 2016. Urban heat island effects on growing seasons and heating and cooling degree days in Madison, Wisconsin USA. *Intern. Journ. Climatol.*, 36(15), 4873-4884.

# CLIMAT ET MALADIES DES TOMATES DANS LA RÉGION DU CAP BON (TUNISIE) : CAS DE MILDIOU

El Hajri J.<sup>1</sup> Haddad R.<sup>2</sup> Bouzid K.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Enseignant chercheur en climatologie, '1'2'3' Unité de recherche Géomatique et Géo système UR11ES41 Université de Manouba 2010 Manouba, Tunis. Email :jamil\_hajri2011@yahoo.fr*

<sup>2</sup> *Chercheur, Email : romdhanhaddad2@gmail.com*

<sup>3</sup> *Chercheur, Email : bouzidmohaedkhaled@yahoo.fr*

**Résumé** - La culture de la tomate occupe une place de choix dans l'économie agricole du Cap Bon. Elle représente 35% des cultures saisonnières estivales et contribue à hauteur de 25 de la production nationale de tomates. Cependant, cette culture est fortement menacée par un endoparasite qui peut causer des dégâts énormes. Il s'agit de « mildiou » qui s'active dans des conditions climatiques bien définies. La présente étude essaye de déterminer :

- les conditions climatiques de latence et d'activité de la maladie
- les conditions climatiques favorables au déclenchement de cette maladie dans la région du Cap Bon
- une cartographie du risque de mildiou

**Mots-Clés** : Cap Bon, tomates, Mildiou, latence, activité.

**Abstract**-Climate and diseases of tomatoes in the Cap Bon region (Tunisia): case of mildiou

Tomato cultivation occupies a prominent place in the agricultural economy of Cap Bon. It represents 35% of summer seasonal crops and contributes 25% of the national tomato production. However, this crop is strongly threatened by endoparasite which can cause enormous damage. It is Mildew that is activated in well-defined climatic conditions. This study attempts to determine:

- the climatic conditions of latency and activity of the disease
- the climatic conditions favorable to the outbreak of this disease in the Cap Bon region
- Mildew risk mapping

**Key words**: Cap Bon, tomatoes, Downy mildew, latency, activity.

## Introduction

Dans la région du Cap Bon, la culture des tomates saisonnières occupe une place stratégique aussi bien dans l'économie régionale que nationale. S'étendant sur 5200 ha (30 % de la superficie des cultures maraîchères et 40% de la superficie des tomates à l'échelle nationale), elle est pratiquée par 3500 agriculteurs spécialisés offrant 1 million de jours de travail en moyenne par an et alimentant 16 unités de transformation dans la région (CRDA Nabeul 2018).

Cependant, cette culture stratégique dans l'économie agricole se trouve aujourd'hui fortement menacée par des bio agresseurs qui causent des dégâts énormes (Mildiou, Oïdium, ...). Parmi ces bio agresseurs le mildiou s'avère un agent très redoutable. Historiquement cette maladie était responsable dans les années 1840 de la famine de la pomme de terre en Europe (Wikipédia, 2016).

Depuis quelques années et d'après le suivi annuel régulier de la culture des tomates dans notre région d'étude, on a constaté une fréquence et une expansion de la maladie même avec une forte température, comme c'était le cas du mois de mai 2018, ce qui a causé des dégâts énormes à l'économie agricole. Conditionnée par des conditions météorologiques spécifiques, les questions qui s'imposent fortement sont :

- Comment expliquer la fréquence et l'expansion remarquable de la maladie ces dernières années ?
- Quelles sont les régions les plus exposées à cette maladie ?
- Quelle est la période la plus favorable à son déclenchement et à son expansion ?

C'est dans ce contexte qu'on a mené cette étude qui reste préliminaire vu la complexité du sujet, le manque et l'absence des données et la nécessité des mesures en fonction des situations microclimatiques.

Trois points seront soulevés dans cette étude :

- le mildiou dont le déclenchement et la propagation sont liés à des conditions météorologiques particulières.
- Le Cap Bon, une région à climat favorable à cette maladie.
- Un essai de cartographie de risque de mildiou en fonction des paramètres climatiques favorables à son déclenchement.

Les données utilisées dans cette étude proviennent essentiellement de l'Institut National de la Météorologie (INM) et des différents services s'intéressant à cette culture relevant du Ministère de l'Agriculture notamment le Commissariat Régional de Développement Agricole de Nabeul (CRDA).

## 1. Le mildiou : caractéristiques principales et conditions météorologiques favorables au déclenchement et au développement de la maladie

Le terme « mildiou » résulte de la francisation phonétique de l'anglais « mildew » signifiant « substance collante sécrétée par les pucerons » (Wikipédia, 2016). C'est le nom générique d'une série des maladies cryptogamiques qui affectent plusieurs espèces de plantes dans des conditions météorologiques bien déterminées. Ces maladies sont causées par des parasites microscopiques. Dans certaines cultures, le mildiou prend, et d'une manière très rapide, une proportion épidémique aboutissant à des dégâts énormes. La culture des tomates est considérée parmi les plus fragiles et les plus exposées à cette maladie qui fait pourrir aussi bien les feuilles que les tiges et les fruits des plants infectés.

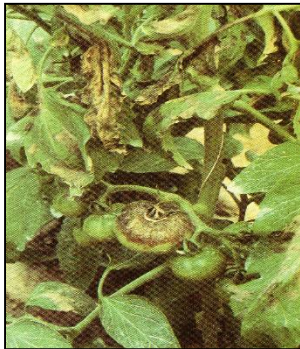


Figure 1. Tomate mildiousée

Bien qu'elle attaque toute la plante (figure 1), elle se manifeste essentiellement sur les feuilles sous formes de taches angulaires jaunâtres qui se limitent aux nervures du limbe foliaire. En correspondance de ces taches et à la face inférieure de la feuille, on note la présence d'un duvet lâche, gris violacé. Les conditions météorologiques favorables au déclenchement, au développement et à la propagation de la maladie sont les suivants : des températures comprises entre 10 et 25°C, une humidité voisine de la saturation, des nuits froides et des journées modérément chaudes.

Notons qu'il existe des seuils considérés comme optimum à différentes phases du cycle biologique de mildiou qui dure entre 4 et 10 jours (P. Tilma et R. Fontaine, 2015). Pour l'incubation, la température optimale varie entre 17 et 20°C. Pour la sporulation, on note une température optimale variant entre 18 et 22°C durant au moins 8 heures avec une humidité relative supérieure à 90%. Quant à la propagation et la dispersion, elles s'effectuent par le vent et la pluie à des distances parfois importante (plusieurs centaines de mètres selon l'activité météorologique et gagnent de nouvelles plantes encore saines. La température optimale de l'infection se situe entre 12 et 16°C. L'infection est très rapide (3 à 4 heures). « Les tissus foliaires sont par la suite rapidement envahis par le mycélium non cloisonné (la température optimale de croissance est de 23°C) dont l'activité désorganise progressivement les tissus colonisés » (Blancard D., 2018). Si les conditions climatiques sont favorables, les premières taches apparaissent entre 4 et 7 jours après les premières contaminations.

## 2. Les conditions climatiques favorables au déclenchement de mildiou dans la région du Cap Bon

Notons tout d'abord que la durée retenue de l'étude est celle du cycle végétatif de tomate de saison. Cette durée a été l'objet d'une étude traitant la répartition des températures et la culture des tomates en Tunisie. En se basant sur les besoins en températures de la tomate nous avons



pu déterminer le calendrier des divers stades physiologiques de cette culture. Dans ce contexte le Cap Bon est considéré comme une région à repiquage précoce. En effet, dans notre région « le repiquage peut se pratiquer dès le début de février. L'hiver ici est plus doux. Certes, la mer favorise des conditions favorables à cette précocité par rapport aux autres régions » (El Hajri, 2003). Pour cette raison l'étude des conditions climatiques favorables au déclenchement de mildiou s'étend du mois de février jusqu'au mois de mai. Quant aux paramètres qui causent la maladie on retient essentiellement les plus actifs: l'humidité et la température. Cependant, en l'absence et au manque des données relatives à l'humidité on a eu recours aux paramètres pluie et eau d'irrigation, sources principales de l'humidité relative.

## **2.1. Les sources principales de l'humidité relative dans le Cap Bon**

### **2.1.1. Les eaux d'irrigation**

Dans une étude traitant des besoins en eau des tomates et basée sur le suivi quotidien de la consommation hydrique, on a pu déterminer ces besoins suivant les stades physiologiques (El Hajri J., 1999). La consommation totale en eau a dépassé 900 mm répartie différemment selon les trois stades physiologiques :

Notons ici que le problème ne réside pas dans la quantité d'eau irriguée mais dans la mauvaise gestion de l'irrigation ou dans l'obligation d'un excès d'irrigation. Une telle situation crée un environnement favorable au déclenchement de mildiou.

En effet, l'étude a pu déterminer trois types d'irrigation. La première est la Pré-irrigation ou ce que j'ai appelé l'irrigation de base. C'est celle qui précède la plantation. C'est une irrigation abondante qui rend le sol imbibé d'eau. Elle a pour but de faciliter la plantation et de préserver le chevelu racinaire dans des bonnes conditions. Dans ces conditions, le risque de déclenchement de la maladie est fort. Ainsi, il est impératif que les plants soient traités contre le mildiou avant le repiquage. Le second type d'irrigation est l'irrigation principale, ou irrigation profonde. Elle a pour but de fournir de l'eau disponible pour assurer la croissance de la plante. Elle ramène le sol à sa « capacité au champ ». L'abondance en eau dans ces deux types présente une source principale à l'humidité relative et par conséquent au risque potentiel de déclenchement de mildiou. Le troisième type est l'irrigation secondaire : c'est une irrigation courte qui a pour but la ré humidification de la partie supérieure du sol.

Dans l'irrigation deux précautions à prendre : une mauvaise gestion de système d'irrigation et un excès d'eau.

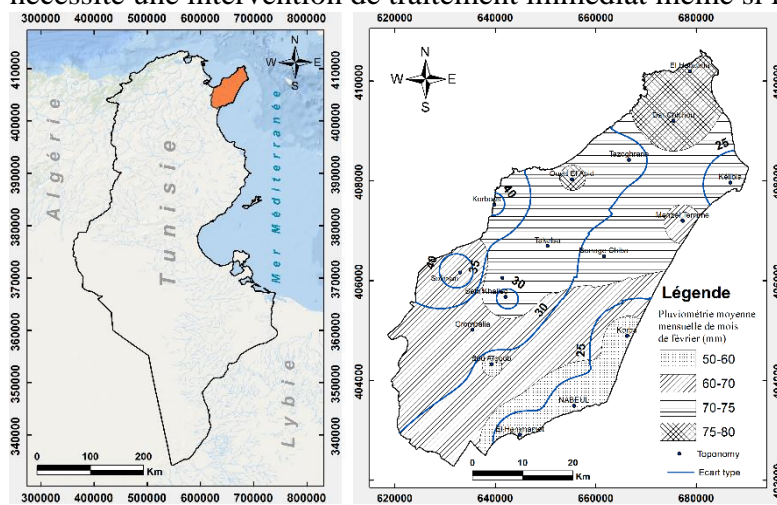
### **2.1.2. Les pluies**

Il ne s'agit pas d'une étude pluviométrique approfondie. Il s'agit tout simplement de voir si les quantités précipitées peuvent être une source à l'humidité relative, paramètre causal de déclenchement de la maladie durant le cycle végétatif de tomate. Pour ce faire on a retenu deux critères : la situation mensuelle moyenne et le degré de variation. D'après les cartes représentatives de ces deux critères, on peut présenter les remarques suivantes (figure 2):

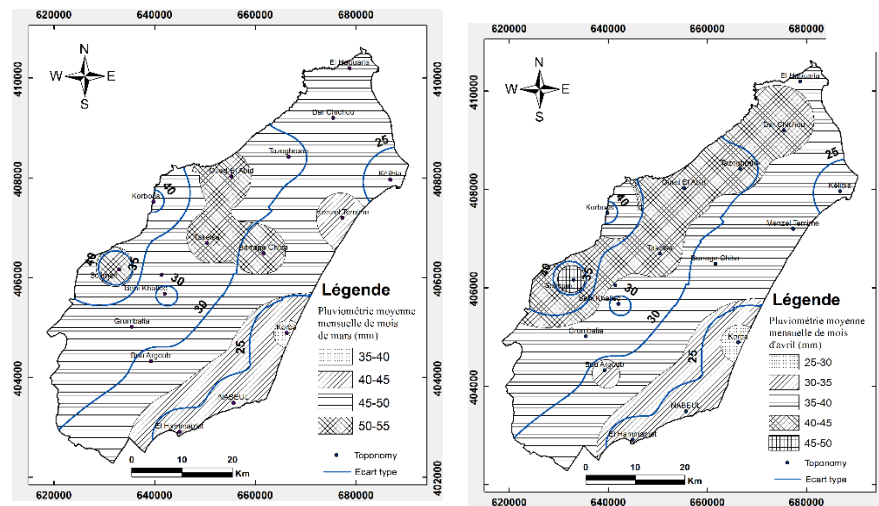
- Partout dans le Cap Bon et durant les trois mois retenus, la pluie est quantitativement une source fondamentale d'humidité relative. Une situation atmosphérique stable après une chute de pluie amène l'air à sa saturation hygrométrique, surtout dans les régions basses et les régions côtières principales, régions productrices de tomate. Une telle situation crée un environnement favorable non seulement au déclenchement de la maladie mais aussi à sa propagation.

- Durant les trois mois retenus et partout dans le Cap Bon, l'écart type de la pluie est important. Cette variation mensuelle peut être considérée comme un risque potentiel permanent d'une

situation hygrométrique causale de la maladie. D'ailleurs on s'est habitué aux avis d'alerte diffusés par les services agricoles locaux à chaque variation brusque de type de temps. Chaque chute de pluie suivie d'une stabilité atmosphérique et une augmentation de la température nécessite une intervention de traitement immédiat même si la maladie est en état de latence.



- Ajoutons à tout ça et d'après des suivis réguliers, l'importance des précipitations occultes sur la côte orientale du Cap Bon principale région productrice des tomates. Certes, ces caractéristiques climatiques locales présentent un facteur causal de plus qui s'ajoute au déclenchement de la maladie.

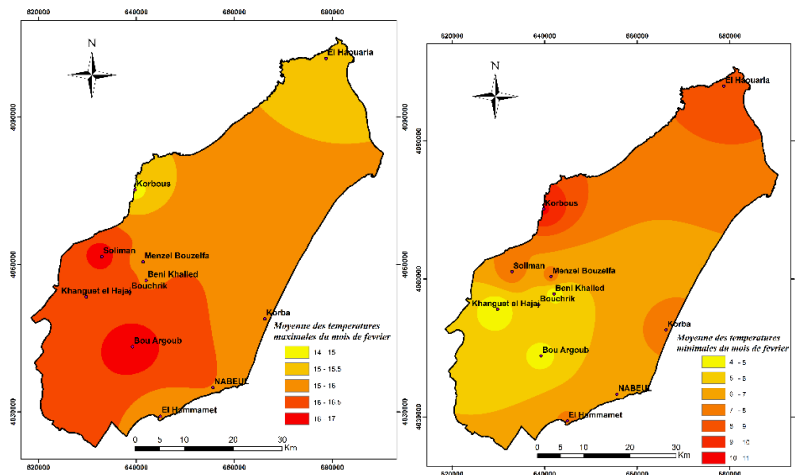


## 2.2. Les températures

La température est un paramètre causal fondamental du déclenchement de la maladie. L'étude des maxima et des minima (figure 3) ainsi que leurs degrés de variation durant les trois mois retenus montre les faits suivants :

**Figure 2.** Moyennes pluviométriques mensuelles et écart type (période 1970/2017) - Partout dans le Cap Bon et durant les mois février, mars et avril, les seuils de déclenchement de la maladie sont dépassés. C'est une période très favorable à l'activité parasitaire.

- Pendant le mois de février, dernier mois de l'hiver, et durant toute la période d'étude, la fréquence des situations de latence parasitaire est très faible.
- Durant cette période, la fréquence de seuil maximal de latence ( $30^{\circ}$  C) est très faible.
- Dans certains cas, le mois de mai présente aussi un risque redoutable qu'il faut prendre en considération.
- Dans toutes les stations et durant les trois mois retenus, l'écart type des maxima et des minima reste faible, surtout dans les zones côtières (Korba, El Haouaria), principales régions productrices des tomates.



**Figure 3.** Moyennes mensuelle des maxima et des minima (Exemple de février) (Période 1982/2015)

Retenons essentiellement que l'environnement thermique dans le Cap Bon et durant les trois mois retenus est très favorable à l'activité parasitaire de mildiou. Une situation relativement chaude qui succède à une situation humide ou un excès d'irrigation ou une mauvaise gestion de système d'irrigation présente un risque d'activité parasitaire

redoutable. La fréquence de ce risque ces dernières années menace de plus en plus ce secteur fondamental de l'économie agricole régionale ainsi que nationale. Ceci nous a poussés à poser une question fondamentale : peut-on prévenir ce risque, ou au moins déterminer la période et les zones les plus exposées au mildiou ?

### 3. Proposition d'un indice de risque de mildiou dans la région du Cap Bon

Rappelons tout d'abord qu'on a déjà signalé que cette étude reste préliminaire vu la complexité de sujet et surtout le manque et l'absence des données nécessaires pour contourner les différents aspects du sujet. Cependant, nous présentons ici un essai de quantification de risque de mildiou appuyé par des enquêtes régulières durant les cinq dernières années.

#### 3.1. Problématique et méthodologie

Dans le contexte de quantifier la maladie du mildiou, nous avons rencontré plusieurs problèmes. En effet, l'existence d'une multitude de microclimats dans notre région rend la mise en place d'une modélisation épidémiologique localement très délicate. En outre, des pratiques agricoles multiples favorisent le déclenchement de la maladie (mauvaise gestion de l'irrigation, mauvaise aération...). On a constaté aussi l'absence totale, du moins chez les agriculteurs, de la valorisation des différences de résistance variétale au mildiou. Aucun contrôle des situations sanitaires des microrégions n'a été signalé.

Dans ce cadre et en l'absence d'indicateurs complètement objectifs pour quantifier le risque potentiel de mildiou, nous avons choisi d'approcher cette quantification en nous référant aux données des éléments climatiques disponibles, à savoir la pluie et la température, facteurs principaux favorables au déclenchement du mildiou. Partons tout d'abord de l'idée principale de l'efficacité thermique. Nous savons qu'une forte température active l'évaporation et une basse température active la condensation. Dans les deux situations, c'est l'humidité relative qui se trouve favorisée. Dans ce contexte nous avons cherché le rapport entre la pluviométrie mensuelle moyenne et la température maximale moyenne mensuelle pour chaque station. On a fait la même chose pour les températures minimales. Nous avons ensuite sommé les résultats. Ces résultats, et après vérifications avec les enquêtes menées durant cinq années, sont cartographiés (figure4).

#### 3.1. Résultats et discussions

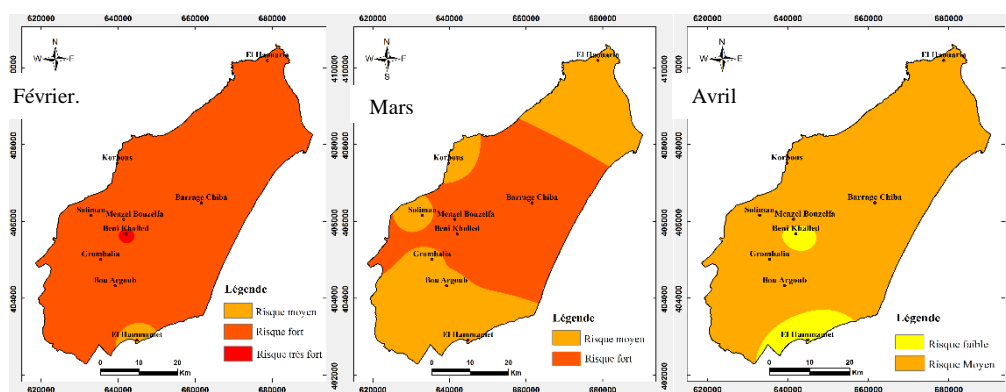


Figure 4. Indice de risque de mildiou

Le mois de février présente un risque partout très fort. Mars présente un risque allant du fort à très fort et Avril connaît un risque moyen. La diminution des précipitations et l'augmentation des températures expliquent cette dégradation.

En l'absence ou au manque de plusieurs indicateurs objectifs, le recours aux seuls paramètres pluie et température reste défendable. Cependant, l'étude de cette maladie nécessite une approche globale qui doit aussi prendre en compte les pratiques agricoles, les particularités microclimatiques et la valorisation des différences de résistance variétale au mildiou. Le traitement préventif et régulier de février à mai reste la solution la plus adéquate bien qu'elle soit parfois trop coûteuse.

## Conclusion

Le mildiou reste parmi les principaux ennemis de la culture des tomates. Dans notre région, la récolte de l'année 2018 a été fortement touchée par cette maladie. Une première constatation, on a enregistré des situations météorologiques exceptionnelles (pluie de mai et vagues de chaleur fréquente à partir de mois de juin). Cela nécessite un suivi et une étude approfondie qui prend en considération la multitude des microclimats dans le but de chercher un lien potentiel avec le changement climatique. Dans l'état actuel, nous recommandons le traitement préventif régulier (hebdomadaire) bien qu'il reste trop coûteux. Rappelons que le mildiou est toujours présent en état de latence et il lui suffit une humidité forte succédée d'une situation de chaleur pour se déclencher. Cependant, quelques pratiques et mesures agronomiques peuvent minimiser le risque qui lui est associé. L'inspection quotidienne des plants est très conseillée pour une détection précoce de la maladie du fait que le mildiou apparaît d'abord en foyers isolés puis qu'il se généralise très vite.

## Bibliographie

- Commissariat Régionale du Développement Agricole-Nabeul, 2018 : *Préparation à la saison de transformation des tomates*. Rapport interne, 13 p.
- Blancard D., 2018 : Biologie, épidémiologie, *Ehlyia identifier, connaitre, maîtriser*. INRA France
- El Hajri J., 1999 : Recherches sur les besoins en eau d'une culture des tomates industrielles (variété Sabra) dans la région de Takelsa au Cap Bon, Tunisie. *Actes du IV colloque du département de géographie (Bioclimatologie et topo climatologie)* 11, 12,13 novembre 1999. Faculté des Lettres de Manouba, Tunisie (pp.119-130).
- El Hajri J., 2003: Répartition des températures et culture des tomates en Tunisie, *Actes du 15<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 2003 (pp.80-86).
- Tilma P., Fontaine R., 2015: Mildiou de la tomate et de la pomme de terre. *Écophyto fiche phytosanitaire /cultures maraîchères*. Ile de la Réunion.
- Wikipédia, 2018 : Mildiou. *L'encyclopédie libre* (dernière modification faite le 4 novembre 2018)

# EVALUATION DES RESSOURCES EN EAU DANS LE BASSIN AMONT DE L'OUM ER RBIA (MAROC) SUR LA PERIODE 1975-2015 ET PROSPECTIVE

El Orfi T.(1), El Ghachi m.(2), Lebaut S.(3) et Gille E.(4)

(1) Laboratoire "DPRP", USMS - Maroc, et Unité de Recherche "LOTERR", Université de Lorraine - France, elorfitarik@gmail.com

(2) Laboratoire "DPRP", USMS - Maroc, elghachi\_mohamed@yahoo.fr

(3) Unité de Recherche "LOTERR", Université de Lorraine - France, sebastien.lebaut@univ-lorraine.fr

(4) Unité de Recherche "LOTERR", Université de Lorraine - France, emmanuel.gille@univ-lorraine.fr

**Résumé :** Le bassin versant de l'Oum Er Rbia amont représente un enjeu fort du point de vue des ressources en eau à l'échelle du Maroc puisqu'il alimente pour une grande part le plus grand périmètre agricole irrigué du Maroc. Pour autant, dans une logique de gestion des écoulements par la grande hydraulique, les volumes d'eau produit dans le bassin sont stockés dans le réservoir du barrage Ahmed El Hansali sans qu'il y ait une réelle connaissance dans l'organisation des écoulements (débits de base, débits de crue) que cela soit du point de vue spatial ou temporel. L'application de méthodes de l'hydrologie analytique, sur les hydrogrammes (1975-2015) produits aux 5 stations hydrométriques implantées à l'amont de la retenue d'eau a permis de calculer les volumes de crue et les volumes de base à l'échelle annuelle. La mise en relation de ces volumes avec les précipitations permet de préciser le comportement hydrologique différencié de chacun des 5 bassins qui est notamment fonction du contexte hydrogéologique induit par la nature géologique des terrains. Les coefficients de corrélation  $R^2$  plus au moins forts entre les écoulements et les précipitations montrent qu'il est possible, dans une certaine mesure, de prévoir les volumes de la ressource en eau future sur la base des projections de valeurs de pluie dans ce secteur du Moyen-Atlas.

**Mots clés :** Oum Er Rbia, ressource en eau, hydrogramme, relation pluie-débit.

**Summary:** The upstream Oum Er Rbia watershed represents a major challenge in terms of water resources on the Moroccan scale since it largely supplies the largest irrigated agricultural area in Morocco. However, in a logic of flow management by large scale hydraulics, the volumes of water produced in the basin are stored in the reservoir of Ahmed El Hansali dam without any real knowledge in the organization of the flows (base flows, flood flows) either from a spatial or temporal point of view. The application of analytical hydrology methods on the hydrographs (1975-2015) produced at the 5 hydrometric stations located upstream of the water reservoir made it possible to calculate flood volumes and base volumes on an annual scale. The relation of these volumes with the precipitations allows to specify the differentiated hydrological behavior of each of the 5 basins which is a function of the geological nature of the grounds and the hydrogeological context. On the other hand, the correlation coefficients  $R^2$  more or less strong between runoff and precipitation show that it is possible, to a certain extent, to forecast the volumes of the future water resource on the basis of projections of rainfall values in this sector of the Middle Atlas.

**Key words:** Oum Er Rbia, water resource, hydrograph, rain-flow relationship.

## Introduction

- Le Maroc, pays de la rive sud de la Méditerranée, est une zone de contact entre milieux écologiques différents, de l'humide montagneux au Saharien. Sur le nord du pays, l'effet de la latitude se manifeste par la prédominance d'un climat méditerranéen, à l'origine de ressources en eau fragiles, menacées de dégradation rapide en cas de sur-prélèvement.

- Les apports en eau de surface se chiffrent en année moyenne en quelques millions de m<sup>3</sup> pour les bassins les plus démunis au sud du Maroc, et en milliards de m<sup>3</sup> pour les bassins les plus favorisés qui sont situés au nord (Bzioui, 2004). La gestion rationnelle et la planification prospective des ressources en eau doivent permettre d'assurer de manière continue, la disponibilité de cette ressource en quantité suffisante et en qualité requise pour l'ensemble des usagers (ABHOER, 2012). La priorité donnée au secteur de l'eau depuis les années 60 a permis de disposer d'un patrimoine d'infrastructures hydrauliques, constitué d'une centaine de barrages de tailles diverses.

- Le bassin de l'Oum Er Rbia dispose d'une quinzaine de grands barrages d'une capacité de stockage totale de 5100 hm<sup>3</sup>. Grâce à cette importante infrastructure le taux de mobilisation des ressources en eau superficielles dépasse 85 % (ABHOER, 2012). Ces barrages ont des objectifs de développement local. Ils permettent de consolider, moderniser ou d'étendre des

périmètres irrigués existants en plus de leur contribution à la protection contre les inondations des zones aval. Sur l'ensemble du bassin de l'Oum Er Rbia et les bassins côtiers atlantiques, les écoulements annuels moyens ont été de 3300 hm<sup>3</sup> sur la période 1940-2008 (ABHOER, 2012). Ces écoulements se produisent généralement sous forme de crues violentes et rapides.

- Évaluer la quantité de l'eau disponible est indispensable à la mise en valeur et à la gestion des ressources en eau, qu'il s'agisse d'eau potable pour les populations, de production agricole, industrielle ou d'énergie. Le but de cette contribution est de mettre en relation les volumes de crue et les volumes de base à l'échelle annuelle pour les cinq stations hydrométriques implantées à l'amont de la retenue d'eau du barrage Ahmed El Hansali en haut bassin de l'Oum Er Rbia avec les précipitations enregistrées entre 1975 et 2015.

## 1. Données et Méthodes

### 1.1. Zone D'étude

- Le bassin versant étudié fait partie du plateau central et du Moyen Atlas au Maroc et représente la partie amont du grand bassin versant de l'oued Oum ErRbia. Il est délimité par le bassin de la Moulouya à l'Est, le bassin du Sebou au Nord, et le bassin du Bouragreg à l'Ouest. Nous retenons comme exutoire la station d'Ahmed El Hansali (Fig.1).

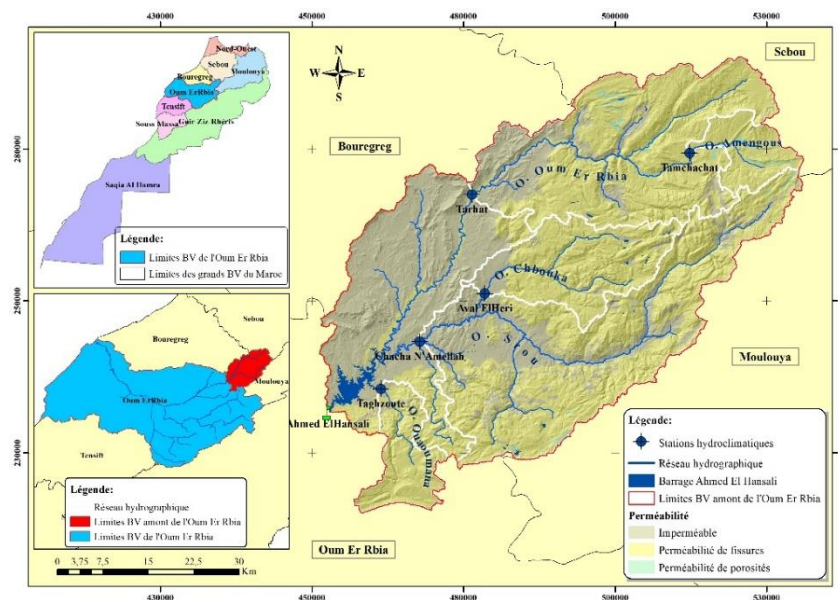


Figure 1. Localisation géographique de la zone d'étude et emplacement des stations de mesures.

- Sur le bassin de 3380 km<sup>2</sup>, cinq stations hydro-climatiques sont gérées par l'Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia (ABHOER). Le contexte climatique est de type semi-aride, avec une pluviométrie moyenne annuelle de l'ordre de 511 mm à l'aval (station de Taghzoute), et 706 mm à l'amont (station de Tamchachat) sur la période 1975-76 / 2014-15.

- L'Oum Er Rbia a pour origine l'oued Fellat qui prend sa source au mont Serroual (2108 m). L'oued Fellat reçoit les apports d'un groupe de sources connues sous le nom « sources de l'Oum ErRbia ». Ce n'est qu'à partir de la confluence de l'oued Fellat avec l'oued Bou Idji que le cours porte le nom d'Oum ErRbia (Bentayeb & Leclerc, 1977). L'écoulement de l'oued Oum ErRbia est pérenne et le débit moyen annuel à la station de Tarhat est de l'ordre de 16 m<sup>3</sup>/s.

### 1.2. Données

- Pour mieux comprendre l'organisation spatio-temporelle des écoulements et leur influence sur le volume des réserves stockés dans le barrage d'Ahmed El Hansali, l'application de méthodes de l'hydrologie analytique, sur les hydrogrammes en QTvar (1975-2015) produits

aux cinq stations hydrométriques implantées à l'amont du bassin a permis de calculer les volumes de crue et les volumes de base à l'échelle annuelle.

- Les données de précipitations et de débits fournies par l'ABHOER à différents pas de temps ont été utilisées pour atteindre les objectifs de notre étude (Tab.1).

Tableau 1. Caractéristiques des stations de mesures.

Station	Cours d'eau	Date de mise en service	Données disponibles	Surface du bassin (Km <sup>2</sup> )	Altitude à l'exutoire (m)	X	Y
Taghzoute	Ouaoumana	1970-71	P et Q	172	628	461400	235500
Chachan'Amellah	Srou	1974-75	P et Q	1423	685	467800	243300
Aval El Héri	Chbouka	1970-71	P et Q	354	830	478500	251200
Tarhat	Oum Er Rbia	1969-70	P et Q	1011	1036	476400	267500
Tamchachat	Amengous	1974-75	P et Q	133	1685	512330	274340

### 1.3. Méthode

- Compte tenu de son importance hydrique, le 2ème fleuve marocain en terme de longueur l'Oum Er-Rbia, a fait l'objet de l'attention des chercheurs de nombreux domaines surtout hydrologique et hydrogéologique (Bentayeb & Leclerc, 1977; Loup, 1962; Moniod et al., 1972; Serbout, 2001) ... Depuis 1996, l'ABHOER applique plusieurs méthodes pour le suivi quantitatif et qualitatif des ressources en eau à l'échelle du grand bassin de l'Oum Er Rbia. Dans cette étude, nous visons l'évaluation des ressources en eau dans le bassin amont de l'Oum Er Rbia, à travers l'application la méthode de l'hydrologie analytique qui consiste à séparer les hydrogrammes en deux phases, débits de crue et débits de base. Nous avons procédé comme suit :

- La sélection des événements de crues pluviales a été faite sur la base des hyétogrammes de l'ensemble des stations retenues. Il existe plusieurs définitions d'un événement hydrologique et dans cette étude, c'est celle de Tardif qui a été retenue. En effet, ils définissent un évènement sur la série chronologique des débits, comme allant d'un creux à une pointe à un creux.

- La revue de la littérature montre que la technique de séparation graphique des hydrogrammes est la plus utilisée (El Adlouni et al., 2011). Cette approche fondée sur la décomposition logarithmique des hydrogrammes (Fig.2) proposée par Roche (1963) a été appliquée dans une feuille "Excel".

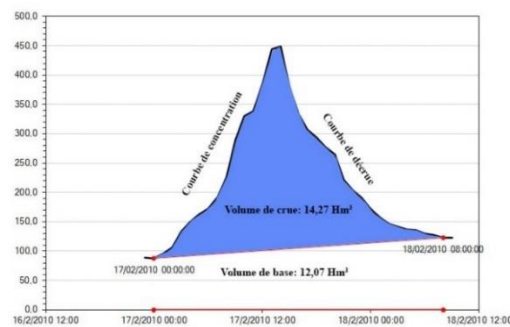


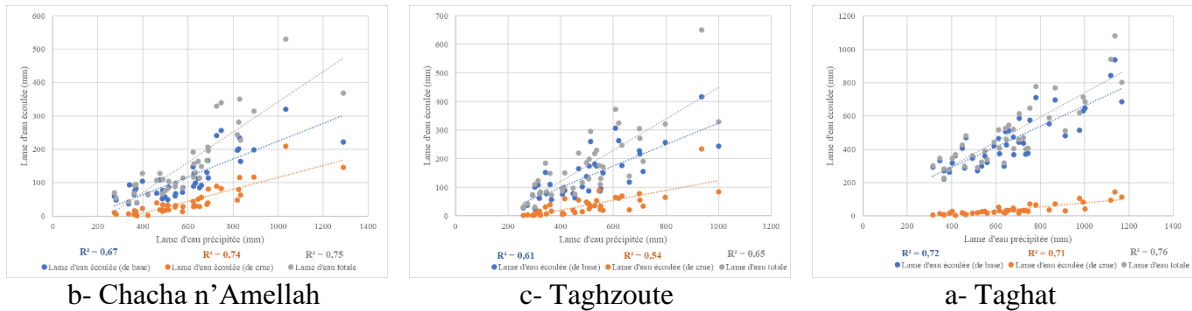
Figure 2. Décomposition d'un hydrogramme de crue, épisode de 17/02/2010 - 18/02/2010 à la station de Tarhat.

- La caractérisation de chaque hydrogramme de crue pluviale par plusieurs variables statistiques sont estimées : la durée de la crue, le temps de montée et de descente, et le volume de crue et de base.

## 2. Résultats

### 2.1. Relation entre la lame d'eau précipitées et les lames d'eau écoulées

L'application de la méthode de Thiessen pour la spatialisation des données pluviométrique des stations disponibles pour calculer la lame d'eau précipitée pour chaque sous bassin (Roche, 1963), puis la détermination des coefficients de corrélation entre ces lames et les lames d'eau écoulées nous a permis d'évaluer la relation entre ces deux paramètres importants (Fig.2).



b- Chacha n'Amellah c- Taghzoute a- Taghat  
Figure 2. Corrélation entre les lames d'eau précipitées et écoulées pour trois sous bassin représentatives.

Ces relations varient en fonction des caractéristiques du bassin : sol, pente, couverture végétale, réseau hydrographique... La plupart de ces caractéristiques ne peuvent pas être définies de façon simple. Globalement, à l'échelle annuelle on enregistre une bonne adéquation entre les lames d'eau précipitées et écoulées (de base, de crue et totale). Pour l'écoulement de base  $R^2$  dépasse 0.7 pour les stations de Tarhat et Tamchachat. Alors que pour les lames écoulées de crue  $R^2$  égale à 0.78 pour la station d'Aval El Héri comme une valeur maximale. Concernant les lames écoulées totales, les deux stations d'Aval El Héri et Taghzoute témoignent des faible  $R^2$  : 0.67 et 0.65.

Mis à part le sous bassin d'Oum Er Rbia (st Tarhat) alimenté par les fameuses sources de l'Oum Er Rbia, qui contribuent à la régulation et la pérennité de l'écoulement pendant toute l'année, environ 70% des précipitations qui tombe sur les autres sous bassin s'évapore (théoriquement la lame d'eau évaporée dépasse le déficit d'écoulement déduit), s'intercepte (le couvert forestier représente 53% de la superficie du bassin d'Aval el Héri) ou s'infiltré (plus que 95% du substratum de Taghzoute et Tamchachat représente des calcaires fissuré), le 30% restant alimente les écoulements superficiels, dont 24% alimente les écoulements de base et 6% les écoulement de crue (Fig.3).

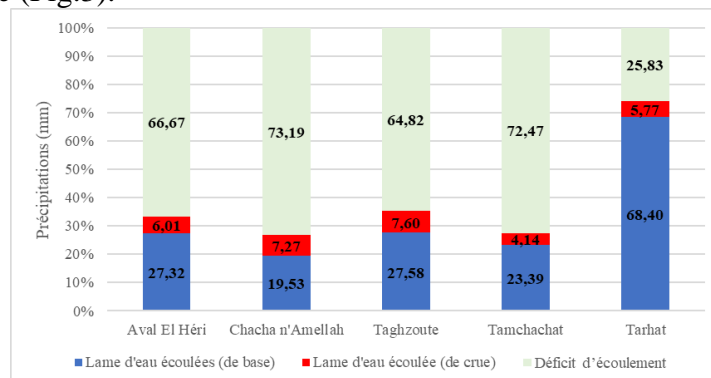


Figure 3. Répartition des précipitations à l'alimentation des écoulements.



## 2.2. Evolution spatio-temporel des volumes des écoulements totaux

Selon les scénarios les plus ambitieux, le bassin méditerranéen verra une augmentation des températures de 1,5 à 2°C à l'horizon 2100 (GIEC, 2019) ce qui accroîtra l'aridité, la fréquence, l'intensité, la durée des événements chauds et des sécheresses. Les modèles climatiques indiquent clairement une tendance vers une réduction des précipitations dans les décennies à venir (MedECC, 2018), ces contraintes climatiques entraînerait un effet négatif sur la disponibilité des ressources en eau dans le bassin méditerranée auquel appartient le Maroc. Donc, une gestion efficace des ressources en eaux nécessite une connaissance quantitative précise de celle-ci. Les informations sur la variation spatio-temporelle des volumes sont fondamentales.

Durant les périodes sèches les volumes d'eau diminuent à cause des faibles taux des précipitations, les années 1994-95 et 2007-08 témoignent des faibles volumes. Tandis que les périodes humides les volumes d'eau augmentent à cause de la disponibilité des précipitations, les années 1995-1996 et 2009-2010 témoignent des volumes importants. La station de Chacha n'Amellah enregistre en 1994-95 un volume total de 57,5 hm<sup>3</sup> (dont 56 hm<sup>3</sup> est un volume de base et 1,5 hm<sup>3</sup> est un volume de crue) et en 2009-10 elle enregistre un volume total de 754,5 hm<sup>3</sup> (dont 456 hm<sup>3</sup> est un volume de base et 298,5 hm<sup>3</sup> est un volume de crue) (Fig.4).

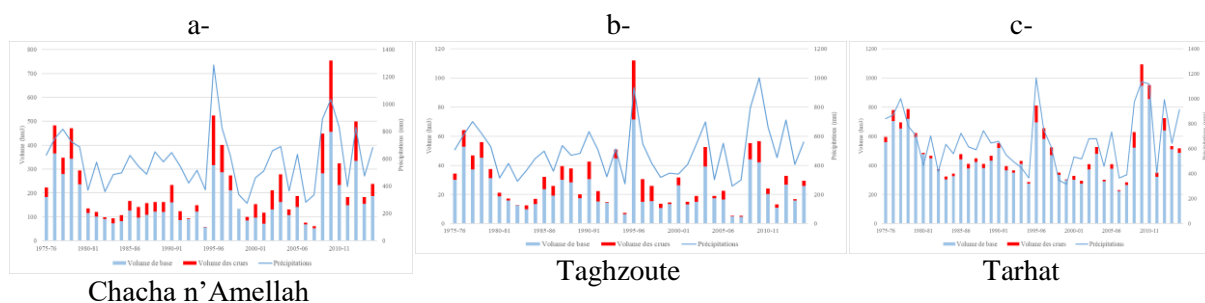


Figure 4. Évolution des précipitations et des volumes des écoulements pour trois sous bassin représentatives.

A l'échelle spatiale, les volumes totaux changent en fonction de l'importance des sous bassins. Le bassin d'Oum Er Rbia reste le plus important avec 498 hm<sup>3</sup> ce qui représente 58% de la totalité des écoulements dans la zone d'étude (Tab.2). Pour les autres sous bassins, les phases des crues contribuent par d'environ 20% dans le volume total des écoulements (Fig.5).

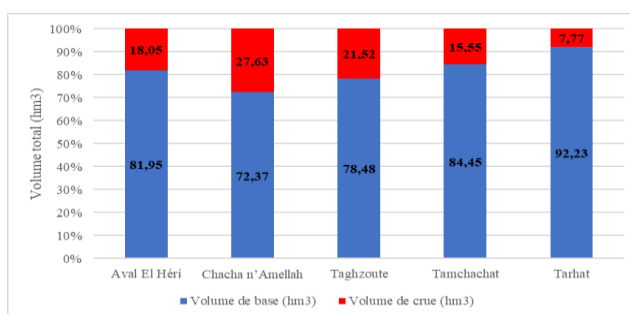


Figure 5. Contribution des volumes de crue à l'alimentation des écoulements.

Tableau 2. Volumes moyens annuels au niveau des stations de mesures.

	Taghzoute	Chacha n'Amellah	Aval El Héri	Tarhat	Tamchachat
Volume de base (hm <sup>3</sup> )	23,7	165,5	61,3	459,3	20,1
Volume de crue (hm <sup>3</sup> )	6,5	63,2	13,5	38,7	3,7
Volume total (hm <sup>3</sup> )	30,2	229,6	74,8	498	23,6

## Conclusions et Discussion

Les faibles coefficients de corrélation entre les moyennes des précipitations et les volumes extraits (de base, de crue et total) pour les deux sous bassin de Chbouka (st d'Aval El Héri) et Ououmana (st de Taghzoute) sont généralement dû à l'omniprésence des formations calcaires, ces formations recouvrent 87% de la superficie du bassin de Chbouka et 95% de la superficie du bassin de Ououmana. Ces deux cours d'eau drainent des formations caractérisées par une perméabilité de fissures qui permet à l'eau de s'infiltrer pour alimenter la nappe sous terrain. Pour le sous bassin d'Amengous (st de Tamchachat) l'incohérence entre la pluviométrie et les volumes d'eau est dû essentiellement à la présence de la neige pendant la période hivernale.

Le défi que constitue l'irrégularité spatio-temporelle des précipitations et les effets des changements climatiques sur la ressource en eau, impose la gestion de cette ressource rare à partir de la construction des grands barrages pour le stockage des apports pendant les années humides. À l'échelle du bassin versant de l'oued Oum Er Rbia, plusieurs barrages ont été construits dont le barrage d'Ahmed El Hansali. Depuis 2002, Ahmed El Hansali reçoit un volume annuel moyen égale à 836,4 hm<sup>3</sup>, dont 142 hm<sup>3</sup> est d'origine des crues (d'environ 17%). Trois bassins alimentent en permanence le barrage, le bassin d'Oum Er Rbia (inclus Amengous) est le plus important avec un volume annuel moyen égal à 543,6 hm<sup>3</sup>, qui représentent 65% des apports, suivi par le bassin de Srou (inclus Chbouka) avec un volume annuel moyen égal à 274,7 hm<sup>3</sup>, qui représente 32% des apports, et enfin le bassin de Ououmana avec un volume annuel moyen égal à 27 hm<sup>3</sup> et qui représente 3% des apports.

## Bibliographie

- ABHOER. (2012). Projet de Plan Directeur d'aménagement Intégré des Ressources en Eau du Bassin de l'Oum Er Rbia et des bassins côtiers atlantiques (p. 19) [Rapport de synthèse]. *Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia*.
- Bentayeb, A., & Leclerc, C. (1977). Ressources en Eau du Maroc, Tome III, Domaine atlasique et Sub-atlasique: Vol. III (*Editions du service géologique du Maroc*).
- Bzioui, M. (2004). Rapport national 2004 sur les ressources en eau au Maroc (p. 94). UN WATER-AFRICA.
- El Adlouni, S., Thiombiano, A. N., St-Hilaire, A., El-Jabi, N., & Caissie, D. (2011). Caractérisations des hydrogrammes de crues pluviales sur des petits bassins versants forestiers.
- GIEC. (2019). Réchauffement planétaire de 1,5°C (p. 110) [Rapport spécial du GIEC].
- Loup, J. (1962). L'Oum er Rbia. Etudes sur une grande rivière des montagnes marocaines. *Revue de Géographie Alpine*, 50(4), 519-555. <https://doi.org/10.3406/rga.1962.1002>
- MedECC. (2018). Les risques liés aux changements climatiques et environnementaux dans la région Méditerranée. *Mediterranean Experts on Climate and environmental Change*. [https://www.medecc.org/wp-content/uploads/2018/12/MedECC-booklet\\_FR.pdf](https://www.medecc.org/wp-content/uploads/2018/12/MedECC-booklet_FR.pdf)
- Moniod, F., dir., Roche, M., & réd. (1972). Etude hydrologique de l'Oum Er Rbia. 501.
- Roche, M. (1963). Hydrologie de surface (ORSTROM).
- Serbout, R. (2001). Le bassin versant de l'oued Oum er Rébia en amont de Déchra el Oued (moyen-Atlas): Contribution à l'étude des phénomènes hydro-climatiques [These de doctorat, Nice]. <https://www.theses.fr/2001NICE2043>

# EVALUATION DU CONTEXTE BIOCLIMATIQUE RECENT DES PERIMETRES IRRIGUES DU MOYEN ATLAS ET SES BORDURES (MAROC) A PARTIR DU QUOTIENT PLUVIOTHERMIQUE D'EMBERGER

El-Bouhali A.<sup>(1-2)</sup>, Lebaut S.<sup>(2)</sup>, Amyay M.<sup>(1)</sup>, Qadem A.<sup>(3)</sup>, Gille <sup>(2)</sup> et Cottonnec A.<sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> LOTERR UR 7304, Université de Lorraine, France. (abdelaiziz.elbouhali@usmba.ac.ma)

<sup>(2)</sup> Université Sidi Mohamed Ben Abdellah - Fès, Maroc

<sup>(3)</sup> DPRP, Université Sultan Moulay Slimane - Béni Mellal, Maroc

<sup>(4)</sup> COSTEL UMR, Université de Rennes2 – Rennes, France

**Résumé :** *La durabilité de l'agriculture et du développement rural est étroitement dépendante de la donne climatique dont les changements observés ces dernières décennies sont patents. Au Maroc, à l'échelle annuelle, ces changements vont dans le sens d'une diminution des précipitations mais on note également une élévation de la température. Le quotient pluviothermique d'Emberger, qui combine ces deux variables, traduit les conditions hydriques des milieux méditerranéens. Nous utilisons cet indice pour mettre en évidence l'amplitude des changements dans la contrainte biologique au niveau du Moyen Atlas septentrional, et plus particulièrement dans ses périmètres agricoles. Au final, sur la période récente (1975-2017), les variations du quotient pluviothermique d'Emberger mettent en lumière les changements dans la répartition des bioclimats au sein du Moyen Atlas et ses bordures. Ils deviennent de moins en moins favorables à l'agriculture. Ceci pose le problème de l'ajustement des systèmes agricoles à ces nouveaux contextes bioclimatiques, ce qui est un élément d'explication de la pression croissante sur la ressource en eau que l'on observe actuellement à l'échelle des périmètres irrigués du Moyen Atlas et de ses bordures.*

**Mots clés :** *Quotient pluviothermique d'Emberger, Moyen-Atlas, périmètre irrigué, modèle de précipitation*

**Abstract :** *The sustainability of agriculture and rural development is closely dependent on the climate, which has changed in recent decades. In Morocco, on an annual scale, these changes are in the direction of a decrease in precipitation, but a rise in temperature has also been noted. The Emberger quotient, which combines these two variables, reflects the water conditions of Mediterranean environments. We use this index to highlight the magnitude of changes in biological constraint in the northern Middle Atlas, particularly in its agricultural areas. Finally, over the recent period (1975-2017), variations in the Emberger quotient highlight changes in the distribution of bioclimates within the Middle Atlas and its borders. They are becoming progressively less favourable to agriculture. This poses the problem of adjusting agricultural systems to these new bioclimatic contexts, which is an element in explaining the increasing pressure on water resources currently observed in the irrigated areas of the Middle Atlas and its borders.*

**Keywords :** *Emberger quotient, Middle Atlas, irrigated perimeter, precipitation model*

## Introduction

Le Moyen Atlas constitue un domaine hydrologique et hydrogéologique des plus importants du Maroc. La pluviométrie relativement abondante sur une large partie de la chaîne fournit des volumes d'eau qui assurent la pérennité de plusieurs cours d'eau prenant naissance dans et en marges de la chaîne. Ces ressources en eaux de surface et souterraines sont utilisées au niveau local mais aussi national pour des usages multiples, notamment dans le domaine de l'agriculture. Ainsi depuis une cinquantaine d'années la conversion en terres agricoles a touché de vastes surfaces si bien que presque toutes les zones dépourvues de couverture forestière sont utilisées pour l'agriculture avec des exploitations le plus souvent destinées à une agriculture intensive essentiellement irriguées par pompage des eaux des nappes. Nous avons souhaité étudier dans quelle mesure les changements climatiques récents ont affecté les potentialités hydriques du Moyen Atlas en général et au niveau des principaux périmètres irrigués.

## 1. Contexte et objectif

Le Moyen Atlas s'inscrit dans deux unités morphostructurales : un causse à l'ouest dont les altitudes sont de l'ordre de 1200m tandis que la partie est, plissée, est une succession de cuvettes synclinales et de lignes de crêtes anticlinales dont le point culminant dépasse 3000m. La région

étudiée est donc marquée par un compartimentage morphostructural impliquant des contrastes pluviométriques marqués au sein du secteur caractérisé par un climat de type méditerranéen. On y trouve des secteurs appartenant à l'étage humide dans lequel les montants de précipitations annuelles atteignent plus de 1000mm (station d'Ifrane) et des secteurs abrités, situés dans l'étage semi-aride avec des précipitations observées inférieures à 300mm (station de Pont de Mdez) (figure 1).

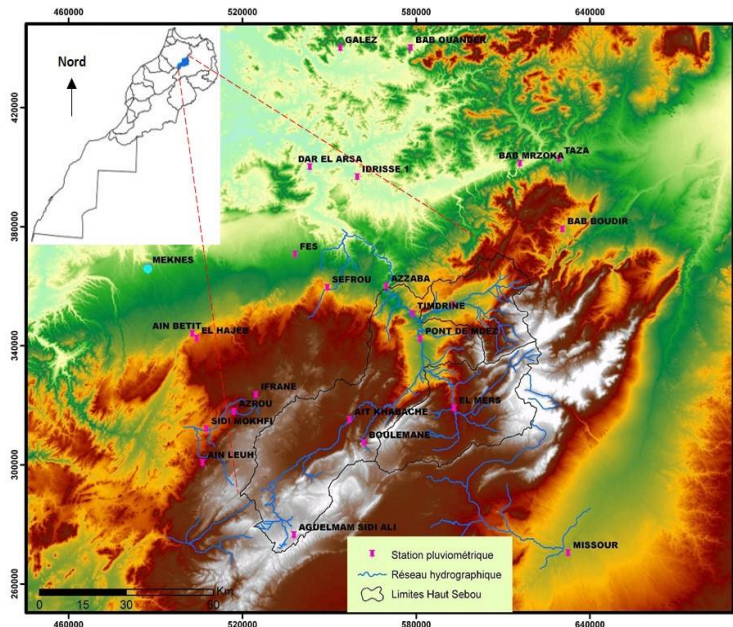


Figure 1 : Situation du domaine étudié

A l'échelle du Maroc, bien que le Moyen Atlas présente des conditions très favorables à l'agriculture, il n'a fait l'objet que tardivement, depuis une quarantaine d'années, d'une mise en valeur. Depuis, on note une intensification des pratiques agricoles dans les dépressions du Moyen Atlas basées sur l'irrigation. Ces nouvelles pratiques vont de pair avec une extension conséquente des périmètres irrigués. El-Bouhaliet *al.*, (2020) ont par exemple établi que dans la dépression du Guigou les surfaces de cultures irriguées sont passées

de 700 à 4000 ha entre 1985 et 2018. Or, dans le même temps on assiste dans cette région comme partout ailleurs sur la rive sud de la méditerranée (GIEC, 2020) à une diminution des précipitations (figure 2) ainsi qu'à une augmentation des températures (figure 3).

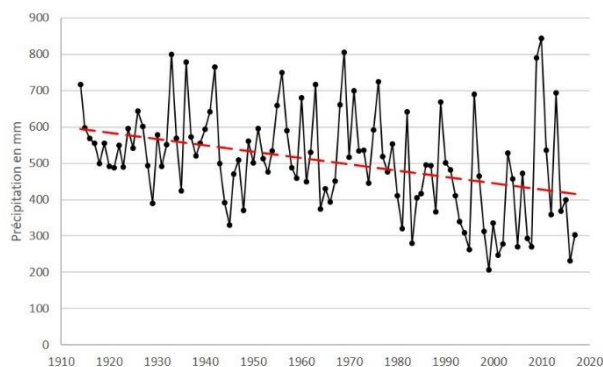


Figure 2 : Précipitations moyennes annuelles à la station de Fès

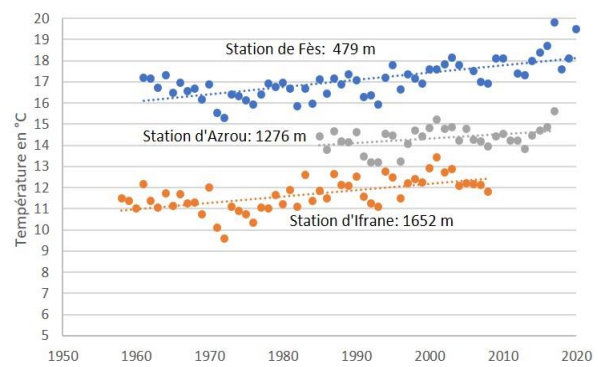


Figure 3 : Températures moyennes annuelles pour 3 stations du domaine d'étude

Notre étude est une évaluation du contexte bioclimatique dans lequel se développe cette agriculture intensive qui implique d'ores et déjà le recours massif aux nappes d'eau souterraine et à leur gestion en déséquilibre durable comme l'ont montré Qadem A. (2015).

## 2. Méthodologie

## 2.1. Le quotient pluviothermique d'Emberger

Parmi les nombreux indices permettant de caractériser l'ambiance climatique, nous avons retenu le quotient pluviothermique Q2 d'Emberger. Il offre trois avantages. Le premier est qu'il utilise pour son calcul des variables facilement accessibles : les températures moyennes mensuelles des extrêmes et la pluviométrie annuelle. Le deuxième est qu'Emberger a mis au point le quotient Q2 au Maroc ce qui par conséquent il colle plus particulièrement à sa réalité bien qu'il soit possible de le généraliser à l'ensemble du milieu méditerranéen. Enfin, le troisième avantage découle du second. Ce quotient a été calculé pour des stations météorologiques situées dans le Moyen Atlas et ses bordures à partir de données anciennes.

Nous avons utilisé la formulation du quotient d'Emberger qui utilise les degrés Celsius :

$$Q2 = \frac{2000 \cdot P}{(M+m+546.4)(M-m)} \text{ avec}$$

**P** : précipitation annuelle moyenne  
**M** : température en °C de la moyenne des maxima du mois le plus chaud (juillet ou août)  
**m** : température en °C de la moyenne des minima du mois le plus froid (janvier ou février)

Afin d'étudier l'évolution temporelle du quotient Q2 à l'échelle de tout le Moyen Atlas septentrional nous avons spatialisé les valeurs de température et de précipitation à une résolution de 1 km.

## 2.2. Les précipitations

La spatialisation des précipitations annuelles moyennes sur le Moyen Atlas septentrional pour la période 1974-2017 repose sur une méthodologie élaborée dans le cadre de la thèse de Qadem (2015). Il a d'abord été démontré que ce secteur s'inscrit dans un contexte pluviométrique homogène au sens du vecteur régional. Sur ce constat un modèle statistique, mettant en relation les précipitations observées à 20 stations pluviométriques avec des prédicteurs principaux de type topographiques (une centaine) et secondaire (NDVI) explique jusqu'à 90% de la variance. Les valeurs du modèle ont été validées par une confrontation des résultats avec ceux issus de méthodes d'interpolation telle que le krigeage, puis plus récemment nous avons montré qu'elles sont équivalentes à celles mesurées par les satellites GPM (El-Bouhaliet *al.*, 2020).

Pour cette étude nous avons complété la chronique qui s'arrêtait en 2010 avec des valeurs jusqu'en 2017.

## 2.3. Les températures

Classiquement la spatialisation des températures sur tout le domaine s'est appuyée sur des gradients thermiques. Une des difficultés rencontrées a été de valoriser en termes de gradient thermique les données fort disparates en notre possession (tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques des données thermiques mensuelles disponibles

Station	Aguelmam Sidi Ali	Ain Taoujdate	Azrou	Fès Saïs	Hajria	Ifrane	Immouzer Kandar	Mekrès	Moulay Yakoub	Sefrou	Taza
Altitude	2091 m	465 m	1276 m	579 m	190 m	1652 m	1351 m	576 m	312 m	822 m	459 m
Chronique	1985-2017	1985-2017	1985-2017	1962-2020	1985-2017	2005-2009 1961-1985	1930-1958	1985-2017	1985-2017	1923-1965	1985-2017
Type de données	T moy	T moy	T min/Tmax	T min/Tmax	T moy	T min/Tmax	T min/Tmax	T moy	T moy	T min/Tmax	T moy

Ces données couvrent néanmoins près d'un siècle et proviennent de stations réparties le long d'un gradient altitudinal de 2000 m.

Afin d'établir le mieux possible les gradients thermiques existants dans le Moyen Atlas et ses bordures, différentes valeurs ont été utilisées : moyennes annuelles, moyennes mensuelles ou

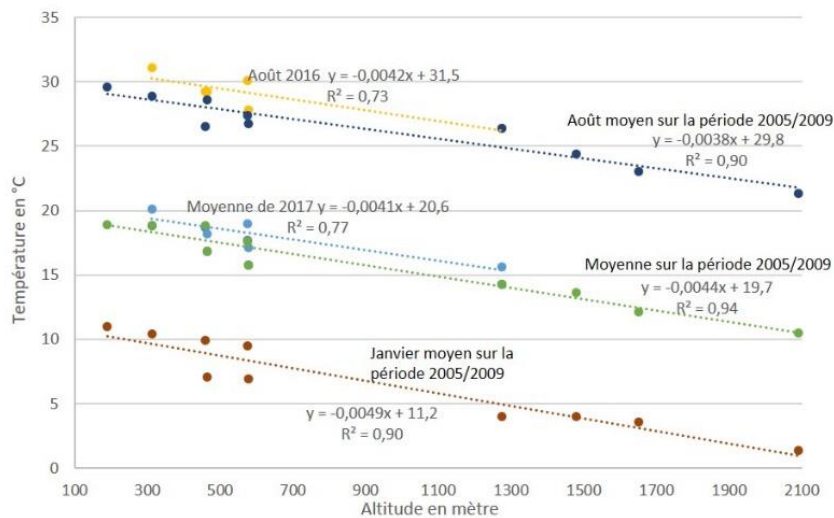


Figure 4 : Gradients de températures dans le Moyen Atlas

mois particuliers chauds ou froids (Figure 4). Bien que les valeurs des dix stations s'organisent bien selon l'altitude ( $R^2 > 0.90$  pour toutes les séries testées) ils simplifient la réalité. En effet Delannoy *et al.* (1979) ont montré que la valeur des gradients thermiques dans le Moyen Atlas sont variables à la journée en fonction des types de temps et qu'il existe une différence entre

la partie occidentale et orientale. Néanmoins si les gradients de l'ordre de  $0.4^\circ\text{C}/100\text{m}$  n'expriment pas la totalité de la complexité entre topographie/exposition et température ils doivent malgré refléter une certaine permanence qui prévaut à l'échelle mensuelle.

La spatialisation des températures sur l'ensemble du Moyen Atlas s'est faite en appliquant un gradient thermique de  $0.44^\circ\text{C}/100\text{m}$  à partir des valeurs enregistrées à la station de Fès.

### 3. Résultats

#### 3.1. A la station de Fès

Pour la station de Fès-Saïs depuis les années 1960 l'augmentation de la température moyenne est davantage le fait de l'augmentation des températures maximales. Elles augmentent de  $2^\circ\text{C}$  environ tandis que les  $T^\circ\text{C}$  minimales sont à peu près constantes. Cela entraîne une augmentation de l'amplitude thermique. La courbe des quotients Q2 annuels montrent un glissement de la station de Fès de l'étage semi-aride vers l'étage aride. Cette aridification du climat est le fait conjugué d'une augmentation des températures estivales et d'une baisse des précipitations. Le poids des températures dans l'aridification du climat n'est pas négligeable puisque les calculs pour des précipitations constantes (moyenne de la période 1962-2020)

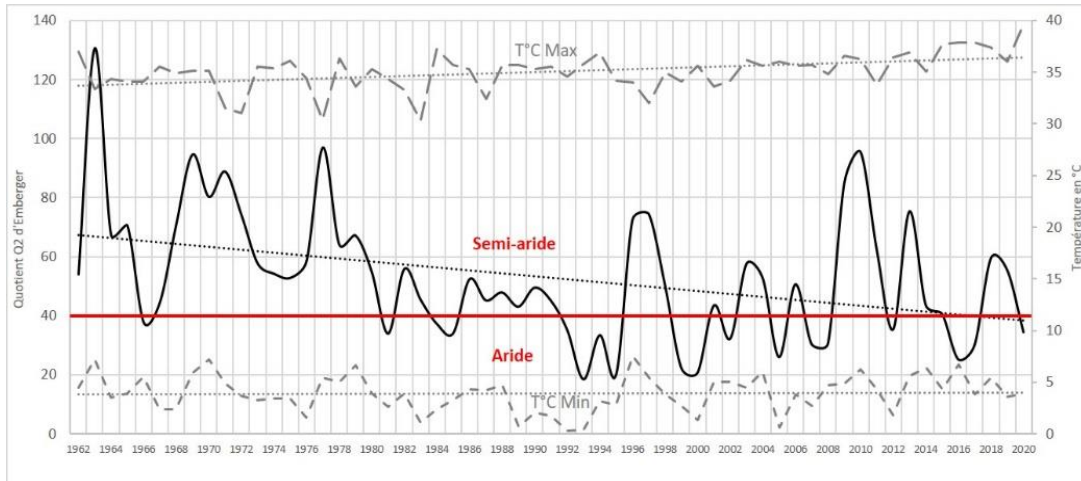


Figure 5 : Quotient Q2 et températures à la station de Fès

engendre une diminution de 7 points du quotient Q2. Ainsi la station de Fès qui se trouvait à une valeur de Q2 de 57 à partir des données des années 1960/70 (Daget, 1977) se retrouve à 46 sur la dernière décennie et tangente la zone aride.

### 3.2. A l'échelle du Moyen Atlas et des périmètres irrigués

L'évolution constatée à la station de Fès est finalement représentative de la tendance à l'échelle du Moyen Atlas où l'on constate une diminution globale des quotients Q2, notamment entre la période 1974/79 et la période 2012/17 (figure 6 et 7) avec respectivement comme valeur maximale sur le domaine étudié 166 et 114. Cette tendance vers l'aridité du domaine se retrouve également à la station d'Ifrane dont la valeur est placée à 110 pour la période 1960/70 (Daget, 1977) et qui est calculé à 90 par notre modèle pour la dernière décennie.

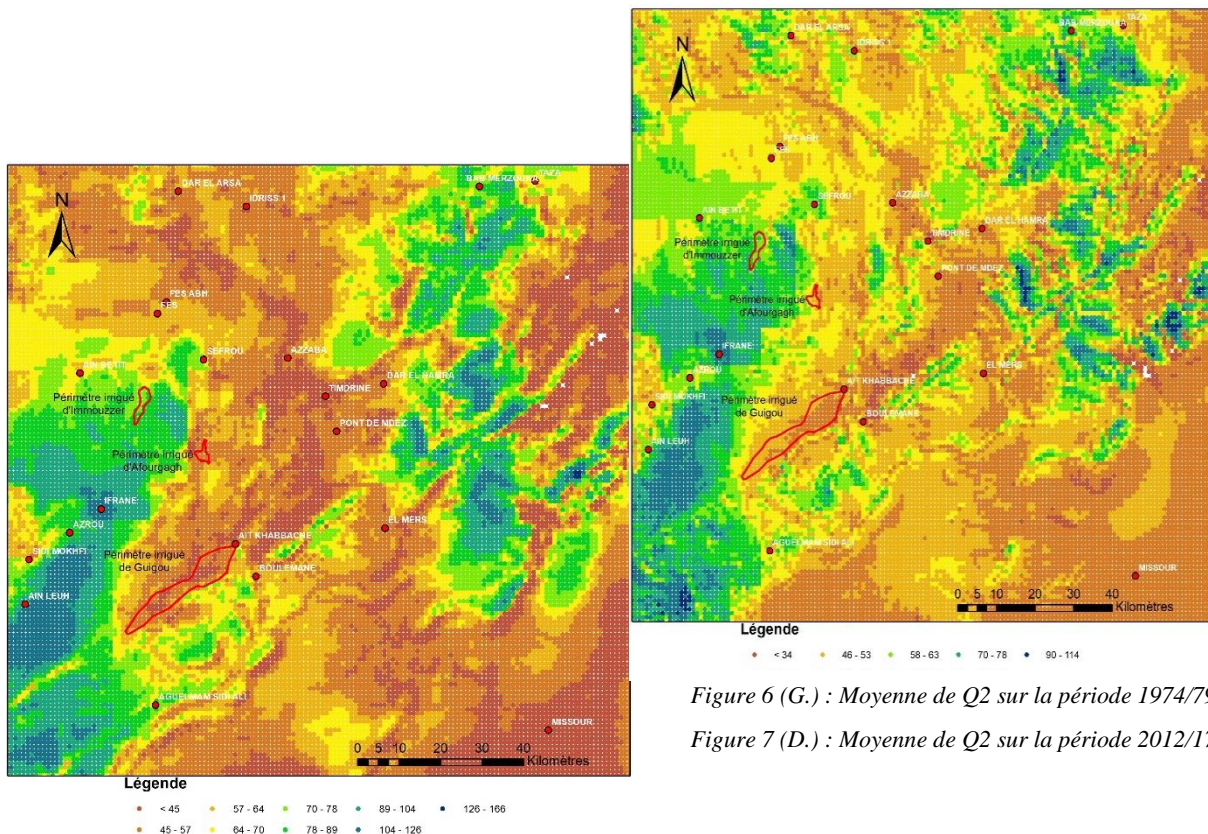


Figure 6 (G.) : Moyenne de Q2 sur la période 1974/79

Figure 7 (D.) : Moyenne de Q2 sur la période 2012/17

Le premier constat que l'on peut faire au niveau des trois principaux périmètres irrigués du Moyen Atlas est qu'ils ne se situent pas dans les secteurs les plus favorables du point de vue hydrique (figure 6 et 7). Ils sont caractérisés par des valeurs moyennes de Q2 calculées sur la période 1974/2017 de 66, 46 et 45, respectivement pour le périmètre irrigué d'Immouzzer, d'Afourgagh et de Guigou. Mais les valeurs pour la période d'avant 1980 sont bien plus élevées puisqu'elles sont respectivement de 79, 52 et 52. Toutefois depuis presque 50 ans, le contexte bioclimatique le plus défavorable a eu lieu dans la décennie 1980/1990 pour laquelle la valeur moyenne pour le périmètre du Guigou et d'Afourgagh a été de 34, valeur qui témoigne d'une ambiance bioclimatique aride.

## Conclusion

L'utilisation couplée des valeurs de précipitations et de températures a montré une aridification du Moyen Atlas depuis une quarantaine d'années. Située dans des secteurs peu propices du point de vue des conditions hydriques, cette agriculture a pu compter sur de l'eau exogène via les cours d'eau ou par une surexploitation des nappes. Pour autant les prévisions à l'échelle du bassin méditerranéen indiquent pour les décennies à venir une diminution continue des précipitations. Une des perspectives à notre travail pourrait être de traduire ces prévisions à large échelle au domaine moyen-atlasique et ses bordures afin d'en mesurer les conséquences probables sur l'agriculture.

## Bibliographie

- Daget Ph., 1977 : Le bioclimat méditerranéen : analyse des formes climatiques par le système d'Emberger. *Vegetatio* Vol. 34, 2 pp. 87-103.
- Delannoy H., Lecompte M., Romane F., 1979. Géographie des températures quotidiennes dans le Moyen-Atlas et ses bordures : Analyse multivariée et situations atmosphériques. *L'Espace géographique* Vol. 8, No. 1, pp. 25-41.
- El-Bouhali A., Lebaut S., Amyay M., El OuazaniEch-Chahdi K., Gille E., et Cotonnec A.2020. L'impact combiné des déficits pluviométriques cumulés et de l'extension des cultures irriguées sur les ressources en eau dans la dépression de Guigou (Moyen Atlas - Maroc). *Actes du colloque international sur « changement climatique, potentialités territoriales et justice environnementale »* organisé le 16 et 17 décembre 2020 à Fès, Maroc.
- El Bouhali A., Lebaut S., Qadem A., Amyay M., Gille E., Cotonnec A., 2020 : Evaluation des produits TRMM et GPM à partir d'observations aux stations et de résultats d'un modèle de quantification spatiale des précipitations sur le Moyen-Atlas, Maroc. *33ème colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie*, 259 – 264.
- GIEC, 2019. Réchauffement planétaire de 1,5°C (p. 110) [Rapport spécial du GIEC].
- Qadem A., 2015. Quantification, modélisation et gestion de la ressource en eau dans le bassin versant du Haut Sebou (Maroc). Thèse de l'université de Lorraine, 333 p.



# LA VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DE LA POLLUTION PARTICULAIRE A SFAX : CAS DES CHANTIERS DE LA ROCADE DU KM 4

Euchi H.<sup>1</sup>, Dahech S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université de Sfax, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Laboratoire SYFACTE, (euchihamdi@hotmail.fr)

<sup>2</sup>Université de Paris, Paris Diderot, UMR PRODIG (salem.dahech@gmail.com)

**Résumé :** Le présent travail s'intéresse à montrer la variation spatio-temporelle des particules fines et ultrafines (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub>) à proximité des deux chantiers de la rocade du km 4, retenus comme exemple, par deux types temps (temps calme et clair, temps perturbé et pluvieux) à partir des campagnes de mesures semi-itinérantes, réalisées à différents moments de la journée, par un capteur portable mesurant simultanément les PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub>. La pollution particulaire, due principalement aux poussières fines soulevées par le trafic routier près des deux chantiers, le plus intense est enregistré par temps calme et clair alors qu'elle s'amenuise considérablement par temps pluvieux et pluvieux. Nous recommandons d'utiliser des machines adaptées tout particulièrement à l'élimination des poussières fines près des chantiers qui sont plus efficaces que l'arrosage par tuyau et économisent mieux l'eau.

**Mots clés :** Mesures semi-itinérantes, PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub>, chantiers, types de temps.

**Abstract :** the space-temporal variation of the particular pollution in sfax: case of the worksites of the km 4 raingrod. The present work is interested in showing the spatio-temporal variation of fine and ultrafine particles (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>) near the two construction sites of the km 4 bypass, selected as an example, by two types of weather (calm and clear weather, disturbed and rainy weather) from semi-iterative measurement campaigns, carried out at different times of the day, by a portable sensor measuring simultaneously PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>. Particulate pollution, mainly due to fine dust raised by road traffic near the two sites, is most intense when the weather is calm and clear, whereas it is considerably reduced in rainy and wet weather. We recommend the use of machines especially adapted to the removal of fine dust near the construction sites, which are more efficient than hoses spraying and save water.

**Keywords:** mobile survey, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>, construction sites, weather types.

## Introduction

La pollution atmosphérique, et en particulier celle particulaire (particules fines et ultrafines) est une vraie menace qui touche sérieusement la santé humaine (OMS, 2020 ; Euchi et Dahech, 2019 ; Turner, et al., 2019; Traboulsi, 2017). En effet, les particules fines et ultrafines (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub>), faciles à inhaler par la bouche et le nez, peuvent atteindre les bronchioles et alvéoles pulmonaires et accèdent facilement par la suite au système sanguin. Le cancer du poumon et la pneumonie aiguë, des maladies mortelles, sont les principales conséquences sanitaires dues, en partie, à l'exposition aux PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub>. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé, (OMS), la pollution de l'air, notamment primaire et particulaire, provoque environ 4,2 millions de décès prématurés dans le monde. Les sources d'émissions de ces particules, notablement morbides, sont variées (fixe, mobile, naturelle). Elles s'accumulent avec de très fortes concentrations principalement par temps radiatif. Ce temps est fréquent en Méditerranée quand domine une situation de marais barométrique en surface et un haut géopotential en altitude, comme le cas à Sfax, en Tunisie centrale (Henia, 1998 ; Dahech, 2007). Dans cette ville, les nuisances olfactives et sonores provoquées en partie par le trafic routier principalement au niveau des grands croisements routiers situés dans un rayon de 4 km du centre-ville (allant de la Médina à la rocade du km 4) aggravent notablement la vulnérabilité de la population face aux maladies (Dahech et Rekik, 2012). Lancé en 2018 par le Ministère de l'Équipement de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire de Tunisie (MEHAT) pour un délai d'exécution de 30 mois, le projet de la dénivellation de huit carrefours sur la rocade km 4 dans le gouvernorat de Sfax a pour objectif de fluidifier la circulation routière très congestionnée et garantir une meilleure sécurité aux usagers de la route (<http://www.mehat.gov.tn/>). Néanmoins, les impacts environnementaux de ce projet sont variés, et en particulier la pollution particulaire provoquée essentiellement par les poussières fines soulevées suite aux travaux de construction (terrassement), aux passages des véhicules et/ou encore chassées par le vent.

L'objectif de la présente étude est d'étudier la variation spatiale de la pollution particulaire, enregistrée près des chantiers de dénivellement sur la rocade du km 4, à partir de mesures semi-itinérantes réalisées par des capteurs portables de types PCE-MPC-10<sup>8</sup>.

## 1. Données et méthodes

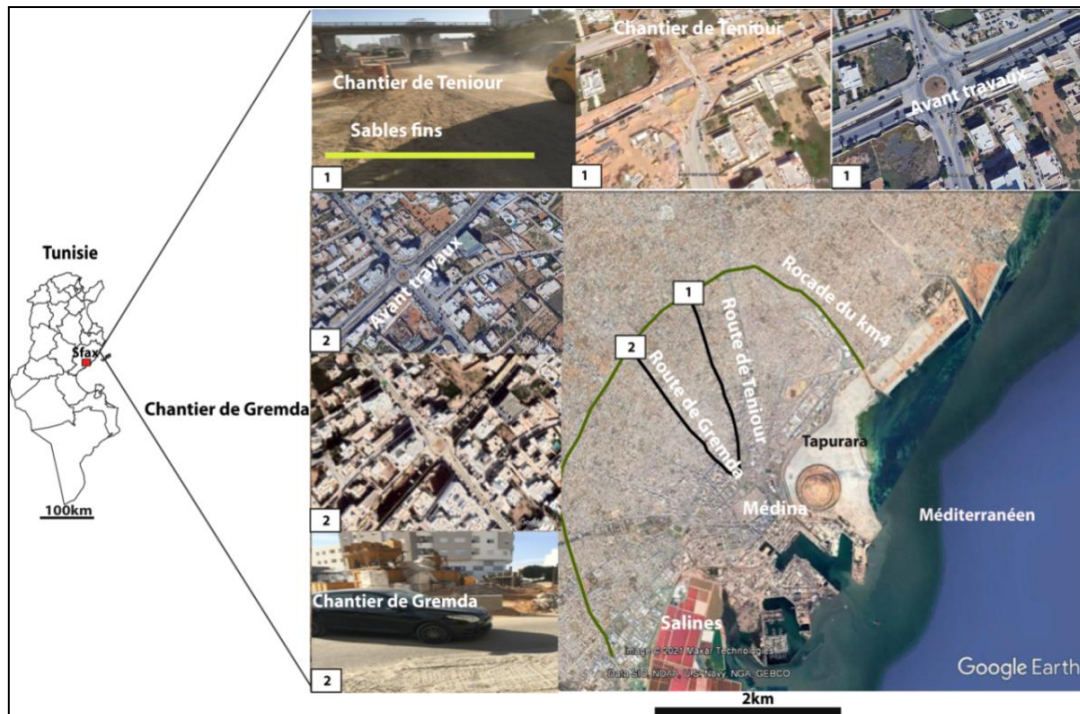
Les mesures ont été réalisées à proximité des deux chantiers, situés au niveau des croisements : rocade km4/route Tenouir et rocade km4/ route de Gremda (situés à 4 km au nord du centre-ville et enregistrant environ 40 000 véhicules par jour). Dans les sites choisis, les dépôts poussiéreux, liés à certains travaux de construction (terrassement), sont abondants. De plus, en raison des travaux de réhabilitation des routes, certains tronçons à proximité des deux chantiers ont été débitumés (fig.1).

Pour mieux quantifier la pollution particulaire, dans les deux sites retenus, et quantifier par la suite le degré de l'exposition de la population riveraine à ce risque, nous avons mené six campagnes de mesures par deux types de temps : un temps clair et calme et un temps perturbé et pluvieux (fig.2). En fait, nous avons commencé par réaliser deux campagnes de mesures par temps clair et calme près des deux chantiers. D'abord, les mesures portables de PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> ont été exécutées près de chantier de Tenouir, le 11 novembre 2020 entre 12h et 14 h TU (ciel clair, vent moyen = 3m/s, Tmoy=18°C), puis ont été opérées près de chantier de Gremda, situé à 1,2 km à l'ouest du premier site de mesure, le 13 novembre 2020 entre 12h et 14h TU (ciel clair, vent moyen= 2,75 m/s, Tmoy = 18°C (fig.2). Nous avons choisi de réaliser ces mesures aux moments des heures de pointe du trafic routier pour connaître l'intensité maximale de la pollution particulaire, provoquée principalement par les poussières fines dégagées près des deux chantiers et pouvoir qualifier par la suite le degré de l'exposition des habitants de proximité à ce risque.

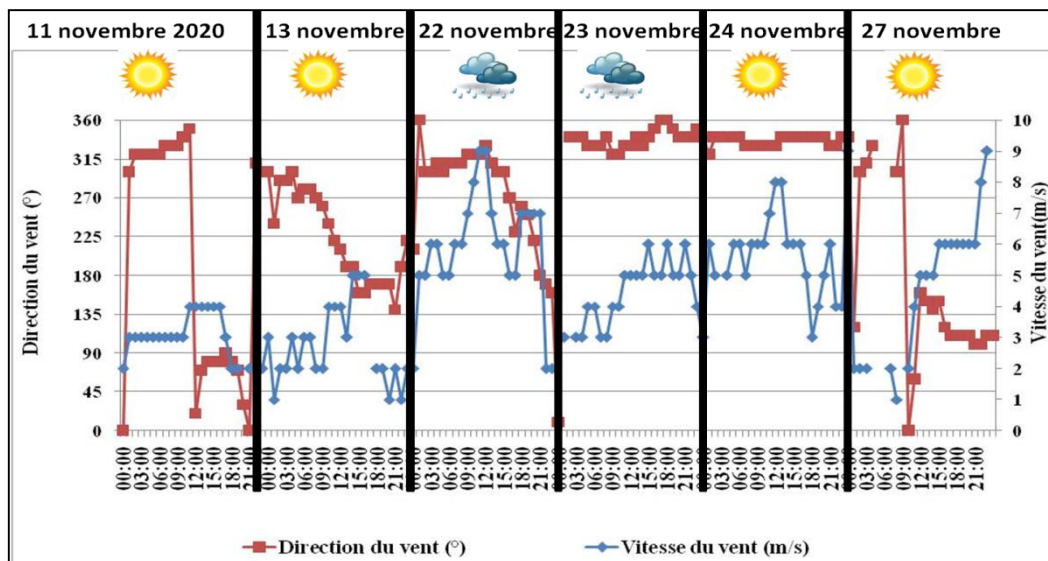
Dans ce travail, le protocole des mesures semi-itinérantes a été fixé de façon à déterminer la variation spatiale de la pollution particulaire en fonction de l'éloignement des deux chantiers. En fait, dans chacun des deux chantiers de construction retenus, les prises des mesures de PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> ont été effectuées dans 9 points en s'éloignant progressivement 3 m, 50 m et 100 m par rapport au nœud central des carrefours (les sites des chantiers). Dans chacune des points de mesures fixés, les capteurs ont été placés sur les trottoirs à 1,5 m de la surface, au niveau de l'appareil respiratoire, durant cinq minutes (750 prises de mesures près des deux chantiers sur la période retenue, soit une prise de mesure toutes les 30 secondes). Les poussières, soulevées suite au passage des véhicules ou chassées par le vent, peuvent diminuer durant et après la pluie. Pour ce faire, nous avons réalisé des campagnes de mesures au cours des pluies du 22 au 23 novembre 2020 (un total de 14 mm sur les deux jours). Ces mesures portables ont été tout d'abord effectuées près du chantier de Tenouir entre 11h et 13h TU puis ont été accomplies près du chantier de Gremda le 23 novembre 2020 entre 14h et 16h en nous basant sur le même protocole de mesure décrit précédemment (fig.2). Pour connaître au mieux les effets des pluies sur les poussières fines, dégagées à proximité des deux chantiers, et pouvoir comparer par la suite les résultats des campagnes de mesures effectuées en fonction des deux types de temps : temps clair et calme et temps perturbé et pluvieux, les campagnes de mesures ont été refaites le 24 novembre 2020 à proximité du chantier (J+1) et le 27 novembre 2020 près du chantier de Gremda en optant pour le même protocole de mesure évidemment.

---

<sup>8</sup> Il s'agit des analyseurs qui mesurent simultanément les concentrations des particules fines et ultrafines (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>) à un pas de temps de 30 secondes et qui ont été obtenues suite à une collaboration avec le labex dynamite et l'Université de Paris Diderot qui trouvent ici nos vifs remerciements.



**Figure .1.**Localisation des campagnes de mesures de la pollution de l'air (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>) réalisées près des deux chantiers de Teniour et de Gremda situés sur la rocade du km 4 de l'agglomération de Sfax (fond, image Google Earth, 2020).

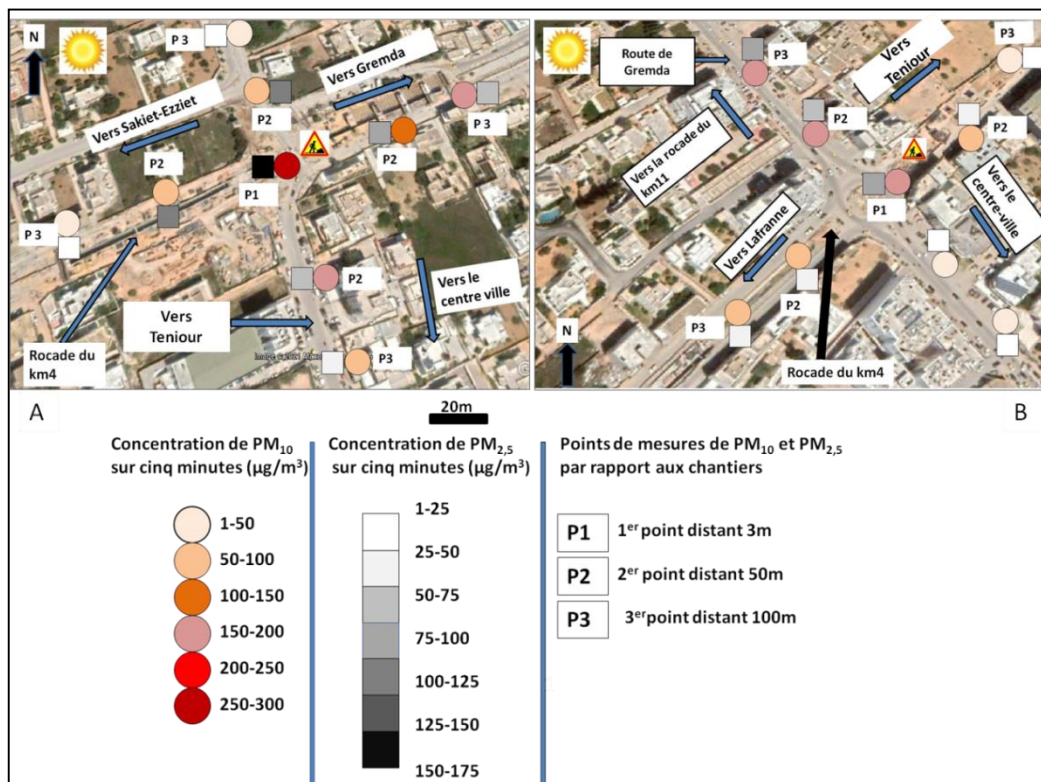


**Figure.2.** Vitesses et direction du vent durant les jours des campagnes de mesures de PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>(INM,2020)

## 2. Campagnes de mesures réalisées par temps clair et calme

Les mesures portables réalisées par temps calme et clair montrent que la pollution aux PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>, provoquée principalement par les poussières fines soulevées suite aux passages des véhicules sur les routes débitumées et les chaussées sableuses, varie principalement en fonction de la distance par rapport aux chantiers. En fait, à 3m du chantier de Teniour (P1), où la pollution particulaire atteint son maximum, les niveaux de PM<sub>10</sub> varient entre 250 µg/m<sup>3</sup> et 300 µg/m<sup>3</sup> et entre 150 µg/m<sup>3</sup> et 175 µg/m<sup>3</sup> pour les PM<sub>2,5</sub> : ces valeurs calculées sur un laps de temps court ne peuvent pas être comparées à la norme de OMS fixée sur 24h à 50 et 25µg/m<sup>3</sup> respectivement pour les PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> (fig.3 A). Ces concentrations élevées sont enregistrées

par un vent d'ENE qui souffle à des vitesses modérées et uniformes (4 m/s) ; il s'agit de la brise de mer (fig.2). Par rapport au chantier de Teniour, l'intensité de la pollution particulaire mesurée auprès du chantier de Gremda est moins importante : les concentrations des  $PM_{10}$ , calculées sur cinq minutes, ont varié de 150 à 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et sont entre 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et 125  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $PM_{2,5}$  (fig.3 B). La circulation routière plus intense (environ 1500 véhicules par heure à Teniour contre 950 véhicules par heure à Gremda) et les dépôts sableux plus abondants sont les deux principaux paramètres qui expliquent l'intensité plus élevée des  $PM_{10}$  et  $PM_{2,5}$  enregistrées dans le chantier de Teniour. En fait, le 13 novembre 2020 entre 12 h et 14 h TU, le vent souffle du S au SSE à des vitesses modérées qui varient entre 3 m/s et 5 m/s (à l'aéroport donc plus faible à 2 m/s) (fig.2). En revanche, en s'éloignant 100 m des deux chantiers (les P3-fig.3), les niveaux des  $PM_{10}$  et  $PM_{2,5}$  baissent considérablement pour atteindre des valeurs variant de 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  à 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $PM_{10}$  et de 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  à 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $PM_{2,5}$  (fig.3 A et B). Il est à noter que, les niveaux de  $PM_{10}$  et  $PM_{2,5}$  les plus importants sont enregistrés dans un rayon de 50 m par rapport aux chantiers sur la rocade du km 4 (fig.3 A et B). En fait, d'après les campagnes de mesures portables réalisées par temps calme et clair, la distance par rapport au chantier, l'état de la route (revêtue ou pas), la quantité des poussières fines déposées, leurs granulométries, le nombre des véhicules passant sur les routes débitumées et de leurs vitesses de circulation, sont les principaux paramètres qui distinguent la variation spatiale des concentrations de  $PM_{10}$  d'un chantier à l'autre et à l'échelle du même chantier.

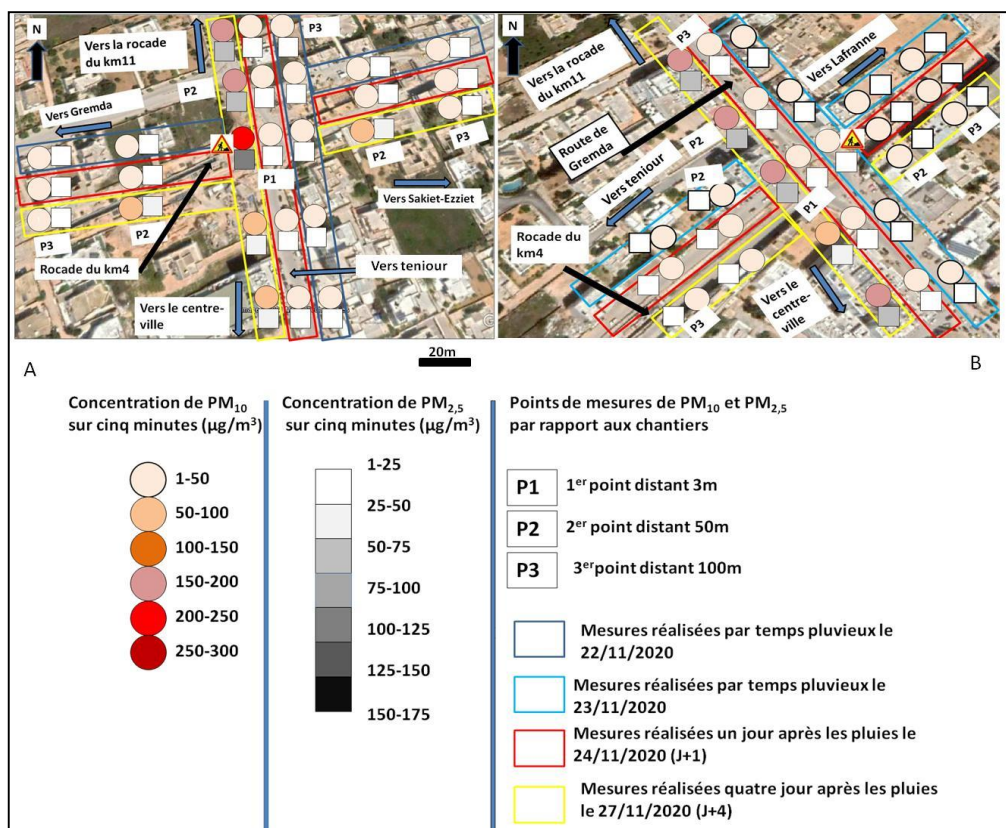


**Figure.3.** Les concentrations moyennes des  $PM_{10}$  et  $PM_{2,5}$  à un pas de temps de cinq minutes près du chantier de Teniour (A) et celui de Gremda (B)

### 3. Campagnes de mesures de $PM_{10}$ et $PM_{2,5}$ réalisées par temps pluvieux et perturbé du 22 au 23 novembre 2020

Les campagnes des mesures semi-itinérantes réalisées par temps pluvieux du 22 au 23 novembre 2020 indiquent que le rythme de la pollution particulaire baisse notablement et devient alors constant aux différents points de mesures (P1, P2, P3) dans les deux chantiers suite à l'infiltration et au ruissellement des eaux pluviales sur les dépôts poussiéreux et les

chaussées sableuses. Une grande part des surfaces couvertes de poussières est détrempée, les voies sont couvertes de boue. Par ce type de temps, dans les deux chantiers, les niveaux des particules fines et ultrafines ne dépassent pas  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les particules fines et sont inférieures à  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les particules ultrafines, à un pas de temps de cinq minutes (fig. 4 A et B). Les mêmes faits sont constatés un jour après les pluies, le 24 novembre 2020, malgré un temps radiatif avec un vent modéré du NO à 5 m/s, suite à la mise en place d'un anticyclone en surface (1020 hPa) et un haut géopotential en altitude comme en témoigne les réanalyses météorologiques disponibles sur le site (<https://www.wetterzentrale.de/>). En effet, les dépôts poussiéreux aux alentours des chantiers et sur les trottoirs sont encore détrempés (fig.4 A et B). La variabilité spatiale des concentrations en particules devient faible. Cependant, les campagnes de mesures réalisées trois jours plus tard, le 27/11/2020, entre 11h et 13h TU dans le premier site et entre 14 et 16h TU dans le deuxième site, indiquent que la pollution particulaire s'est intensifiée, donnant lieu à un rythme, constant notamment dans le chantier de Gremda. Dans le chantier de Teniour, le rythme de la pollution particulaire mesuré dans tous les points (P1, P2, P3 ; fig.4 A et B) est le même que celui enregistré par le temps calme et clair, décrit plus haut (fig4 A). Le 27 novembre 2020, entre 14h et 12 h TU, le vent souffle du SE à des vitesses uniformes de 5 m/s. En fait, d'après nos observations sur le terrain, sous les effets conjugués des ruissellements et des actions mécaniques de véhicules, les sables les plus fins, déposés sur les chaussées et près des chantiers, ont été arrachés puis transportés et déposés, enfin, aux alentours des sites et sur les voies revêtues pour s'envoler en tourbillon suite aux effets des véhicules.



**Figure.4.** Résultats des campagnes de mesures de PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> réalisées durant et après les pluies du 22 au 23 novembre dans les chantiers de Teniour (A) et de Gremda (B).

## Conclusion

Les six campagnes de mesures réalisées auprès des deux chantiers de la rocade du km 4 dévoilent que la pollution particulaire provoquée par les poussières fines soulevées suite aux

passages des véhicules sur les routes débitumés et les chaussées sableuses, varient principalement en fonction de type de temps. A 3m des chantiers, le temps calme et clair favorise de très fortes concentrations de pollution particulaire allant de 250  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  à 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $\text{PM}_{10}$  et variant de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  à 175  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $\text{PM}_{2,5}$ . les niveaux les plus élevés de la pollution aux  $\text{PM}_{10}$  et  $\text{PM}_{2,5}$  ont été enregistrés dans un rayon de 50 mètres par rapport aux sites des chantiers. En particulier, dans le chantier de Teniour, la pollution particulaire mesurée est plus intense que celle enregistrée dans le chantier de Gremda. En fait, la quantité de dépôts poussiéreux et l'intensité de la circulation routière expliquent le comportement peu hétérogène du rythme de la pollution particulaire. Cependant, après et pendant la pluie concentrations de  $\text{PM}_{10}$  et  $\text{PM}_{2,5}$  baissent considérablement. De plus, d'après des observations sur le terrain et de quelques mesures portables de  $\text{PM}_{10}$  et  $\text{PM}_{2,5}$  réalisées près du chantier de Teniour après quelques minutes de l'arrosage par tuyau, pratiqué une fois par jour le matin, l'intensité de la pollution particulaire devient faible durant deux heures de suite . A l'instar des pays développés en Amérique et en Europe, la Nautilus V12sm et la lance L3, disponibles sur le site (<https://www.emicontrols.com/fr/reduction-poussieres/champs-application/chantiers/>) pour exemple, sont des machines destinées plus particulièrement à la réduction de poussières fines qui peuvent être utilisées comme solution au lieu de l'arrosage par tuyau qui gaspille énormément l'eau et n'est pas efficace que temporairement.

Dans nos travaux ultérieurs, les campagnes de mesures de  $\text{PM}_{10}$  et  $\text{PM}_{2,5}$  réalisées ici de manière ponctuelle dans le temps et dans l'espace seront exécutées près de tous les chantiers (soit huit chantiers) en installant les capteurs portables pendant plusieurs jours de suite. Ainsi, nous souhaitons étudier la granulométrie des poussières fines déposées auprès des chantiers par méthode de laser. En complément, la vulnérabilité de la population face à ce risque sera qualifiée.

## **Bibliographie**

- Traboulsi H., Guerrina N., Lu M., et al., 2017. Inhaled Pollutants : The Molecular Scene behind Respiratory and Systemic Diseases Associated with Ultrafine Particulate Matter. *Int. J. Mol. Sci.* 18, 243 p.
- Turner M.C., Jerrett M., Pope III C.A., et al., 2016. Long-term ozone exposure and mortality in a large prospective study. *Am J Respir Crit Care Med*, 42 pages.
- Hénia L., 1998. Les situations anticycloniques en Tunisie. Publications de l'Association Internationale de Climatologie, Vol 11, 1998. 166-174 p.
- Dahech S., 2007. Le vent à Sfax (Tunisie), impacts sur le climat et la pollution atmosphérique. Thèse de Doctorat de l'Université Paris VII, 309p.
- Euhi H et Dahech S., 2019. Temps, pollution aux particules fines ( $\text{PM}_{10}$ ) et morbidité respiratoire à Sfax (Tunisie). *Pollution atmosphérique*, (239).
- Dahech S., et Rekiq F., 2012. Trafic routier et pollution sonore à Sfax (Tunisie méridionale) : étude pluridisciplinaire. *Pollution atmosphérique*, N° 215, 2012, 259-274.

## **Webographie**

- OMS : <http://www.who.int/fr>: consulté le 15 janvier 2021
- MEHAT : <http://www.mehat.gov.tn/>: consulté le 8 avril 2021
- <https://www.emicontrols.com/fr/reduction-poussieres/champs-application/chantiers/> : consulté le 8 avril 2021

# VARIABILITE DE LA SECHERESSE METEOROLOGIQUE SUR LA STEPPEALGERIENNE

Faci Mohammed \*, Bouarfa Saïd, Oubadi Miloud et Djoudi Warda et Farhi Yassine

*Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA) – Biskra, Algérie, fm\_alg@yahoo.fr*

**Résumé :** *La steppe algérienne, d'environ 20 millions d'hectares, renferme des terres improductives, des parcours, des forêts, des maquis et des surfaces cultivées. Sur cette superficie étendue, ce pratique l'élevage extensif des ovins, englobant plus de 20 millions de têtes.*

*A travers cinq indices de sécheresse météorologique (l'indice de pluviosité, l'indice de l'écart à la moyenne, l'indice du nombre d'écart type, l'analyse fréquentielle et l'indice de précipitations normalisé), nous avons analysé les données de précipitations de 16 stations météorologiques répartis sur toute la steppe.*

*Les premiers résultats des analyses des données de la période 1986-2015, montrent une variabilité interannuelle entre les années humides et les années sèches, où les séquences sèches sont devenues plus longues. Cette variation instable, accompagnée de longues années secs successives, pourra influencer négativement sur la productivité des parcours et sur le cheptel ovin.*

**Mots clés:** *Algérie, steppe, sécheresse météorologique, hausse.*

**Summary :** *The Algerian steppe, covering about 20 million hectares, contains unproductive land, rangelands, forests, scrubland and cultivated areas. On this vast area, extensive sheep farming is practised, involving more than 20 million head.*

*Through five meteorological dryness indices (Rainfall Index, Mean Deviation Index, Number Of Standard Deviations Index, Frequency Analysis and Standardized Precipitation Index), we analysed rainfall data from 16 meteorological stations spread across the steppe.*

*The first results of the analyses of the data from the period 1986-2015, show an interannual variability between wet and dry years; the dry sequences have become longer. This unstable variation, accompanied by long successive dry years, could negatively influence rangeland productivity and the sheep population.*

**Keywords :** *Algeria, steppe, meteorological drought, rise.*

## Introduction

Les scientifiques ont caractérisés plusieurs types de sécheresse, tel que la sécheresse hydrologique, la sécheresse hydrogéologique, la sécheresse agricole, la sécheresse édaphique, la sécheresse socio-économique et la sécheresse météorologique (Alouni et Louati, 1999 ; Dhaou, 2003 ; Dhaou et al., 2009).

Ces types de sécheresse peuvent ne pas se manifester simultanément, mais la sécheresse météorologique reste l'événement moteur des autres (Dhaou et al., 2009). Du point de vue météorologique « la sécheresse est une longue période extrêmement sèche » pendant laquelle le manque d'eau perturbe gravement l'équilibre hydrologique d'une région (Huschke, 1959). En outre, l'extension spatiale et l'apparition progressive et essentiellement imprévisible de la sécheresse provoquent des effets négatifs visibles sur la population, la récolte, le cheptel, les pâturages, les forêts et les ressources en eaux (Dhaou et al., 2009).

La sécheresse associée à d'autres aléas climatiques tels que la canicule et les vagues de chaleur, joue toujours un rôle perturbateur et ses impacts sur les secteurs économiques sont souvent immédiats.

Sur le plan physique, la steppe algérienne est située entre deux chaînes de montagnes : l'Atlas tellien au Nord et l'Atlas saharien au Sud, s'étendant sur une surface de terres d'environ 20 millions d'hectares (soit 8,4 % de la surface de l'Algérie), sur une longueur de 1000 kilomètres et une largeur variable, de 300 kilomètres à l'Ouest et 150 kilomètres à l'Est. L'altitude va de 400 à 1200 mètres (Nedjraoui et Bédrani, 2008 ; Khaldi, 2014).

Les régions steppiques arbitrent la grande part du cheptel ovin et des terres produisent une quantité importante des céréales (Nedjraoui et Bédrani, 2008 ; Khaldi, 2014).

Les informations tirées des indices de la sécheresse sont utiles pour planifier et concevoir des applications (évaluations des risques, systèmes d’alerte précoce, outils d’aide à la décision en vue d’atténuer la menace dans les zones touchées). De plus, divers indices peuvent servir à valider les résultats obtenus par modélisation, par assimilation ou par télédétection (Safar-Zitoun, 2018). Pour cette contribution, nous avons opté pour l’indice standardisé de précipitations (Standardized Precipitation Index - SPI), permettant de mesurer la sécheresse météorologique.

La caractérisation de l’aléa sécheresse au niveau de la région steppique est une étape importante et obligatoire pour la création d’un SIG, permettant de générer des cartes de risque et de vulnérabilité qui permettent au décideurs de prendre les décisions d’aménagement et de planification en prenant en compte le risque Sécheresse, surtout dans une région où cet aléa peut conditionner tous les efforts de développement fournis par les pouvoirs publics.

## 1. Données et Méthodes

### 1.1. Données

Nous avons pu rassembler les données des précipitations de 17 stations du réseau de l’Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) (Tableau 1), où nous avons traité les données de la période 1986-2015.

Tableau 1. Liste des stations.

Stations	Série de données disponibles
<b>Ain Sefra</b>	1986-2015
<b>Tiaret</b>	1966-2015
<b>El-Bayadh</b>	1986-2015
<b>Djelfa</b>	1986-2015
<b>Ain El-Hadjar</b>	1966-2015
<b>Ain Kherrane</b>	1966-2015
<b>Sougueur</b>	1966-2015
<b>Mecheria</b>	1966-2015
<b>Ain El-Beida</b>	1967-2015
<b>Bir Kasdali</b>	1967-2015
<b>Mdaourouche</b>	1967-2015
<b>Medrissa</b>	1967-2015
<b>Batna</b>	1968-2015
<b>Ksob</b>	1966-2015
<b>Ras El-Ma</b>	1970-2015
<b>Tébessa</b>	1970-2015
<b>Frenda</b>	1966-2015

### 1.2. Indice standardisé de précipitations

Les indices de sécheresse sont le plus souvent des représentations numériques de l’intensité, que l’on calcule à partir de valeurs climatiques ou hydrométéorologiques. Ils mesurent l’état qualitatif d’une sécheresse à un emplacement donné pour une période donnée (Safar-Zitoun, 2018).



L'Organisation météorologique mondiale (OMM) a sollicitée l'utilisation de l'indice standardisé de précipitations, on espérant que cet indice servira les pays pour développer ou renforcer leurs capacités en ce qui concerne le suivi des situations de sécheresse et l'alerte précoce à la sécheresse. Les principaux avantages du SPI sont les suivants :

- Il requiert seulement les précipitations mensuelles,
- Il peut être comparé pour des régions aux climats différents,
- La normalisation de l'indice permet de déterminer la rareté d'une sécheresse.

Il est calculé comme suit :

$$SPI = (P_i - P_m) / s$$

$P_i$  : Pluies de l'année  $i$  ;

$P_m$  : Pluies moyennes de la série sur l'échelle temporelle considérée ;

$s$  : Ecart-type de la série sur l'échelle temporelle considérée.

L'indice est négatif pour les sécheresses et positif pour les conditions humides.

McKee et al. (1993), ont utilisé le système de classification présenté dans le Tableau 2, pour définir l'intensité des épisodes de sécheresse en fonction de la valeur de l'indice.

Tableau 2. Valeurs et significations de l'SPI.

Valeur SPI	Signification
<b>2,0 et plus</b>	Extrêmement humide
<b>de 1,5 à 1,99</b>	Très humide
<b>de 1,0 à 1,49</b>	Modérément humide
<b>de -0,99 à 0,99</b>	Proche de la normale
<b>de -1,0 à -1,49</b>	Modérément sec
<b>de -1,5 à -1,99</b>	Très sec
<b>-2 et moins</b>	Extrêmement sec

## 2. Résultats

### 2.1. Résultats de l'SPI

Les résultats de l'analyse par l'SPI (Tableau 3), des données de trente (30) années, nous a permis de constater :

- la variation interannuelle des cumuls de précipitations annuels.
- que la période étudiée est proche de la normale ; le nombre d'années proches de la normale varie d'une station à une autre, il est de 53 % dans la station de Sougueur allant jusqu'à 87 % à Frenda.
- que le nombre d'années humides a connu une tendance à la hausse durant les dix (10) dernières années de la série des précipitations.
- que les extrêmes sont enregistrés au niveau de l'Ouest du pays ; à Ain El-Hadjar, Frenda et Sougueur pour les plus sèches et à Ain Kherrmane, Sougueur et Tiaret pour les plus humides.

Tableau 3. Résultats de l'analyse par l'SPI.

Stations	Ain Sefra	Tiaret	El-Bayadh	Djelfa	Ain El-Hadjar	Ain Khernane	Sougueur	Mecheria	Ain El-Beida	Bir Kasdali	Mdaourouche	Medrissa	Batna	Ksob	Ras El-Ma	Tébessa	Frenda
Extrêmement humide		1				1	1										
Très humide	1	3	2	1	2	1	1	2	3	1			1				
Modérément humide	3	1	2	3	2	5	7	3	3	2	2	2	3	3	5	4	1
Proche de la normale	21	22	22	23	19	19	16	20	20	25	27	28	23	19	24	21	26
Modérément sec	4	3	3	2	4	2	2	4	4	1	1		2	5	1	4	2
Très sec	1		1	1	1	2	2	1		1			1	3		1	
Extrêmement sec					2		1										1

## 2.2. Cartographie des précipitations

Nous avons calculé le cumul moyen des trente années (1986-2015), pour chacune des dix-sept stations de mesure de l'ANRH.

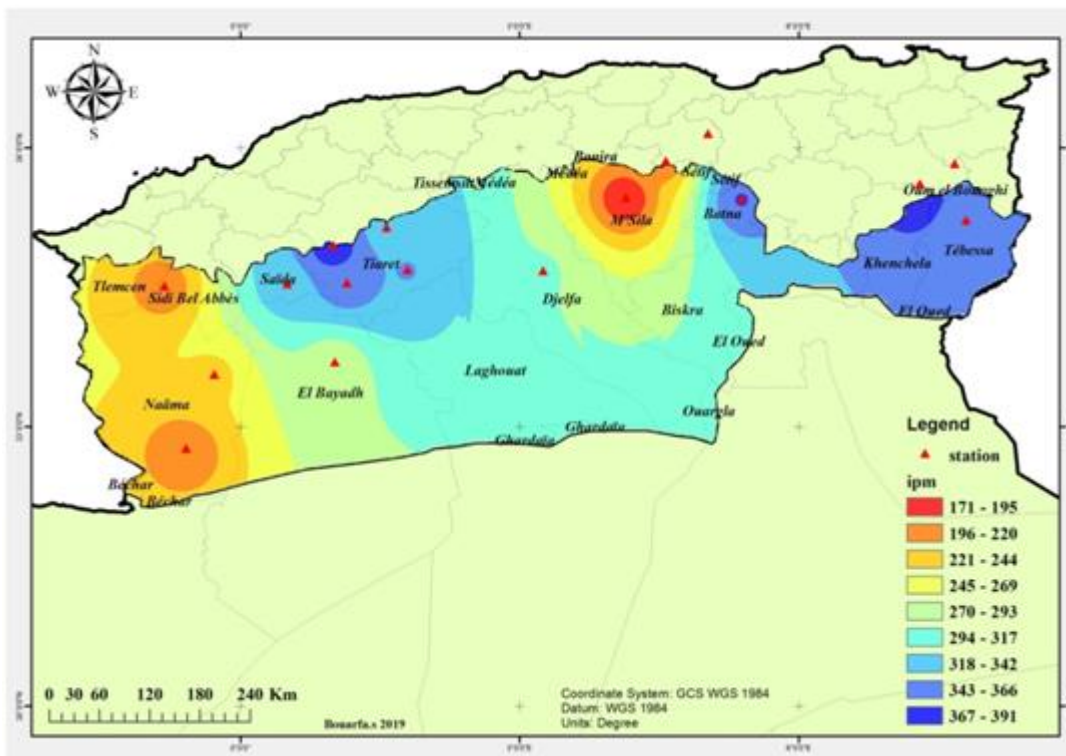


Figure 1. Carte des précipitations moyennes sur la steppe algérienne.

La représentation des cumuls moyens de précipitations sur la carte, en utilisant le logiciel « ArcGIS 10.x », nous a permis de ressortir que l'Est et le centre de la steppe enregistrent des quantités plus importantes de précipitations, par rapport au côté Ouest (Figure 1).

### 2.3. Cartographie de la sécheresse

Suite à l'analyse des données par l'indice standardisé de précipitations, nous avons passé à la spatialisation des données sur la carte, où on s'est limité à la région steppique. Pour ceci, nous avons opté le logiciel « ArcGIS 10.x », qui nous a permis d'élaborer les cartes de distribution des valeurs moyennes de l'SPI.

D'après la Figure 2, l'apparition de la sécheresse météorologique est plus remarquable sur le centre et l'Ouest de la steppe algérienne.

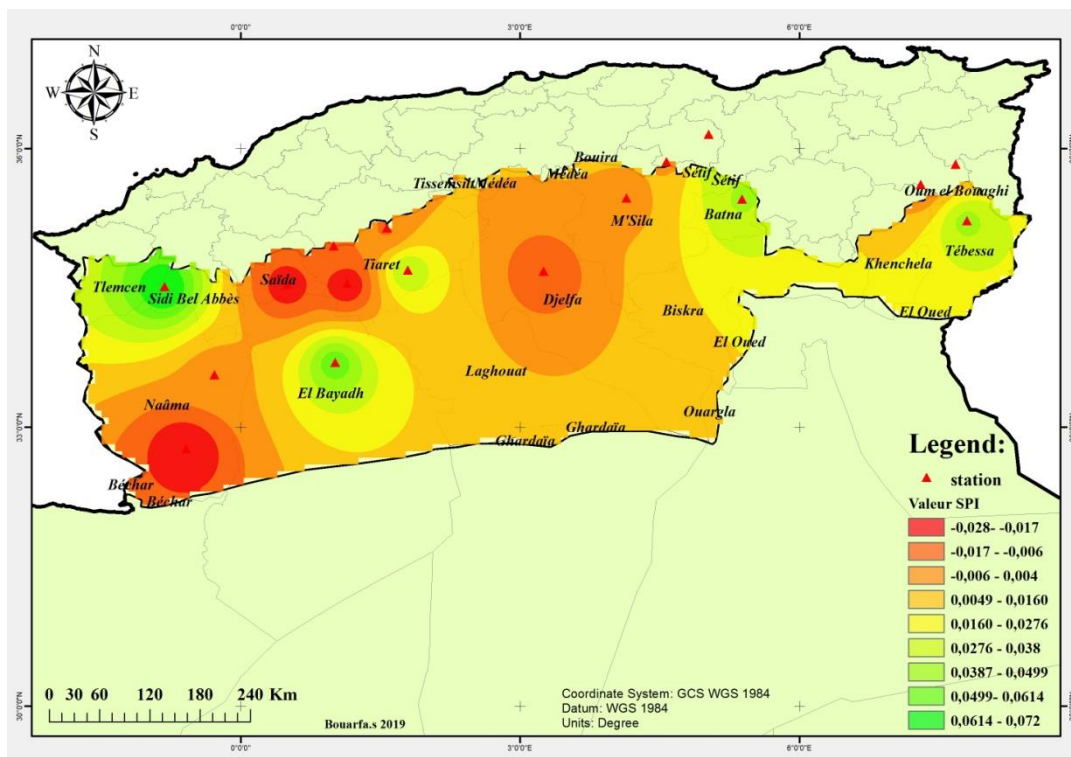


Figure 2. Carte des valeurs moyennes de l'SPI sur la steppe algérienne.

### Conclusions

En général, les données de précipitations de la période 1986-2015, analysées par l'indice standardisé de précipitations, ressortent que la pluviosité sur les dix-sept (17) stations météorologiques est proche de la normale enregistrée durant les trente (30) années.

Néanmoins, la steppe algérienne est marquée par une grande variabilité mensuelle et interannuelle des précipitations ; cette variation a engendrée l'enregistrement répétitif de séquences de sécheresse.

Malgré la tendance vers la hausse des totaux annuels de la pluviométrie, ceci ne veut pas dire que c'est une tendance à la hausse du nombre d'années humides, car nous avons enregistré des précipitations diluviennes sur un laps de temps très court ; alors que le long de l'année est caractérisé par une sécheresse persistante.

La partie Ouest de la steppe est caractérisée par la sécheresse, où nous avons enregistré les extrêmes secs et humides ; par contre, la région de l'Est est plus humide.

## Bibliographie

- Alouini A., & Bergaoui M., 2001. Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique ; cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. *Sécheresse*, **4** (12), 205-213.
- Dhaou H., 2003. *Impact de la sécheresse sur les oliviers dans les zones arides tunisiennes ; Cas du bassin versant d'Oum Zessar (Médenine)*. Rapport. Institut National Agronomique de Tunis, Tunis, Tunisie, 203p.
- Dhaou H., Ouerchefani D., Taamallah H., Donald G., & Ouessar M., 2009. Drought Impact on the Olive-Trees in the Tunisian Jeffara. *Journal of Arid Land Studies*, **19**, 331-334.
- Huschke R.E., 1959. *Glossary of meteorology*. American Meteorological Society, Boston, USA, 638p.
- Khaldi A., 2014. La gestion non-durable de la steppe algérienne. *Vertigo, Regards/Terrain*, mis en ligne le 10 septembre 2014, consulté le 05 avril 2021. URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/15152> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.15152>
- McKee T.B., Doesken N.J., & Kleist J., 1993. The relationship of drought frequency and duration of time scales. In: *Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim CA, USA, 179-186.
- Nedjraoui D., & Bédrani S., 2008. La désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte. *Vertigo*, **8** (1), mis en ligne le 01 avril 2008, consulté le 05 avril 2021. URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/5375> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.5375>
- Safar-Zitoun M., 2018. *Plan national sécheresse Algérie*. Rapport. Alger, Algérie, 86p.

# LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET LE RISQUE D'INONDATION DANS LA PALINE DU GHARB

Fathi M., Saloui A. et Karrouk M.S

*Fathi M. Laboratoire des Changements Environnementaux et Aménagement Territorial (LCEAT), Université Hassan II, Casablanca, Maroc (fathimohamed1990@gmail.com)*

*Saloui A, climatologie hydrologie, université Hassan II Mohammedia Casablanca FLSH de Mohammedia, (saloui.abdelmalik@gmail.com)*

*Karrouk M.S. Laboratoire des Changements Environnementaux et Aménagement Territorial (LCEAT), Université Hassan II, Casablanca, Maroc (ClimDev.Maroc@gmail.com)*

## **Résumé**

*Le changement climatique étant un problème mondial, nécessite une mobilisation active et soutenue de la communauté internationale, Toutes les données météorologiques disponibles indiquent un réchauffement significatif durant les dernières décennies avec une augmentation importante de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes du type sécheresses et inondations.*

*Les projections climatiques établies par la Direction de la Météorologie Nationale prévoient une augmentation des températures moyennes estivales de l'ordre de 2°C à 6°C et unerégression de 20% en moyenne des précipitations d'ici la fin du siècle.*

*Le changement climatique est considéré comme l'une des plus graves qui menace la durabilitédu développement, avec des effets néfastes potentiels sur la santé humaine, la sécurité alimentaire, l'activité économique, les ressources en eau et les autres ressources naturelles.*

*La plaine du Gharb serait la plus affectée par ce changement avec une hausse des températures supérieures à la moyenne et menacerait plusieurs inondations.*

*Mots- clés : Les changements climatiques-inondation-sécheresse-les risques*

**Abstract** : *As climate change is a global problem that requires an active and sustained mobilization of the international community, all-available meteorological data indicate significant warming during the last decades with a significant increase in the frequency and intensity of extreme events such as droughts. and floods.*

*Climate projections established by the Department of National Meteorology predict an increase in average summer temperatures of around 2 ° C to 6 ° C and an average decline of 20% in precipitation by the end of the century.*

*Climate change is considered one of the most serious threats to the sustainability of development, with potential adverse effects on human health, food security, economic activity, water resources and other natural resources.*

*The Gharb plain would be the most affected by this change with an increase in temperatures above average and threatened several floods.*

**Keywords** : *Climate change-flood-drought- risks*

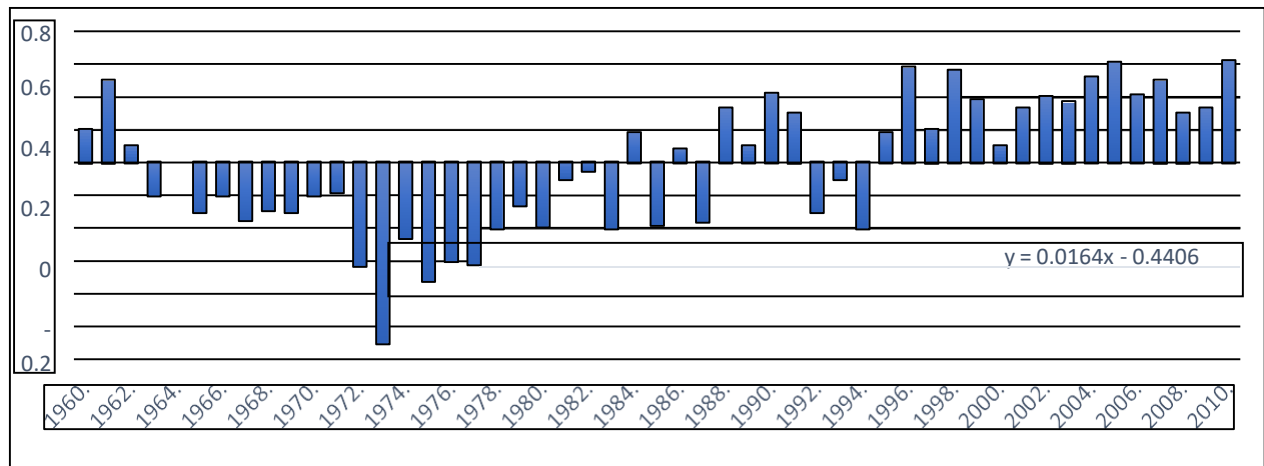
## Introduction

Le réchauffement planétaire que nous vivons depuis un bon moment, nous met fréquemment devant des surprises et nous apprenons jour après jour de nouveaux événements météo climatiques inhabituels. (Karrouk S, M, 2012)

À l'échelle nationale, il n'est pas possible de dire que le changement climatique observé dans la plaine du Gharb soit directement dû aux activités anthropiques et naturelles régionales. Il s'agit d'une menace qui vient de l'extérieur puisque l'ensemble du pays subit le changement climatique général qui est d'ordre planétaire.

Le Maroc se trouve ,de point de vue météorologique, au niveau de la branche descendante de la circulation de Hadley et au sud de la trajectoire des perturbations du nord. (Driouech F, 2017) plusieurs catastrophes naturelles sont survenues au cours des dernières décennies. Certains désastres peuvent avoir un caractère récurrent comme les inondations qui touchaient plusieurs villes côtières. (Nafaa R ,2013) et Quelques secteurs du territoire sont alors soumis à des aléas et des risques affectant la population et l'économie.

Figure 1 : L'évolution de l'écart de température moyenne nationale entre 1960 et 2010



Source : la Direction de la Météorologie Nationale de Casablanca.

La plaine du Gharb a connu des vagues de chaleurs en 1995 et en 2001, 2006, 2015, 2016 et elles ont été équivalentes en bordure de l'océan atlantique (Kenitra) et à l'intérieur de la région (sidi Kacem et sidi Slimane). En ce qui concerne les inondations, la région a connu plusieurs pics lors des années 1963, 1996, 2002 et 2009, 2010.

L'inondation représente un danger pour l'économie et la population des régions. (IRES, 2014) Ses conséquences sont de plus aggravées par la pollution des cours d'eau de la région du Gharb. En cas de débordement d'eau, des matières dangereuses peuvent s'infiltrer dans les terres et les territoires riverains.

### Zone d'étude et base de données

**Zone d'étude :** La plaine constitue la plus vaste unité de la région. Elle se caractérise par une topographie basse (35 et 40 m d'altitude) et plate favorisant l'exploitation des terres pour les activités agricoles. Les bordures de cette plaine, principalement au Sud et à l'Est, présentent des reliefs peu élevés, d'une altitude maximale de 100 m. (Mhuae-irhuae, dirasset intl, 2010).

**Base de données :** La base de données mise à Notre disposition provient de la Direction Générale de la Météorologie Nationale de Casablanca. Elle se compose la pluviométrie et la

température entre les périodes de 1960 à 2015 pour les stations suivantes: Kenitra, sidi slimane.

## Méthodes

L'approche méthodologique vise à aborder les conséquences du changement climatique et le risque d'inondation dans la plaine du Gharb, cette approche adoptée dans le cadre de cette recherche est axée sur trois points: la collecte des données, leur traitement et l'analyse des résultats.

## Analyse des résultats

### Aspects climatologiques générales

Le climat de la région du Gharb est du type méditerranéen. Deux grandes saisons sont déterminées par le déplacement en hiver d'une masse d'air polaire et la montée en été d'une masse d'air tropical, le tout étant relié au déplacement de la zone anticyclonique des Açores. La plaine du Gharb est bien marquée par l'influence océanique, elle appartient à l'étage subhumide à hiver tempéré sur la frange côtière et à l'étage semi-aride à l'intérieure de la plaine et à l'Est.

Un gradient décroissant de la côte (Ouest) vers l'intérieur de la plaine (Est) est observé:

Zones côtières (Ouest): 550 mm, zones centrales: 442 mm (Dar Kadari), zones intérieures (EST): 441 mm (Sidi Slimane). (Benseddik B, 2012)

Les variabilités inter intra-annuelles des précipitations sont très importantes. Environ 80 % des pluies sont concentrées entre Novembre et Avril. La période sèche se situe généralement entre Juin et Septembre (4 mois). (Benseddik B, 2012).

### Le climat futur en plaine du Gharb à l'horizon 2075

A l'échelle d'une région marocaine, il n'est pas possible de dire que le réchauffement climatique observé dans la plaine du Gharb soit directement dû aux activités anthropiques et naturelles régionales. Il s'agit d'une menace qui vient de l'extérieur puisque l'ensemble du pays subit le changement climatique général qui est d'ordre planétaire.

Le tableau 1 (figure: 2) soumis les valeurs prévues des températures et précipitations moyennes annuelles, aux horizons 2045 et 2075, par rapport à la période de référence 1961-1990:

Nous constatons que Le réchauffement est similaire pour les deux scénarios précités à l'horizon 2045, se situant à 1,7 °C .Par contre l'écart se creuserait entre les deux scénarios à l'horizon 2075: 2,6 et 3,1 °C respectivement pour B2 et A1B.

Pour les précipitations, en raison de grandes incertitudes qui planent sur leurs projections, nous ne retenons pas les différences prévues, généralement faibles, entre les deux scénarios. (EL JIHAD et al, 2014).

Figure 2 : les valeurs projetées, aux horizons 2045 et 2075, des températures et des précipitations moyennes annuelles par rapport à la période de référence 1961-1990.

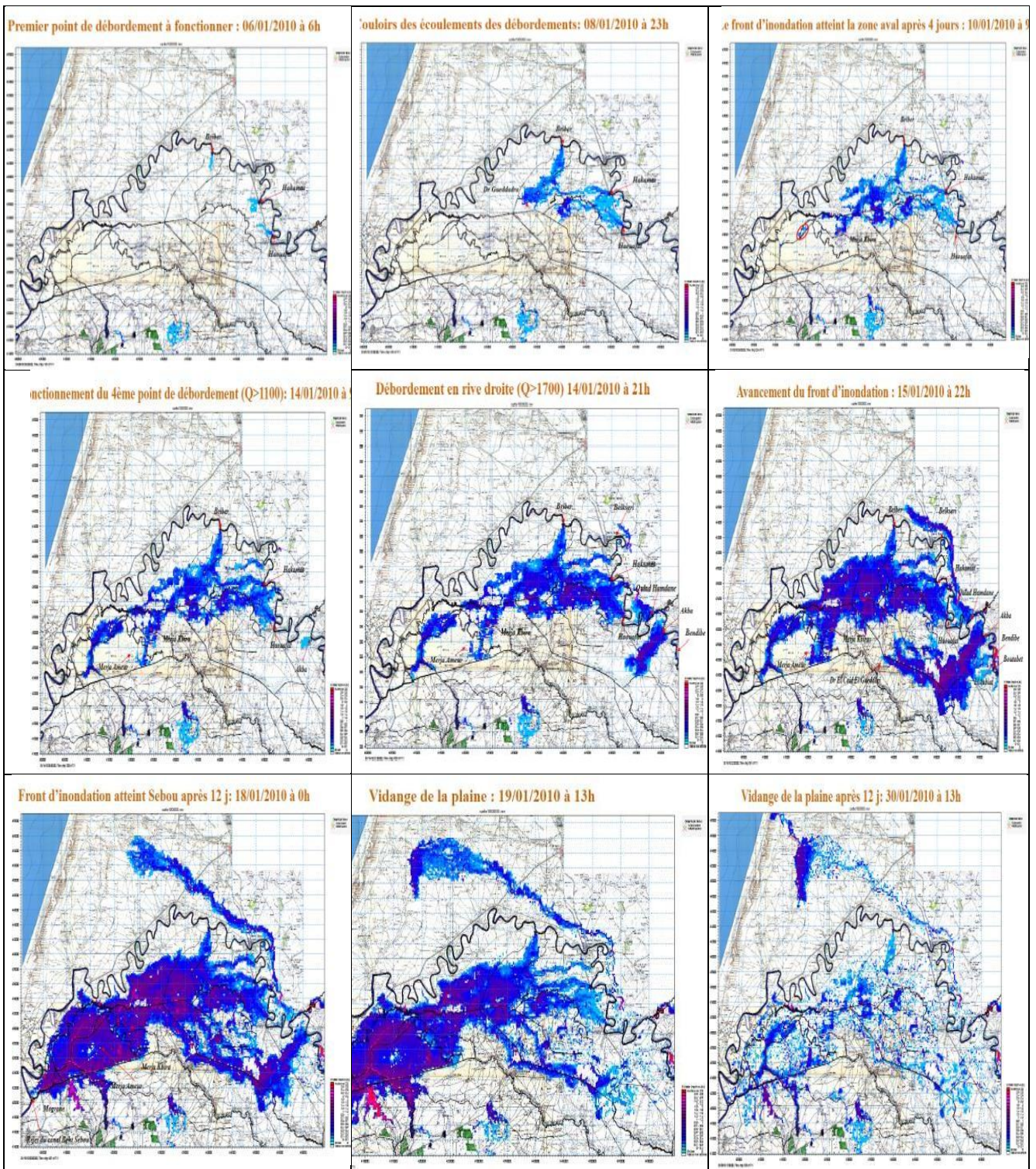
Période ou horizon	1961-1990	Horizon 2045		Horizon 2075	
		A1B*	B2**	A1B*	B2**
Températures (°C)	19,3	21,0	21,0	22,4	21,9
Précipitations(mm)	720	623	634	567	589

Source : Rur@lités, numéro 4 - année 2014 Laboratoire RURALITES, MSHS, Université de Poitiers

En ce qui concerne les inondations, la plaine a connu trois pics lors des années 1996, 2002, 2009. Enfin, la région a traversé une période de sécheresse entre 1999 et 2004, surtout en zone

continentale. L'année 2010 était également une année où la région a connu un pic des précipitations engendrant des inondations sur la majorité des territoires de la région. (Figure 3)

Figure 3 : cartes des inondations de la plaine du Gharb 2010



Source: CRTS



## **Conclusion :**

La plaine du Gharb est caractérisée par, une variabilité climatique relativement élevée et un climat fortement influencé par l'océanité, d'altitude et l'exposition des versants. Comme indiqué avant, la région du Gharb a subi des pluies exceptionnelles en 2010 ayant causé des dommages préjudiciables à la campagne agricole.

Au total, Le nombre de ronds-points touchés: 169, Nombre de personnes hébergées et prises en charge: 23511 personnes, Zone inondée et affectée par l'eau: 135000 ha et les pertes agricoles estimées à 1,3 milliard de dirhams.

## **Références bibliographiques**

- Karrouk M, S, 2012, les changements climatiques et ses impacts au Maroc: Complexité du nouveau climat et défis de la prédiction du cycle de l'eau, *Environnement et Changement Climatique au Maroc*, – Diagnostic et Perspectives – 2012, Konrad-Adenauer-Stiftung e.V., Bureau au Maroc, p 41.
- Driouech F, 2017, changement climatique et sécheresses récurrentes avec focus sur le cas du maroc, *Actes de la session plénière solennelle*, Rabat, 21 - 23 février 2017, p 88.
- IRES, 2014, *Anticipation Et Gestion Des Risques D'évènements Climatique Extrêmes Et De Catastrophes Naturelles au Maroc*, p 34,35 Et 36.
- Mhuae-irhuae, dirasset intl, 2010 : SRAT de la région Gharb-chararda-bni hssen, phase 1 : diagnostic territorial stratégique, p 41.
- Benseddik B, 2012, *synthèse du système d'aide à la décision (SAD) pour les ressources en eaux du Gharb*, 2012, Master spécialisé en sciences de l'ingénieur, Université Ibn Tofail, Faculté des Sciences, p 2 et 3.
- EL JIHAD M, PEYRUSAUBES D EL BOUZIDI A, 2014, Sécheresses saisonnières et changement Climatique dans le Gharb., *Ruralité*, numéro4 année 2014 laboratoire ruralités MSHS Université de Poitiers, p 23.

# SUIVI DE LA TENDANCE ÉVOLUTIVE DES PRÉCIPITATIONS ET SES IMPACTS SUR LA PRODUCTION D'EAU SUPERFICIELLE AU MAROC

Fattah H.<sup>1</sup>, Karrouk M-S.<sup>2</sup> et Saloui A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'études et de recherches « Sociétés, Territoires, Histoire et Patrimoine (STHP) » – Centre Homme, Espace et Sociétés (HES) – Dpt. Géographie – FLSH Rabat – Université Mohammed V (Fattah.hind@gmail.com)

<sup>2</sup>Laboratoire des Changements Environnementaux et Aménagement Territoriale (LCEAT) – Dpt. Géographie – FLSH Ben M'sik – Université Hassan II Casablanca (M.Karrouk@FLBenMsik.ma)

<sup>3</sup>Laboratoire de la Dynamique des Espaces et des Sociétés (LADES) – Dpt. Géographie – FLSH Mohammedia – Université Hassan II Casablanca (Saloui.abdelmalik@gmail.com)

**Résumé :** Cette présente étude, aborde la thématique des changements actuels enregistrés au niveau des régimes pluviométriques au Maroc. Depuis l'année 2006, les précipitations semblent augmentées significativement dans plusieurs localités du pays, ce qui a occasionné de nombreuses inondations. Cette situation reste tout à fait différente de celle constatée précédemment, notamment pendant les années 80, 90 et au début des années 2000, au niveau desquelles les cumuls de pluies ont largement diminué et la sécheresse – liée principalement à un réchauffement climatique plus concentré – a atteint un niveau record. Devant cette augmentation frappante des pluies, on s'est posé les questions problématiques suivantes : **la sécheresse a-t-elle cédé la place au retour des précipitations au Maroc ? et comment cela a-t-il affecté l'évolution de la production d'eau superficielle ?** Pour répondre à cette problématique, nous avons fixé plusieurs objectifs, dont le plus important est d'analyser la tendance évolutive des précipitations pendant une période de 36 ans, allant de 1980 à 2015, tout en cherchant les impacts directs de ces changements sur l'évolution de la production d'eau superficielle au Maroc. Pour garantir de meilleurs résultats, on s'est servi de méthodes d'analyse climatologique dans le cadre d'une approche analytique bien détaillée.

**Mots-Clés :** Tendances ; Précipitations ; Impacts ; Production d'eau superficielle

**Summary:** *Monitoring of evolutionary trend of precipitations and its impacts on surface water production in Morocco.* This present study, discusses the thematic of the current changes recorded in rainfall regimes in Morocco. Since 2006, rainfall seems increased significantly in several localities of the country which caused many floods. This situation remains completely different from that observed previously, especially, during the 80s, 90s and at the beginning of the 2000s, when the cumulative rainfall decreased largely and drought – linked to a more concentrated global warming – has reached high record. Faced to this striking increase of rains, we asked ourselves the following problematic questions: **has the drought given way to the return of rainfall in Morocco? And how has this affected the evolution of surface water production?** To answer this problematic, several objectives have been defined, with, the most important, is to analyze the evolutionary trend of precipitations for a period of 36 years, from 1980 to 2015, while looking for the direct impacts of these changes on the evolution of surface water production in Morocco. To ensure better results, climatological analysis methods were used as part of a well-detailed analytical approach.

**Keywords:** Trend; Precipitations; Impacts; Surface water production

## Introduction

Les précipitations représentent l'un des variables les plus étudiés en climatologie. Cet élément indicateur des climats de la terre a été traité à plusieurs reprises par les scientifiques de diverses spécialités, notamment les climatologues qui ont étudié librement son évolution à travers le temps. Le GIEC a mentionné dans son 6<sup>ème</sup> document technique paru en 2008 sur le changement climatique et l'eau que les précipitations annuelles ont augmenté entre 1901 et 2005 en Amérique du Nord et en Eurasie, tandis qu'elles ont diminué en Afrique de l'Ouest, au Sahel et à l'Asie Australe, mais à des degrés très variables.

Au Maroc, la question climatique a été massivement traitée. Les réflexions scientifiques sur ce sujet ont démontré que les sécheresses – phénomènes répétitifs et prévisibles – étaient, une évidence pendant le XX<sup>e</sup> siècle, puisqu'elles sont corrélées énergétiquement à la circulation atmosphérique et sa dynamique. Le nombre d'années sèches était relativement frappant par rapport à celles humides. Tout a commencé pendant les années 80, 90 et au début des années 2000, où les cumuls de pluies ont largement diminué et la sécheresse – liée principalement à un réchauffement climatique plus concentré – a atteint un niveau record. En revanche, depuis l'année 2006, les précipitations semblent augmentées significativement dans plusieurs localités du pays, ce qui a occasionné de nombreuses inondations, notamment celles des années 2008 à

Tanger, 2009 – 2010 au Gharb et récemment celles du mois de janvier 2021 à Casablanca ou même celles du mois de Mars de la même année à Tétouan. Une situation qui avait, bien évidemment ses effets notables sur les réserves et le taux de remplissage des barrages.

Devant cette augmentation frappante des pluies, on s'est posé les questions problématiques suivantes : **la sécheresse a-t-elle cédé la place au retour des précipitations au Maroc ? et comment cela a-t-il affecté l'évolution de la production d'eau superficielle ?** Pour répondre à cette problématique, nous avons fixé plusieurs objectifs, dont le plus important est d'analyser la tendance évolutive des précipitations pendant une période de 36 ans, allant de 1980 à 2015, tout en cherchant les impacts directs de ces changements sur l'évolution de la production d'eau superficielle au Maroc, tant qu'au niveau des réserves ou même les taux de remplissage des principaux barrages.

## 1. Données et méthodes

Ce travail a été établi, en se basant sur quatre séries de précipitations mensuelles, couvrant une période de 36 ans, allant de 1980 à 2015, et ce pour quatre stations météorologiques : *Tanger-Aéroport, Casablanca, Fès-Saïs* et *Errachidia*. Notre choix s'est porté sur ces stations pour deux raisons essentielles : tout d'abord, elles sont marquées par un taux élevé de fiabilité, puisqu'elles proviennent de la Direction Générale de la Météorologie(Casablanca), deuxièmement, chacune de ces stations appartient à une zone climatique bien définie, ce qui nous a permis d'élargir les résultats obtenus sur l'ensemble du territoire Marocain. La base de données a été complétée par des mesures provenant de la Direction Générale de l'eau (Rabat), démontrant la situation mensuelle de quatre barrages : *Ibn Battouta, Al Massira, El Kenseaet Hassan Adakhil*, relevant des bassins hydrauliques du *Loukkos, d'Oum Er Rabiaa, de Sebou et de Ziz Guir Ghris*, et ce pour une période dépassant 30 ans.

Pour garantir de meilleurs résultats, on s'est servi de méthodes d'analyse climatologique dans le cadre d'une approche analytique bien détaillée. Les différentes phases de ce travail sont les suivantes :

- Vérification de la continuité des séries (Aucune rupture climatique n'a été observée).
- Test de l'homogénéité des séries utilisées par la méthode cumulative classique(l'analyse reflète une bonne homogénéité des séries).
- Analyse de la tendance évolutive des cumuls de pluies, et de la situation mensuelle des barrages en se basant sur la méthode des moindres carrés (La régression linéaire simple).

L'analyse globale des précipitations est recommandée, certes, dans ce genre d'études, mais, ses résultats restent limités et non représentatifs, puisqu'elle cache involontairement des détails périodiques liés à l'alternance des années exceptionnelles, qu'elles soient extrêmement humides ou sèches ce qui pourrait affecter les résultats obtenus. Cette situation, nous a poussé dans un premier temps à intégrer l'utilisation des moyennes mobiles pour démontrer la périodicité pluviométrique et puis dans un deuxième temps, il a été préférable d'analyser chacune des décades (1985-1995 ; 1995-2005 ; 2005-2015) pour voir clairement la différence, tout en employant certains indices de sécheresse météorologique, notamment l'indice de l'écart à la normale (En%) pour mettre en évidence, les changements enregistrés à l'échelle décadaire.

## 2. Site d'étude : Maroc

Pour mieux localiser la zone d'étude, il suffit de jeter un coup d'œil rapide sur la carte géopolitique du Monde, on voit clairement que le territoire Marocain est bien positionné dans l'hémisphère Nord, entre les parallèles 21° et 36° de latitude Nord, et entre les méridiens 1° et 17° de longitude Ouest. Le Maroc, est un pays Africain aux particularités géographiques

exceptionnelles. Climatologiquement parlant, le régime climatique Marocain est de type méditerranéen certes, mais ses climats sont très variés. D'ailleurs ils sont influencés par les influences océaniques, méditerranéennes, montagnardes, continentales et désertiques et ce, à cause des aires géographiques qui l'entourent, notamment, l'océan atlantique à l'Ouest, la méditerranée occidentale et l'Europe au Nord et le Sahara au Sud et à l'Est (Karrouk. M.S, 2018), sans oublier, les chaînes de montagnes qui s'étendent à l'intérieur du pays sur des longueurs variables.

### 3. Résultats

#### 3.1. Tendence évolutive des précipitations au Maroc

La droite de régression linéaire calculée entre 1980 et 2015 a démontré une sorte d'augmentation des pluies annuelles pour la majorité des stations étudiées. D'un côté, la hausse était plus au moins légère au niveau de la station d'Errachidia avec une progressivité de 1,8 mm par an seulement. Cette augmentation est due notamment aux averses survenues à la région ces dernières années. D'un autre côté, l'accroissement pluviométrique a dépassé 4 mm par an pour les stations de Fès-Saïs (4,9 mm/an) et Casablanca (4,05 mm/an). En revanche, les cumuls de pluies annuelles ont légèrement chuté au niveau de la station de Tanger-Aéroport. La baisse était de l'ordre de 0,84 mm par an, ce qui reflète une sorte de stabilité pluviométrique (**Fig. 1**).

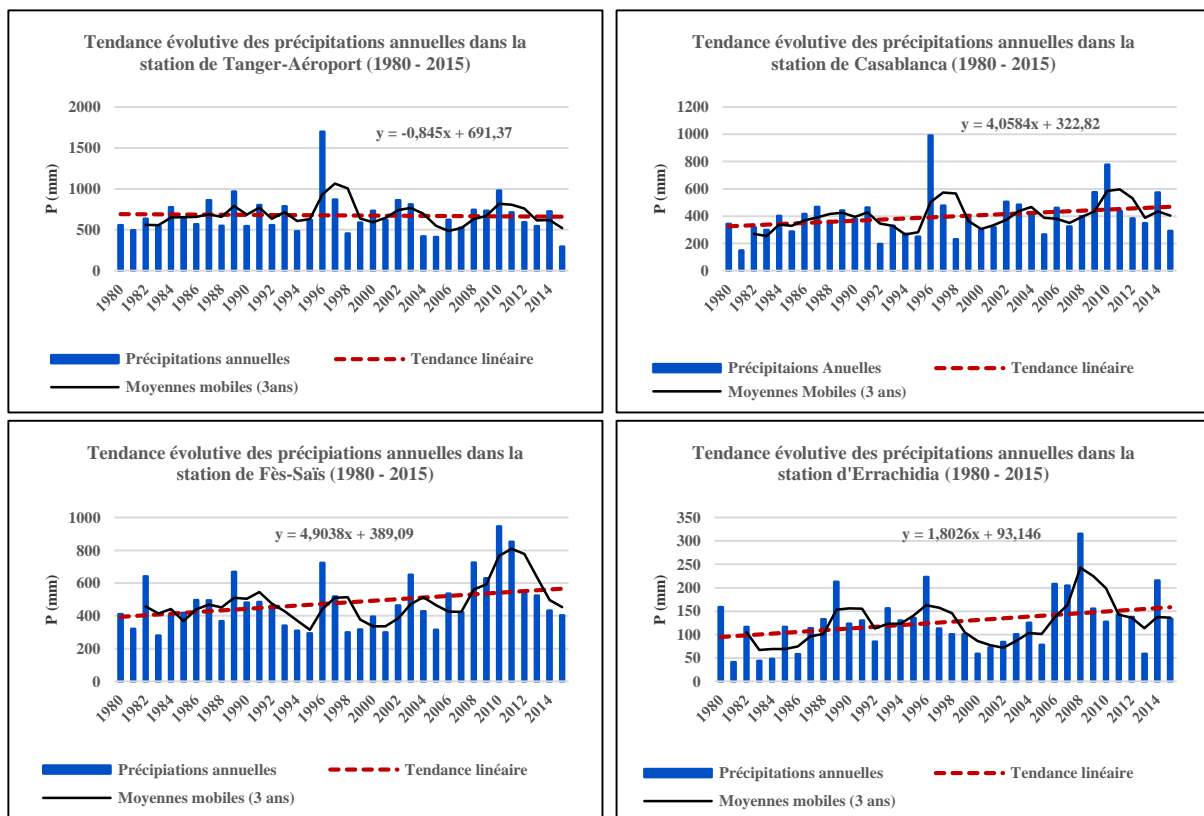
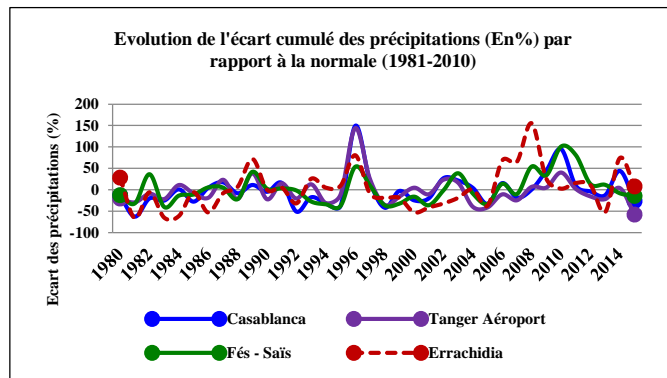


Figure 1 : Tendence évolutive des précipitations annuelles dans les stations étudiées (1980 – 2015)

Sur le plan décennaire, la série étudiée est marquée par deux phases essentielles (**Tab. 1**) :

**La 1<sup>ère</sup> phase :** coïncide avec le déclenchement du réchauffement climatique comme sécheresse aigüe à partir des années 80, à l'exception bien évidemment, de quelques années reconnues très humides (1996 ; 1997) par rapport à la normale. Cette phase comprend, notamment, les décades 1985-1995 et 1995-2005 auxquelles, la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère a contribué à l'augmentation des températures, conséquence de quoi, l'évaporation a augmenté également ; l'espace atmosphérique s'est élargi sans doute, en hauteur, mais il a fallu beaucoup

de vapeur d'eau pour qu'il y a une saturation totale. Malheureusement c'était un but difficile à atteindre. A cause de ces événements, il n'était pas possible de pleuvoir<sup>9</sup>, tout au contraire, les précipitations ont beaucoup diminué (Entre -7,27 et -16,6 mm/an pendant la décade 1985-1995



et entre -3,28 et -49,85 mm/an pendant la décade 1995-2005). Au cours de ces deux décades et sur la base de 21 ans de données, presque 16 années étaient relativement sèches par rapport à la normale (De 1985 à 1988 ; 1990 ; de 1992 à 1995 ; de 1998 à 2002 et de 2004 à 2005) (Fig. 2).

Figure 2 : Evolution de l'écart cumulé des précipitations (En%) par rapport à la normale (1981 – 2010)

**La 2<sup>ème</sup> phase** :synchronise avec la dernière décade 2005-2015. Cette phase a débuté, notamment en 2006, au niveau de laquelle, les températures ont continué toujours d'augmenter ce qui a favorisé la saturation de l'atmosphère en vapeur d'eau, en particulier, la troposphère qui s'est élargie encore plus ; et c'est à partir de là, que nous avons remarqué un retour imprévisible des précipitations dans l'ensemble du royaume et qui reste, en termes de grandeur, variable d'une station à l'autre. Généralement, l'augmentation a varié entre 1,56 et 4,3 mm/an. En calculant l'indice de l'écart à la normale, on peut dire que les dernières années, notamment 2006 ; 2008 ; 2009 ; 2010 ; 2011 et 2014 étaient qualifiées d'humides dans toutes les stations étudiées (Fig. 2). Le retour des précipitations peut être expliqué en partie par la dynamique méridienne de la circulation atmosphérique, qui a dominé pendant ces dernières années ; les échanges de chaleur et de l'humidité étaient alors très observés en latitudes, entre l'équateur et les zones subtropicales où se localise le Maroc.

Tableau. 1 : Tendence évolutive des précipitations décennales dans les stations étudiées en mm/an (1985 – 2015)

	1985 - 1995	1995 - 2005	2005 - 2015
Tanger-Aéroport	-7,27	-49,85	-4,04
Casablanca	-13,8	-15,6	+4,3
Fès-Saïs	-16,6	-3,28	+1,56
Errachidia	+2,98	-7,06	-4,54

A l'échelle saisonnière (Tab. 2), une augmentation statistiquement significative des cumuls de pluies a été observée pendant l'automne au niveau des stations de Casablanca (+3,46 mm/an), de Fès-Saïs (+2,59 mm/an) et d'Errachidia (+1,61 mm/an). La situation au niveau de la station de Tanger-Aéroport reste tout de même stable malgré les valeurs légèrement basses (-0,25 mm/an). Les précipitations hivernales, quant à elles, ont enregistré une hausse oscillante entre 0,25 mm/an pour la station de Casablanca et 2,09 mm/an pour la station de Fès-Saïs. Par contre, elles ont diminué doucement au niveau des stations de Tanger-Aéroport et d'Errachidia (Entre -0,32 et -0,66 mm/an). Le printemps a enregistré entre 1980 et 2015 des valeurs faiblement positives (Entre +0,17 et +0,42 mm/an). Pendant l'été, une stabilité remarquable a été observée dans l'ensemble des stations étudiées. En utilisant la méthode des moindres carrés, nous avons constaté une très légère baisse estivale pour les stations de Casablanca (-0,08 mm/an) et de Tanger-Aéroport (-0,25 mm/an), et une hausse insignifiante pour les stations de Fès-Saïs (+0,03 mm/an) et d'Errachidia (+0,24 mm/an). Au niveau mensuel, ce sont les mois de Janvier ; Mars ;

<sup>9</sup> Communication orale du professeur Mohammed-Saïd KARROUK, 2021

Septembre ; Octobre et Novembre qui ont enregistré les cumuls les plus progressifs, alors que, les autres mois reflètent une sorte de stabilité, tendant vers une légère diminution.

Tableau. 2 : Tendances évolutives des précipitations saisonnières dans les stations étudiées en mm/an (1980 – 2015)

	Automne	Hiver	Printemps	Été
Tanger-Aéroport	-0,25	-0,66	+0,33	-0,25
Casablanca	+3,46	+0,25	+0,42	-0,08
Fès-Saïs	+2,59	+2,09	+0,17	+0,03
Errachidia	+1,61	-0,32	+0,26	+0,24

### 3.2. Evolution de la production d'eau superficielle au Maroc

Au fil du temps, les ressources en eau superficielles ont connu, tout au long du territoire Marocain une grande évolution aussi bien spatiale que temporelle. Les barrages, principaux ouvrages d'art construits dans le but de stocker l'eau et contrôler les crues, étaient témoins des différents changements survenus ces quarante dernières années. Les mesures élaborées par les services concernés (DGE<sup>10</sup>) ont démontré que les 12 régions Marocaines possèdent une ressource en eau très variable d'une année à l'autre, d'une région à l'autre, et même, au sein de chaque région, on remarque une grande variabilité.

Apparemment, la hausse des cumuls pluviométriques annuels avait ses bienfaits sur l'amélioration de la réserve et le taux de remplissage des barrages ces dernières années. La droite de régression linéaire calculée pour le barrage d'Al Massira prouve d'ailleurs ce constat et démontre une augmentation record avec 33,4 Mm<sup>3</sup> de plus chaque année pendant la période 1984-2015, soit une évolution du taux de remplissage atteignant +1,25 % par an. Le barrage Hassan Adakhil, non plus, n'a pas échappé à cette tendance, tout au contraire, il a enregistré des valeurs positives, tant qu'au niveau de la réserve (+1,51 Mm<sup>3</sup>/an) ou même le taux de remplissage (+0,48 %/an) entre 1980 et 2013. Le barrage d'El Kensera, qui représente d'ailleurs le barrage le plus proche de la station de Fès-Saïs – dont les mesures sont disponibles – a enregistré également entre 1980 et 2015 une augmentation plus au moins intéressante de la réserve (+1,56 Mm<sup>3</sup>) et le taux de remplissage (+0,72%) (**Tab. 3**).

Le barrage Ibn Battouta, situé au bassin du Loukkos, a enregistré quant à lui, des valeurs tout à fait différentes. En se basant sur la méthode des moindres carrés, nous avons constaté une faible diminution de la réserve d'eau (-0,15 Mm<sup>3</sup>/an) et du taux de remplissage (-0,54 %/an) pendant la période 1980-2015. Ces résultats concordent parfaitement avec ceux enregistrés au niveau de la pluviométrie annuelle de la station de Tanger-Aéroport – la station la plus proche du barrage – qui a légèrement baissé pendant la même période (-0,84 mm/an) (**Tab. 3**).

À l'échelle décennale (**Tab. 3**), un recul important a été observé pendant les deux premières décennies (1985-1995 et 1995-2005). La retenue du barrage d'Al Massira par exemple a chuté de 116,8 Mm<sup>3</sup> par an pendant la décennie 1995-2005 (-4,39%). Une baisse qui concorde parfaitement avec celle enregistrée au niveau des cumuls pluviométriques Casablancais (-15,6 mm/an). En revanche, une progression remarquable reste à signaler pendant la dernière décennie où les réserves d'eau et les taux de remplissage des barrages Marocains ont largement augmenté. L'utilisation de la méthode des moindres carrés, nous permet de dire que le barrage d'Al Massira – le barrage le plus représentatif de la situation – reflète véritablement cette évolution avec 237,06 Mm<sup>3</sup> de plus chaque année, soit une hausse de 8,92% par an du taux de remplissage.

<sup>10</sup> Direction Générale de l'Eau – Rabat.

Tableau. 3 : Tendence évolutive de la production d'eau superficielle dans quelques principaux barrages au Maroc

Barrage	Bassin	Capacité normale (Mm <sup>3</sup> )	Période d'observation	Réserves (Mm <sup>3</sup> )				Taux de remplissage (%)			
				Ann	1985-1995	1995-2005	2005-2015	Ann	1985-1995	1995-2005	2005-2015
Ibn Battouta	Loukkos	29,1	1980 – 2015 (36 ans)	-0,15	-1,01	-0,58	+0,05	-0,54	-3,48	-2,0	+0,2
Al Massira	Oum Er Rabiaa	2657,0	1984 – 2015 (32 ans)	+33,4	-62,8	-116,8	+237,06	+1,25	-2,36	-4,39	+8,92
El Kensera	Sebou	216,4	1980 – 2015 (36 ans)	+1,56	-2,57	+0,81	+2,54	+0,72	-1,18	+0,37	+1,17
Hassan Adakhil	Ziz Guir Ghris	312,8	1980 – 2013 (33 ans)	+1,51	-7,01	+4,11	-6,67	+0,48	-2,24	+1,31	-2,13

### Conclusion et Discussion

Une hausse de la fréquence des épisodes secs a été constatée au Maroc pendant une très longue période coïncidant à presque 26 ans depuis 1980 jusqu'à 2005. Malheureusement, la sécheresse de caractère météorologique a marqué l'histoire Marocaine à partir des années 80. Elle est même devenue, selon les climatologues une donnée structurelle ce qui avait des incidences négatives sur les ressources en eau, moteur principal des autres secteurs (Agriculture, Sécurité alimentaire, Ecosystèmes naturelles...). A partir de la 2<sup>ème</sup> décennie du 21<sup>ème</sup> siècle, nous avons remarqué que les sécheresses précédemment mentionnées ont cédé la place au retour subite des précipitations, ce qui avait, ses bienfaits sur la production d'eau superficielle ; les taux de remplissage des barrages étaient alors, satisfaisants par rapport aux années précédentes, mais, on ne peut pas s'estimer très heureux à l'égard de cette nouvelle donnée : d'un côté, le surplus d'eau, pourrait engendrer des inondations dévastatrices, comme le cas de la ville de Casablanca pendant le mois de Janvier 2021 ; d'un autre côté, les conditions atmosphériques actuelles – liées principalement à un mouvement atmosphérique méridien – pourraient changer d'une année à l'autre, donc, on ne peut pas prédire la continuité de ces épisodes extrêmement humides par rapport à la normale.

### Bibliographie

- Bates B., Kundzewicz Z.W., Wu S., Palutikof J., 2008 : *Le changement climatique et l'eau*, Document technique publié par le Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, 236p.
- Bouaiche A., Karrouk M.S., Lotfi N., Tnourji H., Chair M., 2020 : Impacts des pluies automnales extrêmes sur la ville d'agadir : Cas des inondations de novembre 2014. 33<sup>ème</sup> Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), Rennes, France, 133-138. ISBN : 978-2-907696-26-5.
- Fattah H., Karrouk M.S., 2016 : *Impacts des changements climatiques sur les forêts du cèdre Marocaines : Cas de la cédraie d'Azrou (Moyen Atlas central)*. Editions Universitaires Européennes (EUE), Sarrebruck, Allemagne, 329p. ISBN : 978-3-639-54410-7.
- Jouilil I., Bitar K., Salama H., Amraoui., Mokssit A., Tahiri M., 2013 : Sécheresse météorologique au bassin hydraulique Oum Er Rbia durant les dernières décennies. *Larhyss Journal*, n°12, 109-127. ISSN : 1112-3680.
- Karrouk M.S., 2020 : Les inondations de 2009-2010 au Maroc : L'exceptionnalité de l'évènement et difficultés de gestion dans la région du Gharb. 33<sup>ème</sup> Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), Rennes, France, 391-396. ISBN : 978-2-907696-26-5.
- Saloui A., 2006 : *Précipitations et bilan hydriques dans les plaines atlantiques Marocaines*. Publications de la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines-Mohammedia. Série : Colloque n°8. 494p.
- Stour L., Agoumi A., 2008 : Sécheresse climatique au Maroc durant les dernières décennies. *Hydroécologie Appliquée*, Paris, Tome 16, 215-232. URL : <http://dx.doi.org/10.1051/hydro/2009003>

# COMBINATION AND EVALUATION OF DIFFERENT URBAN COOLING SOLUTIONS

Frere M. (1,2), Hendel M. (1,2), Van Rompu J. (3) et Royon L. (1)

(1) Université de Paris, LIED, UMR 8236, CNRS, France, maxime.frere77@gmail.com

(2) Université Gustave Eiffel, ESIEE Paris, Département SEN, France

(3) EIFFAGE, Corba Lyon, EIFFAGE ROUTE, France

**Abstract :** *Cities, due to their density and sealed pavements, are subject to the urban heat island phenomenon which, coupled with climate change, can lead to critical health situations during summer. This is why many actors have studied solutions to limit and/or create spaces protected from urban overheating phenomena. These solutions range from soil permeabilization, installation of cool pavement to vegetation and urban watering. In order to evaluate several of these solutions simultaneously, a demonstrator has been developed by the company Eiffage in Hyères (83). This 100m<sup>2</sup> site combines a cool permeable pavement with a sub-layer water storage that can be used to irrigate the pavement. Thermal and microclimatic impact studies are undertaken using numerous sensors including an IR camera, an albedometer and two weather stations. One station is placed inside the demonstrator and another one is installed in a parking lot located 100 m from the demonstrator. This study allowed us to highlight the beneficial effects of the different solutions and to evaluate their synergy, with a maximum gain of 3°C UTCI equivalent temperature. In addition, we were able to observe the evolution of the albedo of different pavements, from asphalt concrete to stabilized sand, including different concretes.*

**Keywords :** *urban cooling, pavement watering, urban heat island, cool pavement*

**Résumé :** *Les villes, de par leur tissu dense et leurs revêtements minéraux, sont soumises au phénomène d'îlot de chaleur urbain qui, couplé au changement climatique, peut conduire à des situations sanitaires critiques en période estivale. C'est pourquoi de nombreux acteurs ont étudié des solutions pour limiter et/ou créer des espaces protégés des phénomènes de surchauffe urbaine. Ces solutions vont de la perméabilisation des sols, l'installation de pavés frais à la végétation et l'arrosage urbain. Afin d'évaluer plusieurs de ces solutions simultanément, un démonstrateur a été développé par la société Eiffage à Hyères (83). Ce site de 100m<sup>2</sup> combine un revêtement perméable frais sur une structure réservoir dotée d'un circuit hydraulique, permettant d'utiliser l'eau stockée pour arroser le revêtement. Des études d'impact thermique et microclimatique sont réalisées à l'aide de nombreux capteurs dont une caméra IR, un albedomètre et deux stations météorologiques. Une station est placée à l'intérieur du démonstrateur et une autre est installée dans un parking situé à 100 m du démonstrateur. Cette étude nous a permis de mettre en évidence les effets bénéfiques des différentes solutions et d'évaluer leur synergie, avec un gain maximal de 3°C sur l'UTCI. De plus, nous avons pu observer l'évolution de l'albédo de différents revêtements, de l'asphalte bitumineux au sable stabilisé, en passant par différents bétons.*

**Mots-clefs :** *rafraîchissement urbain, arrosage urbain, îlot de chaleur urbain, chaussée rafraîchissante*

## Introduction

In the current context of climate change, most cities are in a period of reflection in order to propose solutions to limit the effects of urban heat islands. These solutions include urban soil unsealing, adding green spaces and using innovative materials [1]–[4][5].

It is in this context that the company Eiffage developed a demonstrator including different types of materials and processes likely to induce cooling during a heat wave event. This experiment takes place in the south of France in Hyères.

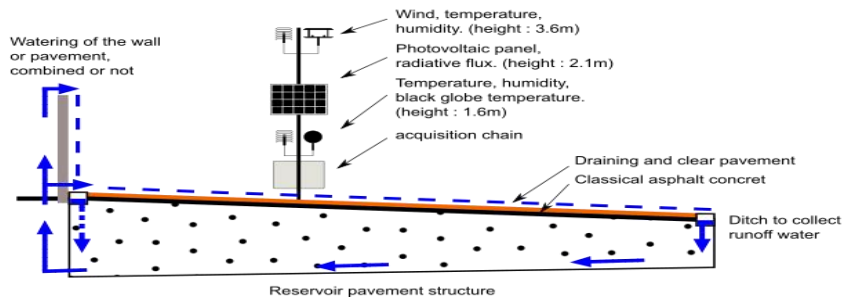
The article focuses on the cooling performance of the demonstrator, analyzing its thermal and microclimatic behavior.

## Data and methodology

### The demonstrator

This structure is 10 m by 10 m with a South-facing U-shaped enclosure 2.5 m high. Its purpose is to test the thermal and microclimatic behavior of cool pavement solutions. It includes a fountain that can be used to water the pavement, the wall or both simultaneously.





**Figure 28 : Weather station deployed on site and the demonstrator.**

Watering was conducted for 15 minutes every hour from 8 am to 6 pm, with a flow of about 45 mm/h. Surface wetting is done by an overflow with a gutter located upstream of the pavement. Runoff is collected in the gutter located downstream and seeps back to the tank which feeds the overflow gutter, thus allowing a closed circuit operation.

### ***Microclimatic analysis method***

The microclimatic analyses are based on measurements conducted following a BACI approach and analyzed with a fixed effects model[6]. In the present study, one weather station is located inside the demonstrator and the other 100m away.

The demonstrator is studied with two different surface courses: standard asphalt concrete from May to July 2019 with an albedo of 0.09 and a pervious (30% void), plant-based binder asphalt concrete since August 2019. Its albedo was initially 0.13 and increased to 0.24 following mineral and dust deposits.

The site is located at the boundary between different urban fabrics. It is located at the Western end of an industrial area of LCZ class 8[7]. To the North, it is bordered by an agricultural zone (LCZ D), and by a forest (LCZ A) to the South.

### ***Instrumentation***

Weather station instruments are listed in Table 1.

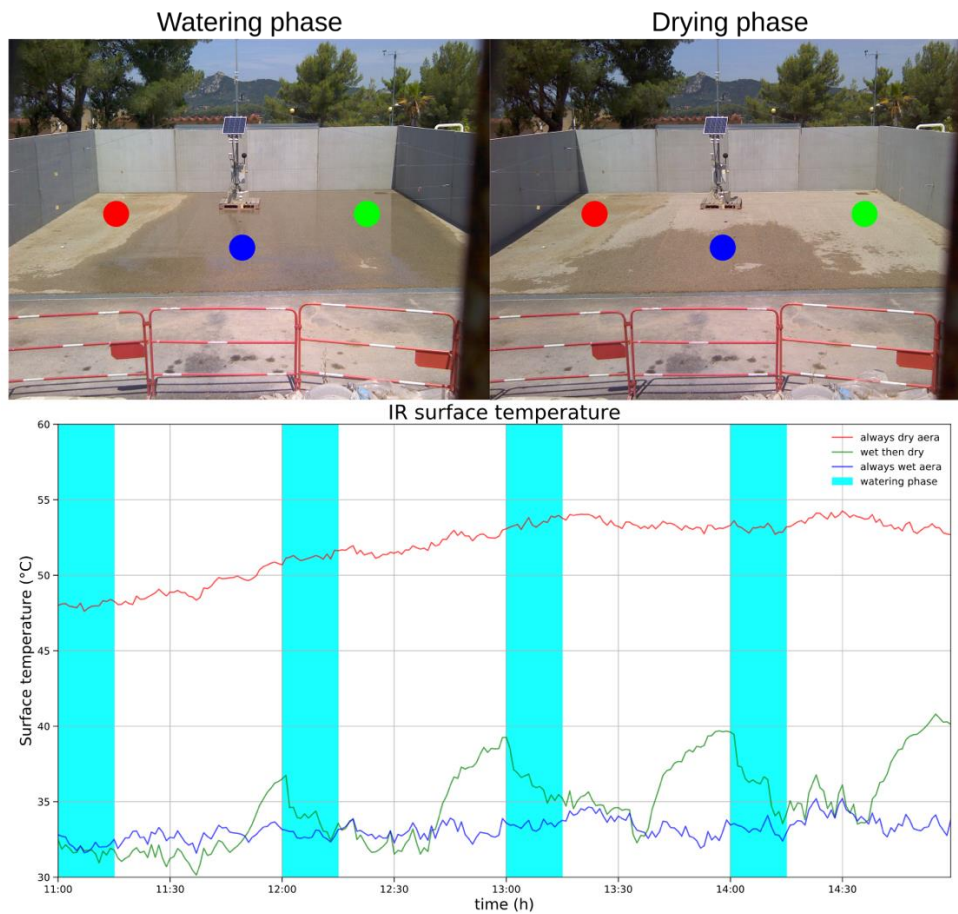
**Table 3: Station instrument type, height and uncertainty**

Parameter	Symbol	Instrument	Height	Uncertainties
Air temperature	$T_{air}$	Sheltered Pt100	1.6 m 3.6 m	0.1+0.17%
Relative humidity	RH	Capacitive	1.6 m 3.6 m	0.25%
Globe temperature	$T_g$	Pt100	1.6 m	0.1+0.17%
Wind speed	$v$	2D Ultrasound	3.6 m	0.1
Longwave radiation (downwards and upwards)	LW-in, LW-out	Pyrgometer	2.1m	2%
Shortwave radiation (downwards and upwards)	SW-in SW-out	Pyranometer	2.1m	2%
Pavement surface temperature	$T_{surf}$	IR Camera	-	2°C

## Results

### Surface temperature

The effect of watering on pavement surface temperature is illustrated in Fig. 2 as observed from 11 am to 3 pm.



**Figure 29 : Watering and drying phases (top) and pavement surface temperature(bottom).**

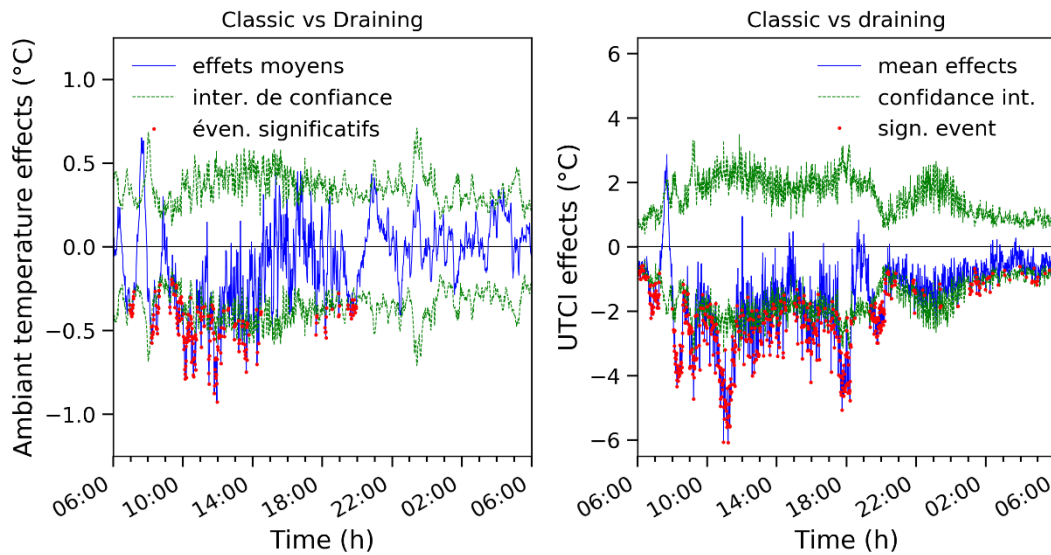
Three zones, marked with red, blue and green dots respectively, are monitored. The red zone is always dry, the blue is watered but dries out before the end of the cycle, and finally the green one never dries.

Watering is found to reduce surface temperature by about 20°C. As soon as the top of the pavement dries, its temperature rises but remains about 13°C below that of the dry (red) area. This is interpreted as being caused by the water still present within the pavement. The pavement's thermal inertia also limits pavement overheating.

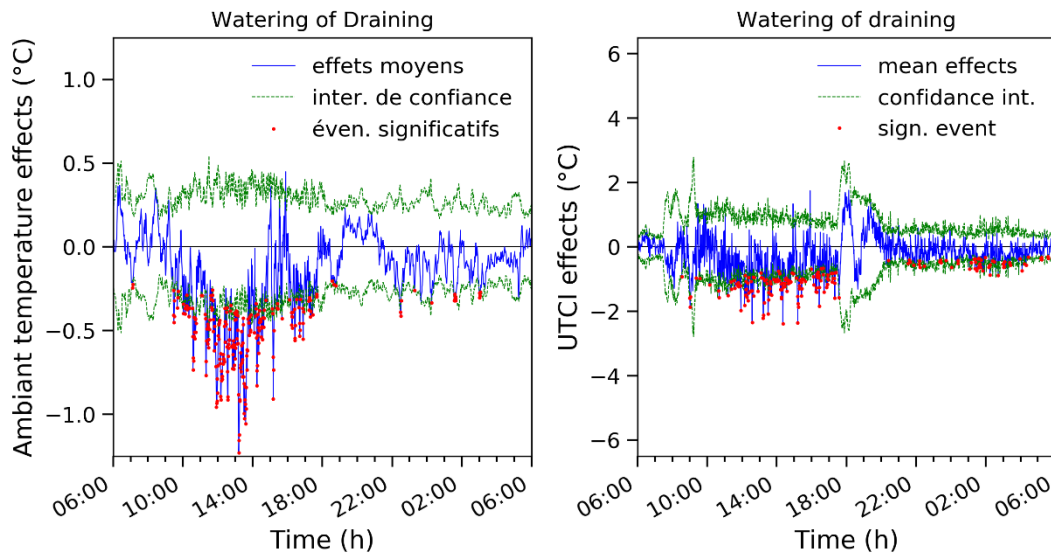
### Microclimatic impacts

The impact of three configurations of the demonstrator are considered: replacing the asphalt concrete with the draining pavement, watering the pervious pavement, and the combination of the two.

Figure 30 illustrates the microclimatic impacts of replacing the standard asphalt concrete surface course with the draining pavement. It should be noted that instrument shadowing occurs at 8:30 am, 11am and 18 pm.



**Figure 30 : Microclimatic impact of changing the pavement surface course on air temperature (left) and UTCI (right)**

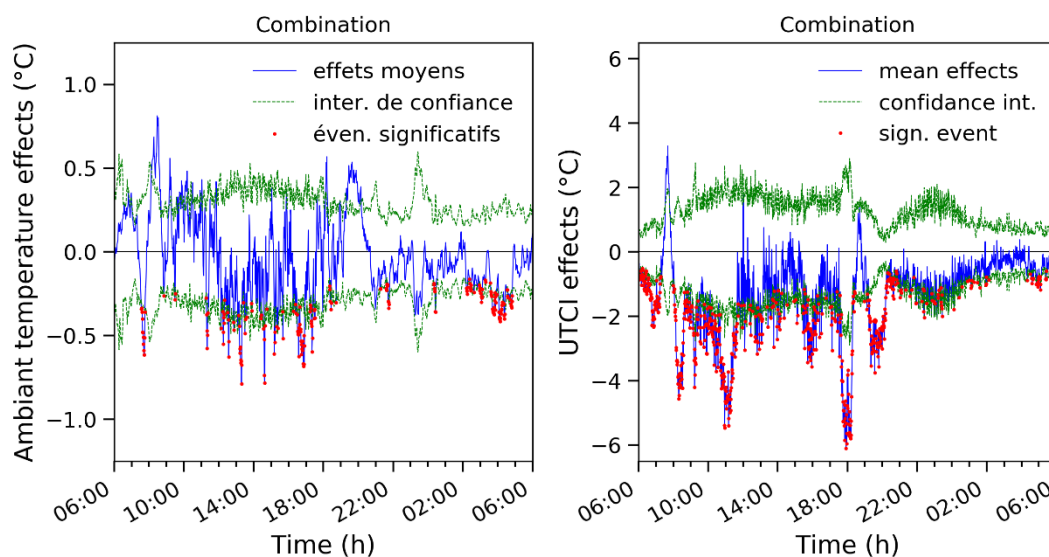


**Figure 31 : Impact of watering applied to the draining pavement on air temperature (left) and UTCI (right).**

By applying the fixed effect model method, we can show first the positive impact of a reflective material choice on air temperature from the ground and the UTCI temperature both for a height of 1.6m (Figure 3), the impact of watering in this configuration (Figure 4) and finally the overall impact of the device (Figure 5). The key values associated with these graphs are summarized in Table 2. (with shadow impact consideration). For all each Figure, the mean effect is represented as a solid blue line with its confidence interval as the green line.

A first observation is that the change of pavement, although having a smaller effect on the ambient temperature than the effect of watering, has a significant effect on UTCI, which takes into account the reduction in mean radiant temperature. This difference can't be explained by the difference in albedo between the two materials alone, the draining pavement being only slightly more reflective. In parallel, although watering shows a greater effect on air temperature, its final impact on the UTCI equivalent temperature remains less than with the pavement

change alone. This last difference can be explained by the difference in period of both datasets (June vs September). Additional data will be analyzed to better capture the effect.



**Figure 32 : Combined impact of changing the pavement and watering on air temperature (left) and UTCI (right).**

Finally, the combination of the change and the watering creates the strongest cooling effects at the end of the day compared to the change of pavement alone. To have a better understanding of these values the Table 2 show all key data with the filtration of some point that correspond to the effect of a tree’s shadow (at 6pm) and other shadow on the black globe (at 8:30 am). Further data will help confirm the statistical robustness of these results.

**Table 4: Microclimatic impacts and metadata from the different statistical tests performed.**

Study	Parameter	Maximum Effect	Time of maximum	Mean effects	N <sub>ref</sub>	N <sub>étude</sub>
Classic vs draining	T <sub>air</sub>	-0.9°C	12:01pm	-0.4°C	15	14
	UTCI	-4.3°C	16:02pm	-2.5°C	15	14
Draining pavement watering	T <sub>air</sub>	-1.2°C	13:09pm	-0.5°C	14	8
	UTCI	-2.4°C	14:26pm	-0.9°C	14	8
Combinaison	T <sub>air</sub>	-0.8°C	13:05pm	-0.1°C	15	8
	UTCI	-3.7°C	16:05pm	-2.1°C	15	8

## Conclusions and Discussion

During this study, air temperature, surface temperature, and pedestrian heat stress were analyzed under radiative conditions to determine the impact of the biosourced binder pavement and of pavement-watering in the demonstrator.

The result showing that the biggest positive impact on temperature and UTCI occurs from replacing the pavement, although this specific result needs to be confirmed with additional data. Pavement-watering shows a smaller effect on both parameters but suffers of a smaller number of observations. The combination of both approaches is dominated by the changing of pavement effect although but the water mitigation allows a stronger effect on the late day.

The surface temperature during watering drops by about 20°C. With the microclimatic data, we see that a reduction of 20°C on the surface allows a reduction of about 1.2°C on air temperature and 2.4°C on UTCI in this specific configuration. To complete this study, more data will be collected next summer to have a better statistical significance and a better visualization of what

happens especially with the changing of pavement. Then we will extend the study on the impact of the water wall of the demonstrator and finally follow surface temperature over multiple days.

## **Acknowledgments**

This research was funded by Eiffage and the I-SITE FUTURE E3S Project (ANR-16-IDEX-0003). The authors would like to acknowledge the contribution of Jean-Marc LHUILLIER.

## **Bibliography**

- [1] S. Saneinejad, P. Moonen, and J. Carmeliet, “Comparative assessment of various heat island mitigation measures,” *Build. Environ.*, vol. 73, pp. 162–170, 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.12.013.
- [2] S. Parison, L. Royon, and M. Hendel, “Urban Materials and Evaporative Cooling for Heat Mitigation in Cities Adapting Pavement-Watering to Different Parisian Pavements,” *PIERI Univ. Paris*.
- [3] M. Hendel, S. Parison, A. Grados, and L. Royon, “Which pavement structures are best suited to limiting the UHI effect? A laboratory-scale study of Parisian pavement structures,” *Build. Environ.*, vol. 144, pp. 216–229, 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.08.027.
- [4] X. Guo and M. Hendel, “Urban water networks as an alternative source for district heating and emergency heat-wave cooling,” *arXiv*, 2018.
- [5] G. Jendritzky, R. de Dear, and G. Havenith, “UTCI--why another thermal index?,” *Int. J. Biometeorol.*, vol. 56, no. 3, pp. 421–8, May 2012, doi: 10.1007/s00484-011-0513-7.
- [6] S. Parison, M. Hendel, and L. Royon, “An Updated Method for Quantifying the Field Effects of Urban Heat Island Mitigation Techniques,” *Rev.*, 2020.
- [7] I. D. Stewart and T. R. Oke, “Local climate zones for urban temperature studies,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 93, no. 12, pp. 1879–1900, 2012, doi: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.

# EFFET DE L'EXPOSITION AU SOLEIL ET AU VENT DOMINAT SUR LES TEMPERATURES ET PERCEPTION DE LA CHALEUR DANS LES QUARTIERS DU CENTRE-VILLE DE SFAX (CENTRE-EST DE LA TUNISIE)

Ghribi Marwen. (1) et Dahech Salem (1, 2)

(1) Université de Sfax/ Laboratoire SYFACTE (Sfax, Tunisie), (ghribi310590.marwen@gmail.com).

(2) Université de Paris, UMR PRODIG UMR8586 (Paris, France) (salem.dahech@gmail.com)

**Résumé :** Dans le centre-ville de Sfax, les rues orientées NO/SE sont moins exposées au soleil par rapport à celles orientées SO/NE. Au niveau de ces dernières, la différence de températures de surface entre les bâtiments exposés SO, ensoleillés, et ceux ESE, ombragés, peut atteindre 23°C, vers 16h00 (heure locale). De ce fait, en phase nocturne, les artères orientées SO/NE sont plus chaudes que celles exposées NO/SE, drainant la brise de mer et irradiées le matin. Par conséquent, la sensation d'inconfort thermique à l'intérieur des habitations exposées S, SO et O est plus intense ce qui fait que ces locaux sont plus équipés en climatiseurs et consomment plus d'énergie dédiée à la climatisation en été que les logements orientés NO, N, NE et E, plus ombragés et assez ventilés.

**Mots clés:** Centre-ville, exposition au soleil, température, brise de mer, climatisation, énergie électrique, Sfax

**Abstract :** In the city center of Sfax, the streets oriented NW / SE are less exposed to the sun compared to those oriented SW / NE. At the level of the latter, the difference in surface temperatures between buildings exposed to SW, sunny, and those ESE, shaded, can reach 23 ° C, around 4:00 p.m. (local time). Therefore, in the night phase, the arteries oriented SW / NE are warmer than those exposed NW / SE, draining the sea breeze and irradiated in the morning. Consequently, the sensation of thermal discomfort inside homes exposed to S, SO and O is more intense, which means that these premises are more equipped with air conditioners and consume more energy dedicated to air conditioning in summer than homes oriented NW, N, NE and E, more shaded and fairly ventilated.

**Key words:** Downtown, sun exposure, temperature, sea breeze, air conditioning, electrical energy, Sfax

## Introduction :

Les températures enregistrées en ville sont, régulièrement, plus élevées que celles observées dans l'arrière-pays rural. En effet, un îlot de chaleur est formé au niveau de la partie centrale dense (Oke, 1973 ; Fujibe, 2011). Dans cette dernière, à l'échelle d'un fragment urbain, l'exposition par rapport au soleil agit significativement sur les quantités d'énergie solaire reçues et stockées par les parois des bâtiments. Dans cette optique, les caractéristiques thermiques hétérogènes des surfaces et matériaux de construction induisent une anisotropie du comportement radiatif urbain de jour comme de nuit (Lagouarde et al., 2010). En effet, la température des façades et des rues varie essentiellement en fonction de l'exposition au soleil (durée et moment) et l'orientation par rapport au vent dominant. De surcroît, les revêtements et la couleur des parois agissent fortement sur les gains thermiques à l'intérieur des locaux et le confort des occupants. Au niveau de la rive sud de la Méditerranée comme à Sfax, une nette tendance significative à la hausse des températures, notamment celles minimales, est observée pendant les dernières décennies (Dahech et Ghribi, 2015). De plus, les dernières années furent marquées, en été, par l'occurrence accrue des épisodes caniculaires et des journées de forte chaleur (Dahech et Ghribi, 2018). Ceci, a certainement aggravé l'effet d'îlot de chaleur en ville et intensifié la sensation d'inconfort thermique induisant une forte pression sur la climatisation électrique (Dahech 2012 ; Dahech et Ghribi, 2018).

À Sfax, où les températures quotidiennes maximales atteignent souvent 35 à 40°C en saison estivale, au quartier européen organisé en damier, plusieurs artères principales sont orientées SO/NE comme les avenues des Martyrs et Habib Bourguiba ou O/E tels que le boulevard Farhat Hached et la rue Léopold Sédar Senghor. Ils sont ensoleillés longuement, pendant les moments les plus chauds de la journée. Généralement, ces avenues orientées SO/NE ne sont pas drainées par la brise de mer, à l'exception des croisements avec les rues perpendiculaires au trait de côte.

Le présent travail s'intéresse à l'étude de la variation des températures dans les zones denses de l'agglomération de Sfax, en été, afin de mettre en exergue l'effet de l'exposition au soleil sur

la température de surface et de l'air. Ceci, pourrait avoir un certain impact négatif sur le confort thermique et augmenter ainsi le besoin en climatisation.

## **1. Méthodes et Données**

La thermographie des bâtiments a été étudiée par une caméra thermique « Testo 865 » de très bonne résolution, le 26 juillet et 09 août 2020 entre 09h30 et 16h30.

De plus, deux campagnes de mesures mobiles des températures de l'air à 2 mètres du sol ont été réalisées par un capteur portable « Testo 665 » le 02 et 16 août 2020 vers 01h00 (heure locale) au niveau des quartiers denses du centre-ville pour étudier l'évolution des températures dans ces endroits centraux pendant la nuit.

De surcroît, la perception de la chaleur des citoyens et leurs modes d'adaptation au réchauffement estival sont étudiés par une enquête exploratoire effectuée pendant la saison chaude des années 2019 et 2020 auprès de 200 ménages occupant la partie centrale de l'agglomération de Sfax.

## **2. Impact de l'ensoleillement et l'exposition au vent dominant sur les températures de surface et de l'air au centre-ville.**

### **2.1. Impact de l'exposition sur la température des bâtiments du centre-ville**

Durant l'après-midi, au moment où les températures les plus élevées sont le plus souvent enregistrées, le rayonnement solaire intense atteint progressivement les nombreuses artères orientées SO/NE. Par conséquent, les températures de surfaces des bâtiments bordant ces rues ensoleillées sont largement supérieures à celles observées au niveau des surfaces longeant les voies exposées NO/SE généralement ombragées.

Les mesures réalisées par une caméra thermique « Testo 865 », vers 16h00, indiquent qu'au niveau d'une façade exposée au rayonnement solaire, la différence entre les surfaces vitrées et les parois opaques peut s'élever jusqu'à 20°C (P2 et P4, figure 1A). De même, une différence d'environ 20 °C est mesurée entre les façades vitrées ensoleillées (P2, P3, et P6, figure 1A) et les parois vitrées abritées du rayonnement solaire (P12 et P13, figure 1B1). Un écart d'environ 7°C est observé entre les surfaces opaques ombragées (P9 et P10, figure 1B1) orientées NE et celles ensoleillées (P5 et P7, figure 1A) bordant la rue orientée SO/NE. Au niveau de cette dernière, La rangée orientée SO est plus soumise au soleil par rapport à celle exposée ESE, ce qui fait que la différence de température entre les baies vitrées ombragées et les parois vitrées exposées directement au soleil est de l'ordre de 22°C (P2, figure 1 A et P14, figure 1B2). Cependant, un écart d'environ 10 °C est distingué entre les surfaces opaques ombragées, revêtues en blanc, (P17, figure 1B2) et les parois opaques ensoleillées peinturlurées en beige foncé(SO) (P5, figure 1A). Par ailleurs, une différence de plus de 3°C est mesurée entre les surfaces opaques contiguës au niveau de la façade ombragée (P15, surface opaque revêtue en gris argent et P17 paroi blanche ; figure 1B2). En fait, au niveau des façades contiguës, l'écart entre une paroi opaque ombragée, revêtue en blanc, avec un albédo élevé et une baie vitrée ensoleillée peut atteindre environ 23°C (P17, figure 1B2 et P2, figure 1A).

Ces mesures thermographiques indiquent le fort impact de l'exposition et du type de la paroi (opaque/vitré) sur la température de l'enveloppe des bâtiments urbains. En effet, la surface vitrée est beaucoup plus sensible à la chaleur que la paroi opaque, plus inerte, ce qui fait que la paroi vitrée est thermiquement beaucoup moins efficace que celle opaque (vitre et aluminium ont une faible inertie thermique et une forte conductivité). Cette dernière, quant à elle, sa température varie essentiellement en fonction de sa couleur, car, au soleil comme à l'ombre, la température des surfaces opaques blanches est toujours moins élevée que celle des parois revêtues en couleurs foncées à cause d'une différence d'albédo.

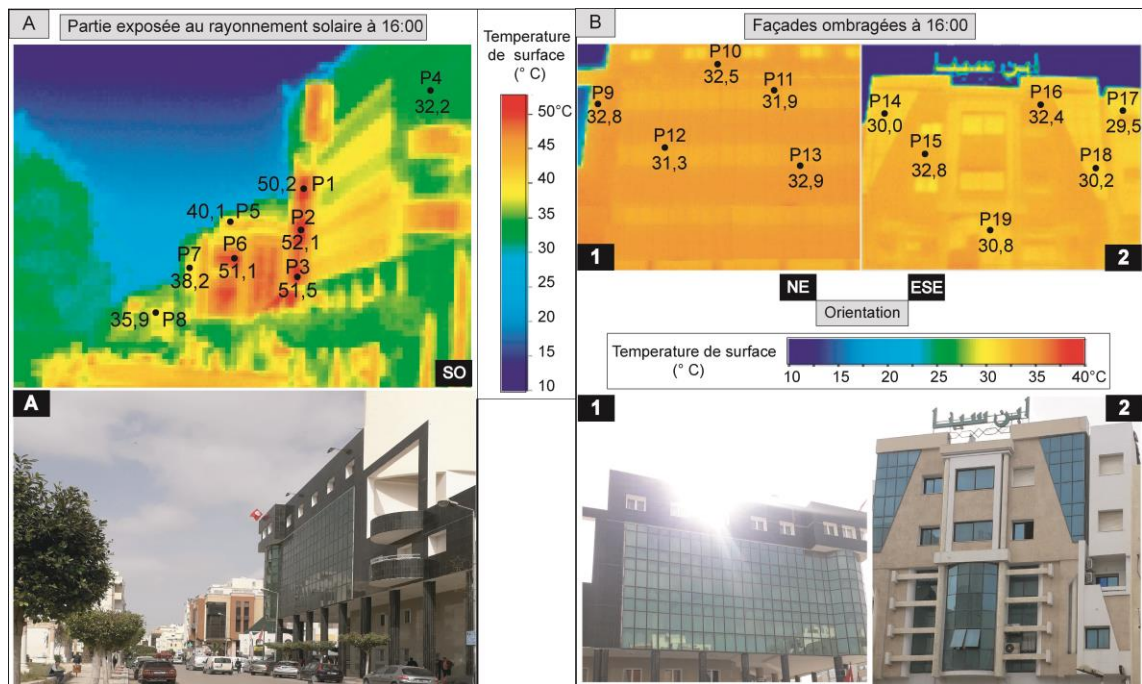


Figure 1 : Températures de surface des bâtiments obtenues à partir des mesures thermographiques effectuées le 09 août 2020 vers 16h00 (heure locale).(A) et (B2) ; Rue Ahmed Aloulou et (B1) ; Rue de Sidi Mohamed Karray. Clichés personnels.

## 2.2. Impact de l'ensoleillement et l'orientation au vent dominant sur les températures de l'air dans les quartiers du centre-ville

De même, en phase nocturne, les facteurs de l'orientation et l'exposition à la brise de mer agissent sur la répartition des températures de l'air dans les zones centrales de l'agglomération de Sfax. En effet, au niveau des quartiers centraux, significativement plus chauds que les endroits périphériques et les zones périurbaines (ICU)(Ghribi et Dahech ,2020), les températures de l'air les plus élevées sont enregistrées au niveau des artères orientées SO/NE tandis que ces valeurs diminuent légèrement en passant par les rues exposées N/S et NO/SE (figure 2). Ces dernières, sont entièrement ombragées à partir de l'après-midi et drainées par la brise de mer rafraichissante, ce qui explique les légères baisses de températures observées au niveau de ces voies par rapport aux artères orientées SO/NE et O/E les plus ensoleillées et les moins ventilées (Dahech, 2007).

Du fait que la durée d'ensoleillement est plus longue au niveau des voies exposées SO/NE, les quantités de chaleurs emmagasinées puis restituées par ces surfaces sont plus importantes que celles reçues et libérées par les rues ombragées pendant les moments les plus chauds de la journée. De ce fait, un écart de 1,2°C est calculé entre les artères exposées SO/NE et O/E telles que les avenues T2 (avenue des Martyrs), T3 (avenue Farhat Hached), T7 et T8 (avenue Habib Bourguiba)et les voies orientées NO/SE et N/S comme les rues T4, T5 et T6 drainant la brise provenant de la mer bordant l'agglomération à l'est (figure 2). De surcroît, la présence de végétation radoucit les températures au niveau de ces quartiers densément construits (Charfi et al, 2015). En effet, les rues les plus fraîches correspondent à la voie T1 jouxtant la place de Grenoble assez végétalisée (Rue Ahmed Aloulou), l'allée T4(Rue Sakiet Sidi Youssef) et l'artère T6 (Avenue Ali Belhouane) côtoyant le « jardin Dakar » (figure 2). Ces légères différences, négligeables par temps radiatif (ciel clair et vent faible), pourraient être significatives en termes de confort thermique durant les épisodes caniculaires, récurrent, en été. Pendant les périodes de canicule, l'effet combiné de la température étouffante et les taux élevés d'humidité relative augmente drastiquement les températures ressenties (indice heat index)« HI ». A titre d'exemple, une légère différence de 1 à 1,5°C avec une humidité relative de l'air très élevée de plus de 90%, peut s'élever jusqu'à 5°C en termes des températures ressenties « HI ».



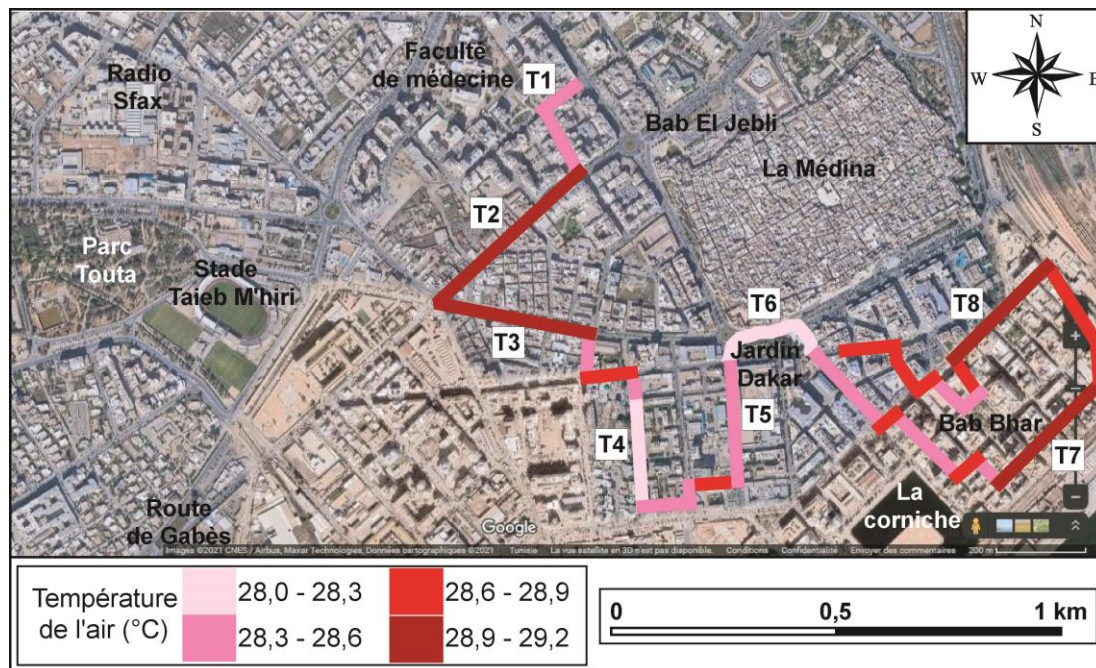


Figure 2 : Variations spatiales des températures de l'air dans les quartiers du centre-ville de Sfax, moyenne calculée d'après deux campagnes de mesures mobiles réalisées les 02 et 16 août 2020 vers 01h00 (heure locale). Fond : Google Maps 2021.

### 3. Impact de l'orientation des bâtiments et l'exposition au vent dominant sur la perception de la chaleur et la consommation de l'énergie électrique dédiée à la climatisation

Les résultats de l'enquête exploratoire, effectuée auprès de 200 ménages logeant le centre-ville de Sfax, montrent bien que les appartements sont bien équipés en climatiseurs. D'après cette enquête, le taux d'équipement moyen en climatiseurs est d'environ 1,53 climatiseurs/ménage (figure 3). De plus, les investigations indiquent que les ménages occupant des logements orientés SE, S, SW et W, les plus exposés au soleil, sont les plus équipés en climatiseurs (1,69 clim/ménage) par rapport à ceux logeant des appartements exposés NO, N, NE et E, orientés à la brise de mer (1,37 clim/ménage) (figure 3). De surcroît, plus des  $\frac{3}{4}$  des ménages occupant des logements orientés NO, N, NE et E déploient leurs climatiseurs occasionnellement, pendant la nuit et durant les périodes de canicule, tandis qu'environ la moitié des occupants des appartements exposés SE, S, SO et O utilisent la climatisation électrique d'une manière quasi-permanente durant la longue saison chaude (figure 3). En effet, les bâtiments orientés SE, S, SO et O sont exposés au rayonnement solaire de l'après-midi jusqu'à le coucher du soleil, soit environ 6 heures d'ensoleillement pendant ces moments où la température est à son paroxysme. Cependant, les ménages habitant des appartements exposés NO, N, NE et E bénéficient de l'ombre, créée par les bâtiments verticaux et volumineux du centre-ville, et de l'effet rafraîchissant de la brise marine soufflant fréquemment des secteurs E et SE (Dahech, 2007 ; Dahech, 2014). Par conséquent, les occupants des appartements orientés NO, N, NE et E présumant que leur consommation d'électricité pendant la saison chaude augmente, en moyenne, environ 2,6 fois par rapport aux quantités consommées au cours des saisons intermédiaires, contre 3 fois pour les occupants des bâtiments exposés S, SO et O (figure 4).

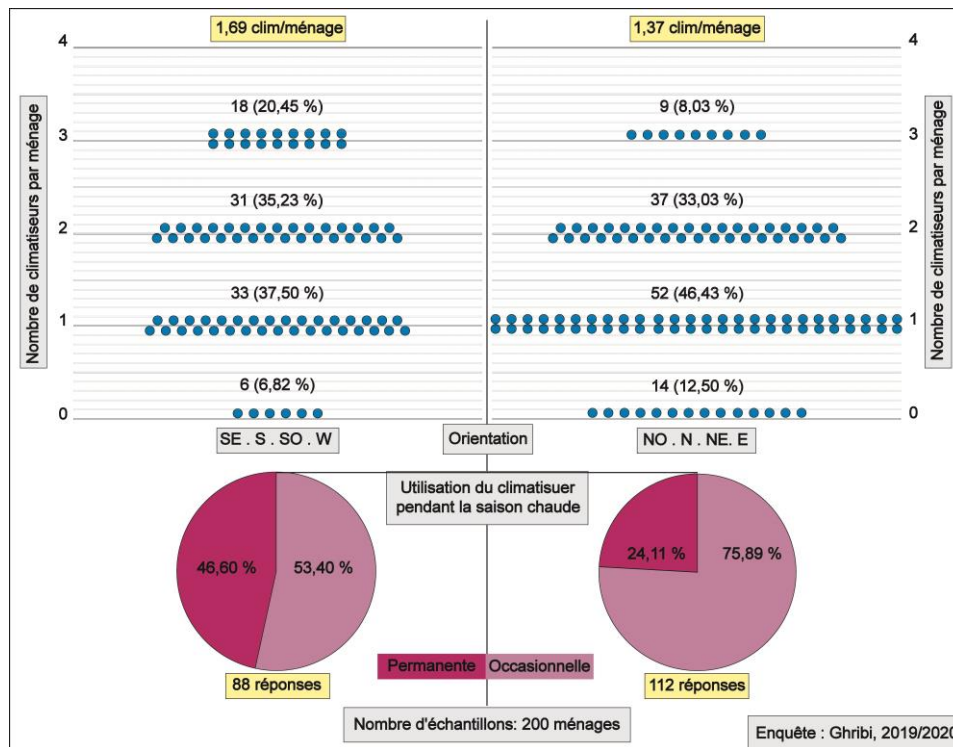


Figure 3 : Mode d'adaptation des citoyens du centre-ville de Sfax à la chaleur estivale ; nombre de climatiseurs par ménage et utilisation de la climatisation électrique en été. Données obtenues par une enquête réalisée auprès de 200 ménages pendant la saison chaude 2019 et 2020.

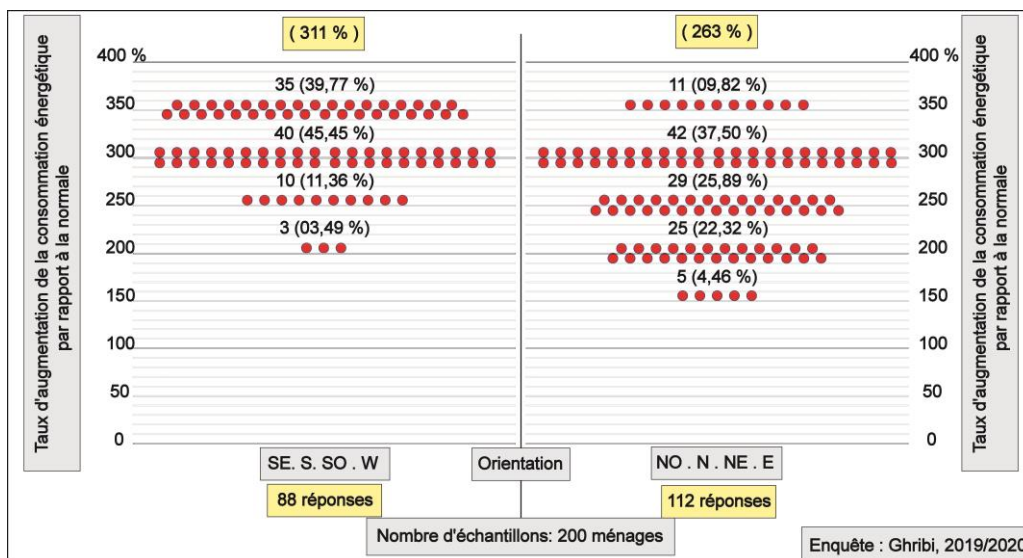


Figure 4 : Taux d'augmentation de la consommation de l'énergie électrique dédiée à la climatisation ; informations obtenues d'après une enquête aléatoire réalisée auprès de 200 ménages pendant la saison chaude 2019 et 2020.

### Conclusion :

L'exposition et les types de parois inappropriés au climat local agissent significativement sur la température de l'enveloppe des bâtiments urbains et bien entendu sur les températures intérieures. Les bâtiments orientés SO, souvent exposés au soleil, sont beaucoup moins confortables que ceux orientés généralement N et E, le plus souvent ombragés et bénéficiant de l'effet rafraîchissant de la brise de mer. De plus, la nuit, les voies orientées au vent dominant soufflant du secteur E (brise de mer) ou Ouest (brise de terre) sont moins chaudes que les artères

exposées SO/NE les plus ensoleillés. De ce fait, les bâtiments orientés SO, davantage équipés en climatiseurs, sont les moins confortables ce qui fait que les occupants de ces logements utilisent la climatisation électrique beaucoup plus que les habitants des bâtiments les plus ventilés.

En plus des facteurs étudiés, l'état de santé des occupants peut, également, être un paramètre déterminant dans la sensation de chaleur estivale et le confort thermique dans les bâtiments urbains.

Les travaux en cours de finalisation, dans le cadre de cette recherche doctorale, s'intéressent à l'étude des types de parois et leurs impacts sur les températures intérieures, la sensation de confort et la consommation de l'énergie électrique dédiée à la climatisation dans les bâtiments urbains pendant la saison chaude.

### **Bibliographie:**

- Charfi S, Krout H, Dahech S., 2015. Vegetation in the urban area of Tunis: Study of impacts on temperature and light. *Climatologie*, 6p.
- DAHECH S. GHRIBI M., (2015), Mauvaise adaptation des habitations au réchauffement estival :le cas de l'agglomération de Sfax (Centre-Est de la Tunisie), Symposium international –Vulnérabilité des littoraux méditerranéens face aux changements environnementaux contemporains, Kerkennah, octobre 2015, p. 61-70.
- Dahech S., 2007 : Le vent à Sfax (Tunisie), impacts sur le climat et la pollution atmosphérique. Thèse de doctorat de l'Université Paris VII, 309 p + annexes.
- Dahech S., 2012. Evolution de la répartition spatiale des températures de l'air et de surface dans l'agglomération de Sfax (1975-2010) et impact sur la consommation d'énergie durant la saison chaude. *Climatologie*, numéro spécial 'Climats et changement climatique dans les villes', 11-33.
- Dahech S., 2014: Impact de la brise de mer sur le confort thermique au Maghreb oriental durant la saison chaude. *Cybergéo*, 1833, 36p.
- DAHECH S. et GHRIBI M., 2018. Réchauffement climatique en ville et ses répercussions énergétiques. Cas de l'agglomération de Sfax (centre-est de la Tunisie). *Méditerranée*, 128, 29-38.
- FUJIBE F., 2011., Urban warming in Japanese cities and its relation to climate change monitoring. *Int. J. Climatol*, 31: 162–173.
- Ghribi M. et Dahech S., 2020. Caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain à Sfax durant la saison chaude (centre-est de la Tunisie). *Climatologie*, 17, 7.
- J.-P. Lagouarde, A. Hénon, M. Irvine, J. Voogt, G. Pigeon, P. Moreau, V. Masson, P. Mestayer :Experimental characterization and modelling of the nighttime directional anisotropy of thermal infrared measurements over an urban area: Case study of Toulouse (France), *Remote Sensing of Environment*, Volume 117,2012,Pages 19-33,
- Oke, T.R.,1973. City size and heat urban island. *Atmospheric Environment*., 7: 769-779.

# ANOMALIES DE PRÉCIPITATIONS AU SUD DU BRÉSIL : UNE ANALYSE PRÉLIMINAIRE DE LA SÉCHERESSE DE 2020

GOUDARD G. (1) et MENDONÇA F. A. (1)

(1) - LABOCLIMA – Laboratoire de Climatologie, Département de géographie, Université Fédérale du Paraná, Brésil. [gabigoudard.ufpr@gmail.com] [chico@ufpr.br].

**Résumé :** La connaissance des complexités inhérentes au système atmosphérique, notamment les relations atmosphère-océan-surface, est nécessaire pour expliquer la dynamique climatique et les événements extrêmes. L'année 2020 a été marquée par de très graves sécheresses dans le sud du Brésil. L'objectif principal de ce travail est d'analyser les conditions climatologiques associées à la sécheresse de 2020, ses relations avec les modèles d'interaction océan-atmosphère et ses principaux impacts dans le sud du Brésil. Les résultats indiquent les relations de la sécheresse avec El Niño Central / Modoki et les oscillations AMO et IPO, ainsi que la nécessité d'étudier les patrons de téléconnexions de manière interconnectée.

**Mots-clés :** Variabilité ; téléconnexions ; sécheresse ; Sud du Brésil

**Abstract:** Knowledge of the complexities inherent in the atmospheric system, including atmosphere-ocean-surface relationships, is necessary to explain climate dynamics and extreme events. The year 2020 was marked by very serious droughts in southern Brazil. The main objective of this work is to analyze the climatological conditions associated with the drought of 2020, its relations with models of ocean-atmosphere interaction and its main impacts in southern Brazil. The results indicate the drought relationships with El Niño Central / Modoki and the AMO and IPO oscillations, as well as the need to study the patterns of teleconnections in an interconnected way.

**Keywords:** Variability; Teleconnections; Drought; Southern Brazil

## Introduction

Les sociétés humaines sont de plus en plus exposées aux risques climatiques, donc la connaissance des complexités inhérentes au système atmosphérique, des événements extrêmes et de leurs impacts est devenue très pertinente. La variabilité climatique et les événements extrêmes sont expliqués souvent par le couplage atmosphère-océan qui génère des téléconnexions (Wells, 1998 ; Cavalcanti et Ambrizzi, 2009; Ambrizzi *et al.*, 2014).

Au sud du Brésil, qui correspond à zone d'étude de cet article (Figure 1), la plupart des catastrophes naturelles sont liées à des anomalies pluviométriques surtout positives, parmi lesquelles, les inondations urbaines se distinguent (Monteiro, 1991). Cependant, des événements d'anomalies négatives, marqués par des sécheresses, sont également enregistrés dans le temps, généralement associés aux interactions océan-atmosphère.

L'année 2020 a été marquée par de très graves sécheresses dans le sud du pays (Figure 1), en particulier dans le trimestre février-mars-avril (FMA), avec des anomalies de précipitations de -30% à -70%, aboutissant à différents impacts sur la société (Grimm *et al.*, 2020). Dans ce scénario, des impacts ont été identifiés dans les secteurs de l'agriculture (avec des pertes d'environ 40% du rendement moyen de certaines cultures), de la production hydroélectrique (effets négatifs sur les bassins versants des rivières Iguazu et Uruguay, qui représentent environ 80% de la capacité de stockage d'énergie du sous-système du Sud du Brésil) et de l'approvisionnement en eau de la population (rationnement de l'approvisionnement en eau dans quelques villes), selon Cemaden (2020) et Grimm *et al.* (2020).

Ces dynamiques sont liées à l'association de différentes oscillations climatiques (interannuelles et interdécennales), dont les effets combinés intensifient les événements climatiques extrêmes, positifs (générant des inondations et des mouvements de masse) et négatifs (provoquant des sécheresses).

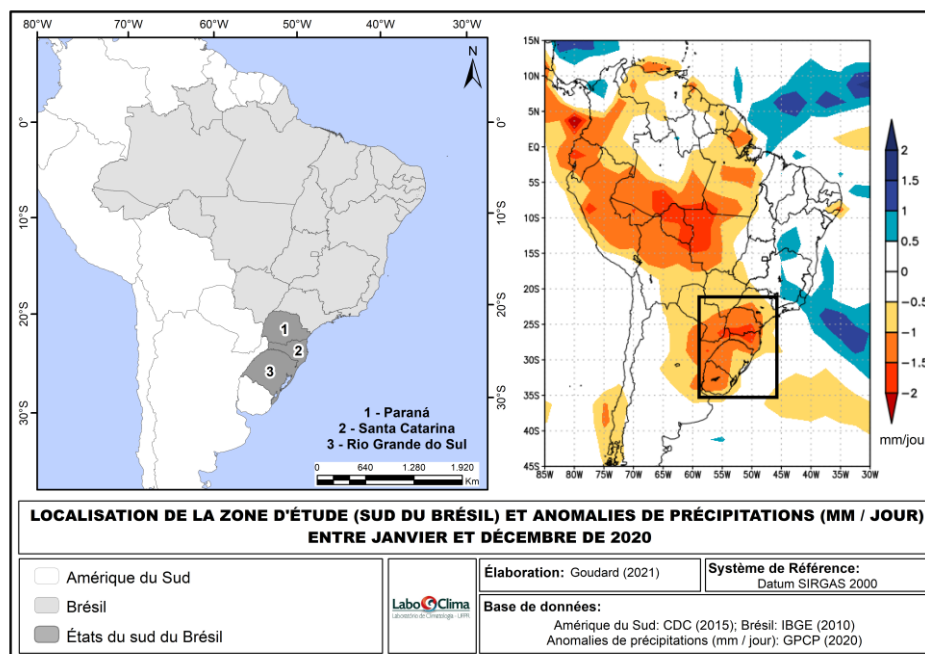


Figure 1. Localisation de la zone d'étude et des anomalies de précipitations en 2020. Réalisation: Goudard (2021).

Sur la base de ces prémisses, l'objectif de ce travail est d'analyser les conditions climatorologiques associées à la sécheresse de 2020, ses relations avec les modèles d'interaction océan-atmosphère et ses principaux impacts dans le sud du Brésil.

## 1. Données et Méthodes

### 1.1. Caractérisation de la variabilité pluviométrique

La caractérisation des anomalies de pluies a été faite à partir des données de précipitations du Centre de prévisions météorologiques et d'études climatiques (CPTEC) en ce qui concerne la variabilité mensuelle de 2020 par rapport à la période de 1981 à 2010 (climatologie), ainsi que les anomalies des périodes FMA (février – mars – avril) et SON (septembre – octobre- novembre) de 1981 à 2020. De plus, les données de précipitations mensuelles du GPCP: *Global Precipitation Climatology Project* ont été utilisées pour caractériser spatialement les anomalies pluviométriques dans le logiciel GrADS (*Grid Analysis and Display System*).

### 1.2. Identification des événements de sécheresse et analyse des impacts associés à la sécheresse de 2020

La caractérisation des événements de sécheresse était basée sur l'indice intégré de sécheresse produit par le Centre national de surveillance et d'alerte en cas de catastrophe naturelle au Brésil (CEMADEN). Cet indice est une combinaison d'informations provenant de l'indice d'approvisionnement en eau de la végétation (VSWI), qui est calculé à partir des données de télédétection (NDVI), et des données d'observation des pluies (Indice de précipitation normalisé – SPI 3, 6 et 12 mois). Les critères suivants sont pris en compte : sécheresse extrême (précipitations inférieures au 5e percentile); sécheresse sévère (précipitations entre les 5e et 10e percentiles); sécheresse modérée (précipitations entre le 10e et le 30e percentiles); sécheresse faible (précipitations entre le 30e et le 50e percentiles).

### 1.3. Vérification des relations établies avec des téléconnexions climatiques

La vérification des relations établies avec des téléconnexions climatiques a été basée sur les données de la littérature (Grimm *et al.*, 2020). De plus, les données mensuelles de température de surface de la mer - TSM (grille de 2° - NOAA\_ERSST\_V5), de rayonnement à ondes longues

(ROL) et des précipitations du GPCP ont été utilisés pour caractériser les oscillations climatiques liées à la sécheresse étudiée dans cet article. Ces données ont été téléchargées au Laboratoire des Sciences Physiques (PSL/NOAA) pour la période de 1950 à 2020.

## 2. Résultats et discussion

Le sud du Brésil est situé dans un climat subtropical (typologies Cfa et Cfb, selon la classification de Köppen), étant marqué par des saisons bien définies, des régularités dans la distribution des précipitations tout au long de l'année et des amplitudes thermiques marquées (Alvares *et al.*, 2013). Cependant, cette région est également marquée par des événements extrêmes, positifs et négatifs.

L'année de 2020 a été marquée par de très graves sécheresses dans le sud du pays (Figure 1 ; Figure 2). Les anomalies de pluies négatives étaient plus présentes dans les périodes de FMA (février – mars – avril) et SON (septembre – octobre- novembre), tel qu'indiqué sur la figure 2a. Il est également à noter que ces périodes (FMA – principalement) avaient déjà présenté une prédominance d'écart pluviométriques négatifs depuis la fin des années 1990 (Figures 2b et 2c), aggravant la situation qui est déjà défavorable pour la disponibilité des ressources en eau.

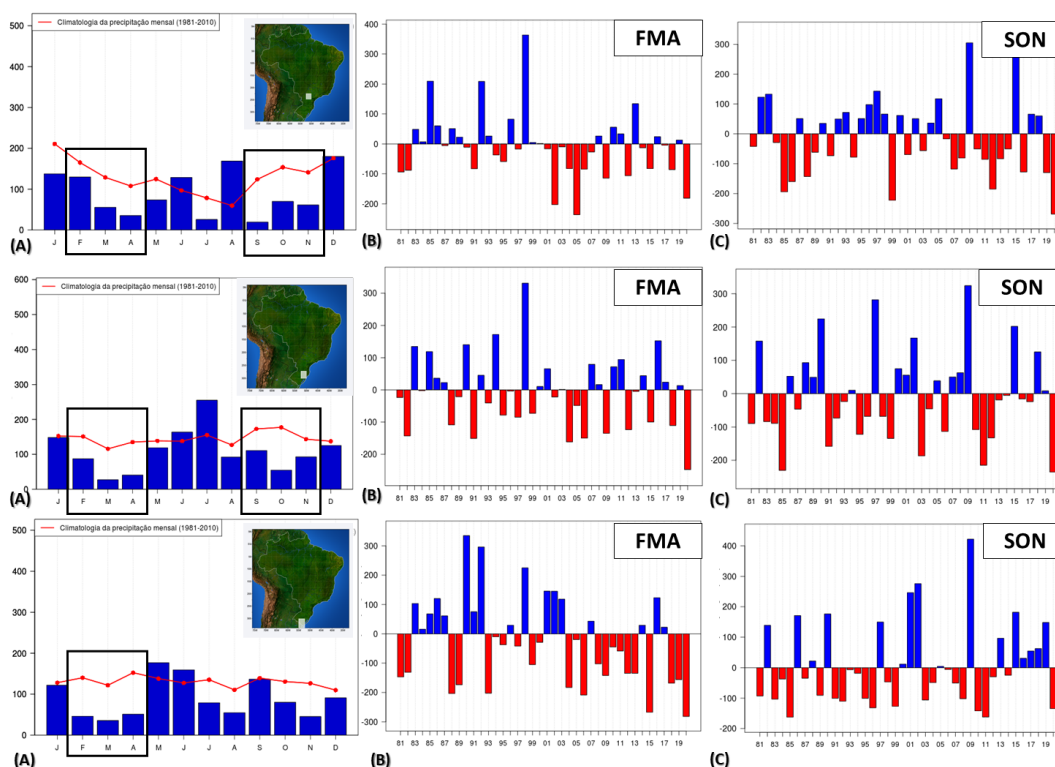


Figure 2. (A) Précipitations mensuelles (mm - bleu) en 2020 par rapport aux normales de la période de 1981 à 2010 (ligne rouge) et des anomalies (mm/année) dans les périodes FMA (1981 – 2020) – (B) et SON (1981 – 2020) – (C).

La période FMA était la plus importante pour la crise de l'eau de 2020 (Grimm *et al.*, 2020), avec des anomalies variant entre -175 et -300 mm (Figure 2b) et entre -1 à -4 mm/jour (Figure 3a) en 2020, concentrée principalement à l'ouest du Rio Grande do Sul (Figure 3a). En ce qui concerne la sécheresse, on peut observer des conditions exceptionnelles et extrêmes à l'ouest du Rio Grande do Sul et des conditions variant de faible à sévère dans d'autres régions du sud du Brésil pour le mois d'avril (sur 3 mois, Figure 3c).

Pour la période SON, des anomalies allant de -125 à -275 mm (Figure 2c) et de -1 à -4 mm/jour (Figure 3b) ont été observées au sud du Brésil en 2020, étant plus concentrée dans l'extrême ouest des états de Santa Catarina et du Paraná (-4 mm/jour). La sécheresse a été classée entre faible à

exceptionnelle, étant notamment modérée dans le sud du Brésil en novembre de 2020 (sur 3 mois, Figure 3d).

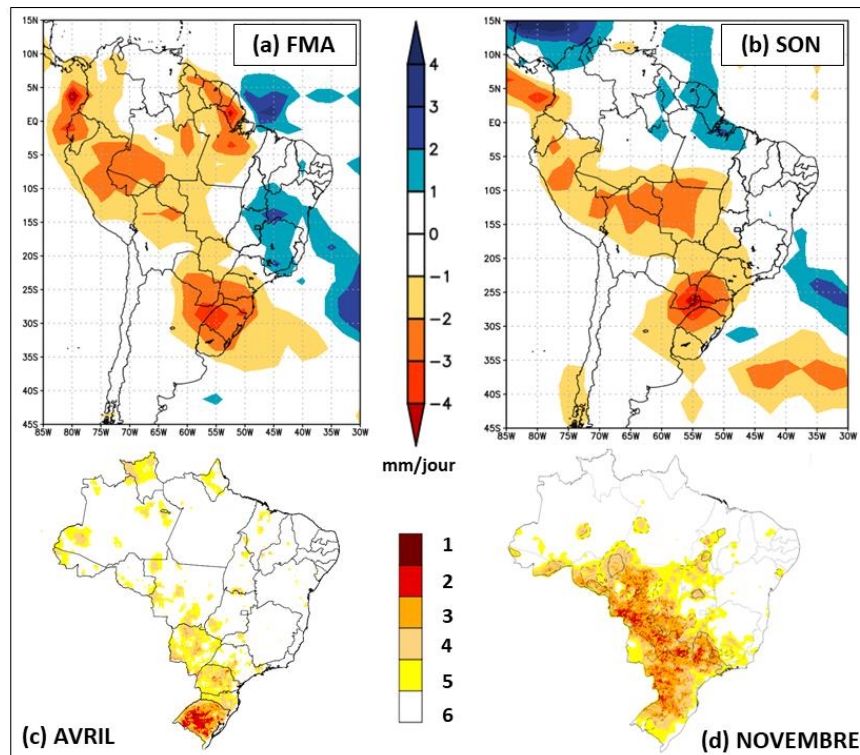


Figure 3. Anomalies des précipitations (mm/jour) en (a) février – mars – avril (FMA) et (b) septembre – octobre – novembre (SON) de 2020 par rapport à 1981-2010 (normales) et l'Indice de sécheresse intégré de 3 mois pour avril (c) et novembre (d). Légende : 1 - Sécheresse exceptionnelle ; 2 - Sécheresse extrême ; 3 - Sécheresse sévère ; 4 - Sécheresse modérée ; 5 – Sécheresse faible ; 6 - Condition normale. Base de données : GPCP (2020), CEMADEN (2020).

Il convient de noter que d'autres mois de l'année 2020 ont également enregistré des anomalies négatives par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 (Figure 2a). Cependant, en particulier le trimestre FMA de 2020 a été une période très sèche dans le sud du Brésil, précédée de quelques mois secs en 2019 (fin de l'hiver et début du printemps dans l'hémisphère sud en 2019). Par conséquent, de nombreux impacts ont été enregistrés en agriculture, dans la production hydroélectrique et l'approvisionnement en eau de la population (CEMADEN, 2020).

Ces variations de précipitations s'expliquent par les fluctuations naturelles du climat, qui sont configurées comme des éléments importants pour les événements extrêmes (Grimm et Tedeschi, 2009 ; Tedeschi *et al.*, 2015, 2016). Ainsi, en ce qui concerne la relation entre les anomalies de pluies négatives en 2020 et les téléconnexions climatiques, des études de Grimm *et al* (2020) ont démontré la combinaison de phases d'oscillations climatiques d'origines et d'échelles de temps différentes pour la période de FMA: la phase positive de l'Oscillation Multidécennale de l'Atlantique (AMO), la phase négative de l'Oscillation Interdécennale du Pacifique (IPO) et ; un El Niño - Oscillation Australe (ENSO) / Modoki (interannuelle) présent entre octobre 2019 et avril 2020 (Grimm *et al*, 2020).

L'ENSO, marqué par le réchauffement (El Niño) / refroidissement (La Niña) du centre-est du Pacifique, est le principal mode de variabilité interannuelle au Brésil, avec des effets différents, selon ses types : Conventionnel, Modoki / Central ou Mixte (Cai *et al*, 2020). L'ENSO Modoki, où le maximum d'anomalie de la TSM se produit dans le Pacifique Central, est parfois marqué

par la diminution des précipitations dans le sud du Brésil, contrairement à ce qui se passe habituellement (Tedeschi *et al.*, 2015, 2016 ; Cai *et al.*, 2020).

Selon Grimm *et al* (2020) l'Oscillation Multidécennale de l'Atlantique (AMO) est une oscillation multidécennale (65–70 ans) en Atlantique Nord et l'Oscillation Interdécennale du Pacifique (IPO) est une oscillation décennale à multidécennale dans le bassin du Pacifique. Les deux ont des effets sur les précipitations (habituelles et exceptionnelles). La figure 4 met en évidence les effets de ces processus au cours de période de FMA entre 1950 et 2020 pour la zone d'étude.

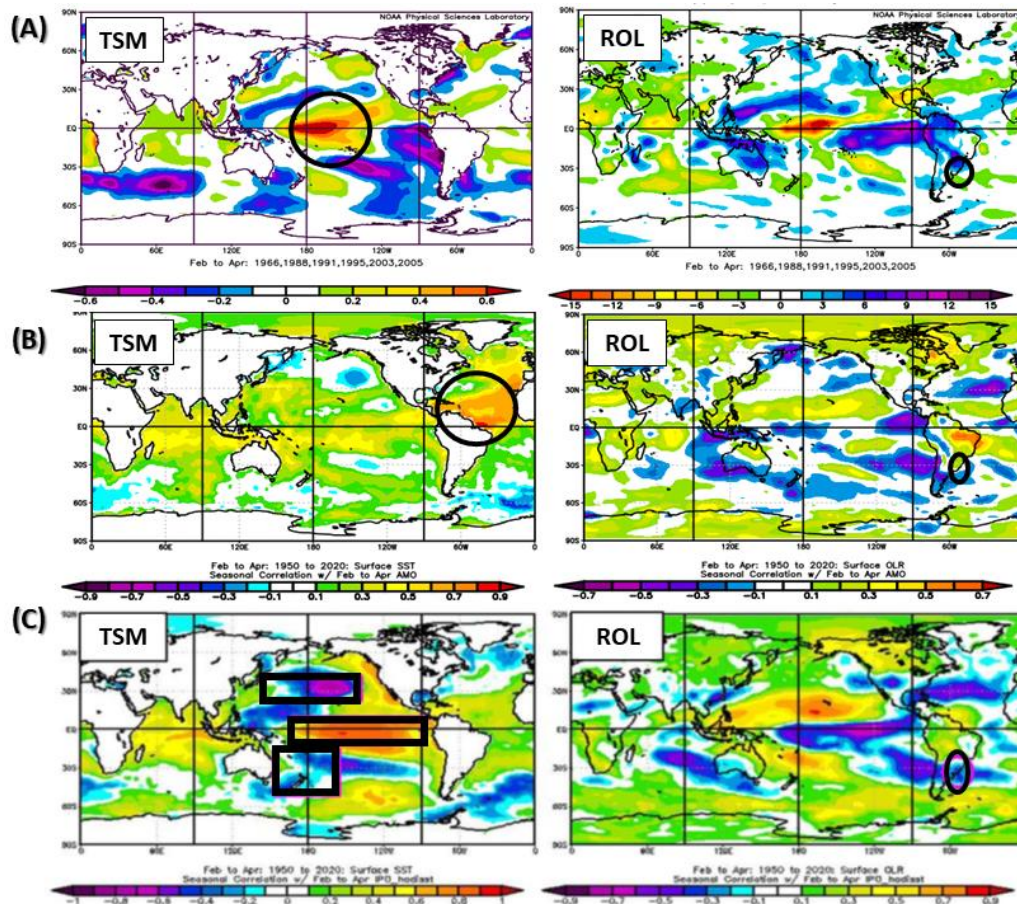


Figure 4. (A) – Caractérisation de la TSM et ENOS Modoki en FMA et ROL - rayonnement ondes longues (positif = moins de pluie). (B) - Corrélation entre TSM et AMO (positif) en FMA (1950-2020) et ROL - rayonnement ondes longues (positif = moins de pluie). (C) - Corrélation entre TSM et IPO\* (positif) en FMA (1950-2020) et ROL - rayonnement ondes longues (négative = plus de pluie). \*négative en 2020. Adapté de Grimm *et al* (2020).

Ainsi, on note que dans les périodes d'El Niño Central / Modoki, de phase positive d'AMO et de phase négative d'IPO entre les mois de FMA, des déficits de précipitations dans le sud du Brésil sont observés (Figure 4). Selon Grimm *et al* (2020), ces configurations étaient responsables de la sécheresse de 2020 entre les mois de février, mars et avril (FMA).

Dans le mois de septembre, octobre et novembre (SON), les anomalies négatives de pluies sont associées à La Niña, qui s'est formée en juillet 2020 et persiste jusqu'à maintenant - avril 2021 (CPC/NOAA, 2021) dans le centre-est du Pacifique. En général, dans les événements La Niña, des déficits pluviométriques se produisent dans le sud du Brésil (Grimm et Tedeschi, 2009 ; Cai *et al.*, 2020).



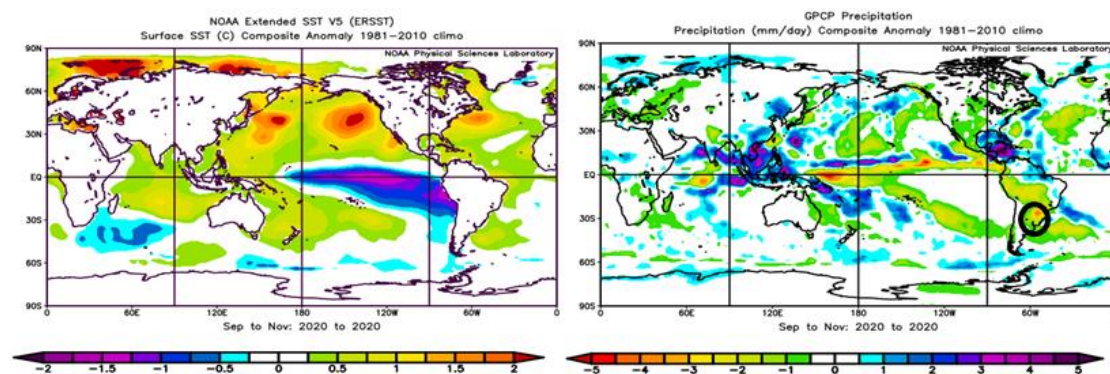


Figure 5. Anomalie de la TSM (°C) et de pluie - GPCP (mm/jour) entre septembre et novembre 2020. Base de données : PSL / NOAA (2021).

## Conclusion

Le présent travail a permis de vérifier la configuration de la sécheresse de 2020, en termes d'anomalies pluviométriques dans le sud du Brésil, notamment dans les mois de FMA et SON. Les résultats ont montré des associations entre les oscillations climatiques telles qu'El Niño Central / Modoki, la phase positive de l'AMO et la phase négative de l'IPO dans le FMA, ainsi que La Niña pour expliquer la période de SON. Ces dynamiques démontrent la complexité de l'atmosphère et la nécessité d'étudier les patrons de téléconnexions de manière interconnectée.

**Remerciements:** À CAPES (Ministère de l'Éducation du Brésil) pour le support financier de cette recherche.

## Bibliographie

- Alvares, C.A.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C; Gonçalves, J.L.M; Sparovek, G. 2013 : Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 22, n°. 6, 711–728.
- Ambrizzi, T.; Sacco, M.A.L.; Ferraz, S.E.T. 2014: A importância das teleconexões para a Previsão Sazonal. *Ciência e Natura*, vol. 36, p. 137-148.
- Cai, W. et al. 2020: Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), 215-231.
- CPC. 2021: Historical ENSO episodes. Climate Prediction Center/ NOAA. <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/>
- CPTEC. 2020: Evolução mensal e sazonal das chuvas. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. <http://clima1.cptec.inpe.br/evolucao/pt>
- CEMADEN. 2020: *Monitoramento de secas e impactos no Brasil*. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. <http://www.cemaden.gov.br/>
- Cavalcanti, I.F.A.; et Ambrizzi, T. 2009: Teleconexões e suas influências no Brasil. In: Cavalcanti, I. F. A.; Ferreira, N. J.; Silva, M.G.A.J.; Dias, M.A.F.S. (Orgs). *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Grimm, A.M.; Tedeschi, R.G. 2009: ENSO and extreme rainfall events in South America. *Journal of Climate*. 22: 1589–1609.
- Grimm, A. M., et al. 2020: The combined effect of climate oscillations in producing extremes: the 2020 drought in southern Brazil. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos/ Brazilian Journal of Water Resources*, 25.
- Tedeschi, R. G., Grimm, A. M., & Cavalcanti, I. F. A. 2015: Influence of Central and East ENSO on extreme events of precipitation in South America during austral spring and summer. *International Journal of Climatology*, 35(8), 2045-2064. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.4106>.
- Tedeschi, R. G., Grimm, A. M., & Cavalcanti, I. F. A. 2016: Influence of Central and East ENSO on precipitation and its extreme events in South America during austral autumn and winter. *International Journal of Climatology*, 36(15), 4797-4814. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.4670>.
- Wells, N. 1998: *The atmosphere and ocean: a physical introduction*. 2<sup>a</sup>ed. Chichester: John Wiley & Sons.

# ETUDE EXPLORATOIRE DE LA MIGRATION CLIMATIQUE AU SENEGAL

Hamid M.<sup>1</sup> et Reddad H.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire DPRP, Université El Ghachi, Univ. Sultan Moulay Slimane, B.P: 524, Beni Mellal, Maroc

**Résumé :** Dans un contexte marqué par une préoccupation majeure aux impacts néfastes du changement climatique sur l'humanité, la migration climatique ou environnementale attire l'attention de la communauté internationale, et s'impose de plus en plus comme l'impact le plus marqué de ce changement. En fait, le climat façonnait l'histoire de la mobilité humaine depuis l'apparition des premiers Hommes. Cependant, les progrès scientifiques et techniques ont marginalisé son rôle au profit des facteurs politiques et économiques. Aujourd'hui, la migration climatique ou environnementale a refait surface en s'imposant comme le résultat le plus probable et le plus logique des changements environnementaux. Du fait que les manifestations du changement climatique, ne cessant de s'accroître, pourraient affecter progressivement les capacités limitées d'existence de certaines populations, en les rendant plus vulnérables et incapables de faire face à une telle situation. Dans ce contexte, l'augmentation incessante des migrants provenant de la zone sahélienne, étant considérée parmi les régions les plus souffrantes des changements environnementaux et plus vulnérables aux aléas climatiques, nous amène à s'interroger s'il y a une relation significative entre cette migration et le changement environnemental sévissant dans cette région. En se penchant sur l'exemple de la migration sénégalaise, et en partant d'une hypothèse qui suggère que la migration sénégalaise pourrait être une résultante, d'une manière directe ou indirecte, totalement ou partiellement du changement climatique affectant cette région, la présente étude, adoptant une approche exploratoire, basée sur une étude de la variabilité du régime pluviométrique au Sénégal, et un travail de terrain, mené auprès des immigrants sénégalais vivant à Tanger, nous a permis de tirer un ensemble de résultats, révélant la réalité de phénomène de la migration climatique au Sénégal.

**Mots clés :** migration climatique, changement climatique, environnement

**Abstract:** In a context marked by a major concern for the harmful impacts of climate change on humanity, climatic or environmental migration is attracting the attention of the international community, and is increasingly establishing itself as the most marked impact of this change. In fact, the climate has shaped the history of human mobility since the appearance of the first humans. However, scientific and technical progress has marginalized its role in favor of political and economic factors. Today, climate or environmental migration has resurfaced as the most likely and logical outcome of environmental change. As the manifestations of climate change, steadily increasing, could gradually affect the limited livelihoods of some populations, making them more vulnerable and unable to cope with such a situation. In this context, the incessant increase in migrants from the Sahelian zone, being considered among the regions most suffering from environmental changes and most vulnerable to climatic hazards, leads us to question whether there is a significant relationship between this migration and environmental change in this region. By looking at the example of Senegalese migration, and starting from a hypothesis which suggests that Senegalese migration could be a result, in a direct or indirect way, totally or partially of the climate change affecting this region, the present study, adopting an exploratory approach, based on a study of the variability of the rainfall regime in Senegal, and field work, carried out with Senegalese immigrants living in Tangier, allowed us to draw a set of results, revealing the reality of the phenomenon of climate migration in Senegal.

**Keywords:** climate migration, climate change, environment

## 1. Introduction

Depuis la prise de conscience du changement climatique, l'intérêt de la communauté internationale s'est focalisé sur les impacts du changement climatique sur les populations. Le GIEC a déclaré que l'impact le plus marqué de l'évolution du climat pourrait être ressenti au niveau des migrations humaines. Du fait que ses manifestations pourraient affecter les capacités limitées des populations vulnérables et les pousser à se déplacer. Dans ce contexte, plusieurs études se sont penchées sur cette thématique. Néanmoins, la rareté des études empiriques et la peur de tomber dans le déterminisme rendent l'incertitude et la controverse les caractères éminents de cette thématique (Piguet et al., 2011).

De ce fait, la présente étude vise à explorer la réalité de ce phénomène en se penchant sur un exemple empirique, s'incarnant dans la migration sénégalaise. En fait, cette migration se déclenche dans un pays de Sahel, cette région souffrant d'un ensemble des problèmes environnementaux, notamment ceux qui sont liés aux sécheresses récurrentes qu'elle a vécues. Elle est également considérée parmi les régions les plus menacées par le changement climatique. En outre, la population sénégalaise est connue par sa vulnérabilité et aussi par sa mobilité.

Alors, la coexistence de tous ces éléments, sur ce territoire, nous amène à s'interroger s'il y'a une relation significative entre cette mobilité et les changements environnementaux sévissant dans cette région, et se manifestant fortement au niveau du régime pluviométrique. Pour aboutir à notre subtilité, deux modalités inter-complémentaires ont été utilisées : étude de la variabilité du régime pluviométrique au Sénégal et questionnaire adressé à un échantillon d'immigrés se trouvant au Maroc (précisément à Tanger).

## 2. Présentation de la zone d'étude :

Le Sénégal est un pays subsaharien, situé sur la pointe extrême occidentale du continent africain, entre 12,5° et 16,5° de latitude nord et 12° et 17° de longitude ouest. Il est un pays extrêmement plat, le relief ne dépasse pas 500 m d'altitude. Pourtant, les estuaires sont majoritairement en dessous du niveau de la mer. Son climat est de type sahélien au nord et de type tropical au sud. Il comporte une saison des pluies (juin à octobre) et une saison sèche qui dure le reste de l'année.

Au niveau économique, le pays est classé par la Banque mondiale (2010) comme pays à revenu intermédiaire, avec un taux de pauvreté de 46.7% (ANSD, 2010/2011) et un taux de chômage atteignant 15.7 % (ANSD, 2015).

En général, l'économie du pays se repose sur deux secteurs principaux :

L'agriculture: est essentiellement pluviale et saisonnière. Elle emploie une grande partie de la population. Malgré les efforts fournis soit par la population ou par l'état ; Ce secteur reste traditionnel et fragile. Il souffre fortement de la désertification, la dégradation des sols et la pénurie des ressources en eau.

La pêche : Ce secteur profitant d'un littoral de plus de 700 km, joue un rôle important dans l'économie du Sénégal. Il emploie environ de 600 000 Sénégalais (ISS, Institut d'études de sécurité - rapport 2016). Malgré son apport primordial dans la sécurité alimentaire au pays, ce secteur reste très fragile. Il souffre fortement de la surexploitation (M. Kébé, 2008), et sa productivité est soumise à des variations liées au phénomène d'upwelling.

## 3. Données et méthodes :

Les données climatiques ont été obtenues auprès de deux sources web KNMI Climate Explorer et Climate Change Knowledge Portal. Elles concernent les données pluviométriques couvrant la période (1933- 2016), réparties sur quatre stations représentant les quatre principales zones climatiques au pays. Les données concernant l'impact du changement climatique sur la migration de la population sont recueillies auprès d'un échantillon statistiquement déterminé concernant 26 immigrés sénégalais vivant à Tanger.

Figure 33: Carte de Sénégal

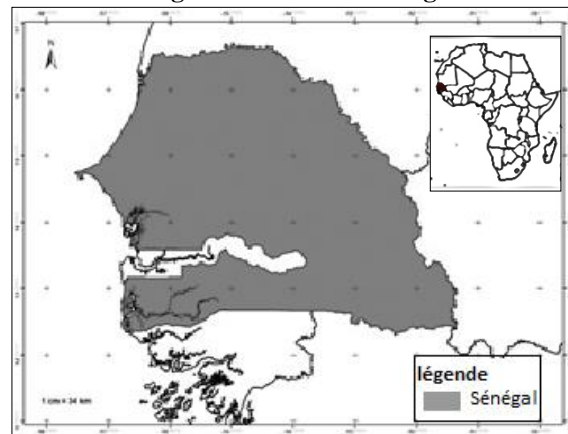
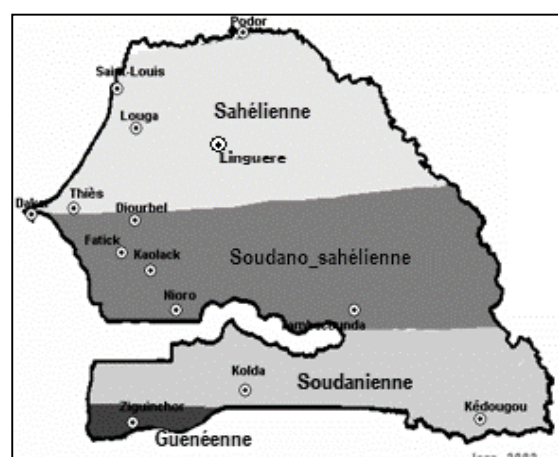


Figure 34: Zones climatiques au Sénégal



Parmi tant d'approches qui permettent d'analyser la variabilité climatique, cette étude a opté pour les indices et les tests suivants :

### 3.1. Coefficient de variation (CV) :

Il s'agit d'une mesure relative de la dispersion des données autour de la moyenne. Le coefficient de variation se calcule comme le ratio de l'écart-type rapporté à la moyenne, et s'exprime en pourcentage.  $CV = \frac{\delta}{\bar{x}}$

### 3.2. Indice de la pluviométrie standardisée (IPS) :

C'est un indice pluviométrique créé par McKee et al. (1993), permettant de déterminer le caractère humide ou sec d'une période et mesurer la sécheresse météorologique. Le calcul de l'indice IPS se fait via l'équation suivante :

$$I_{Si} = \frac{\sum_{j=1}^{N_j} (P_j^i - \bar{P}_j) / \sigma_j}{N_j}$$

- $P_j^i$  : la pluie de l'année  $i$  à la station  $j$
- $\bar{P}_j$  : la pluie moyenne interannuelle de la station  $j$
- $\delta$  : l'écart type de la série de la station  $j$
- $N_j$  : le nombre des stations de l'année  $i$

### 3.3. Tests statistiques de stationnarité/homogénéité :

Il s'agit de test de Buishand, test de Pettitt et test d'Hubert. Ils permettent d'étudier la variabilité temporelle et détecter les ruptures. Ils sont calculés via le logiciel Khronostat, réalisé par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et l'université de Montpellier.

#### 3.3.1. Test de Buishand :

C'est un test paramétrique, construit à partir des écarts cumulés à la moyenne. Il suppose un non changement de la variance de la série. L'absence de rupture dans la chronique constitue l'hypothèse nulle  $H_0$ . Pourtant, un changement brutal dans la moyenne renvoie à l'hypothèse alternative  $H_1$ .  $U = \sum_{k=1}^{N-1} (S_k / D_X)^2 / N(N+1)$  Avec  $S_k = \sum_{t=1}^k (x_t - \bar{X})$

#### 3.3.2. Test de Pettitt :

C'est un test non paramétrique appliqué sur les chroniques non stationnaires. L'hypothèse nulle renvoie à l'absence de rupture dans la chronique. La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant  $t$  compris entre 1 et  $N$ , les séries chronologiques  $(x_i)$   $i = 1$  à  $t$  et  $t + 1$  à  $N$  appartiennent à la même population. La variable utilisée pour tester  $h_0$  est :

$$kn = \max |U_{t,N}| \text{ avec } U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij}, D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j) \text{ avec}$$

- avec  $\text{sgn}(x) = 1$  si  $x > 0$
- $\text{sgn}(x) = 0$  si  $x = 0$
- $\text{sgn}(x) = -1$  si  $x < 0$ . ( $x = x_i - x_j$ )

Si l'hypothèse nulle est rejetée, on parle d'une rupture dont l'estimation de sa date est donnée par l'instant  $t$ , qui renvoie au maximum de la valeur absolue de la variable  $U_{t,N}$ .

#### 3.3.3. Test de segmentation d'Hubert :

Le principe de ce test, permettant à déterminer la date de rupture, réside dans le découpage de la série  $x$  en  $m$  segments ( $m > 1$ ) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment(s) voisin(s). La segmentation est définie de la façon suivante : Toute série  $x_i$   $i = i_1, i_2$  avec  $i_1 \geq 1$  et  $i_2 \leq N$  ou  $(i_1 < i_2)$  constitue un segment de la série initiale des  $(x_i)$   $i = 1, \dots, N$

#### 4. Résultats et discussion

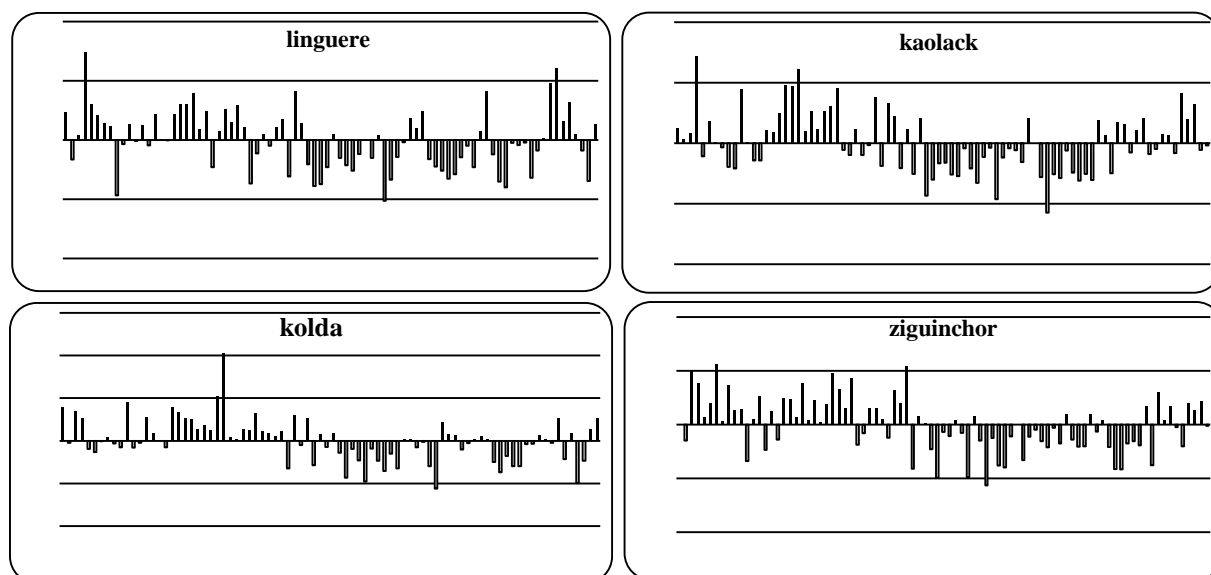
Le coefficient de variation obtenu dans les quatre stations varie entre 21% et 30%. Les valeurs les plus élevées sont observées dans les stations situées au centre et au nord du pays, tandis que les faibles valeurs sont enregistrées au sud (tableau 1). De ce fait, il s'avère que le régime pluviométrique au Sénégal se caractérise par une variation interannuelle dont la l'intensité est très importante au centre et au nord qu'au sud du pays.

L'analyse de l'indice de pluviométrie standardisé au niveau de l'ensemble des quatre stations, pendant la période (1933-2016) confirme également la variabilité interannuelle de régime pluviométrique au Sénégal (graphique 1). En fait, Une phase relativement humide a marqué ce régime entre 1901 et 1967. Néanmoins, à partir des années soixante, les précipitations ont enregistré une baisse remarquable. Dernièrement, une légère tendance à la hausse a été enregistrée, mais sa moyenne annuelle reste encore très inférieure à celle de la période (1901-1967).

**Tableau 6: Caractéristiques des stations retenues**

Station	Lat	Long	Alt (m)	Date	Moy. Ann de précip (mm)	Ecart type	C.V(%)
Linguère (Nord)	15.4	-15.1	21	1933/2016	457.51	133.84	29.47
Kaolack (Centre)	14.13	-16.07	7	1933/2016	682.66	202.37	29.64
Kolda (Sud)	12.9	-14.9	22	1933/2016	1094.74	259.24	23.68
Ziguinchor (Extrême sud)	12.6	-16.3	19	1930/2016	1369.32	296.68	21.67

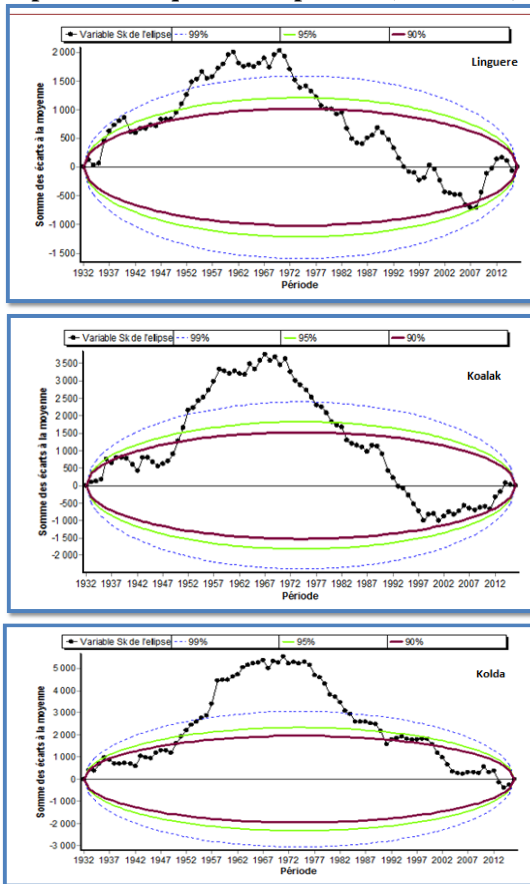
Suite à une ressemblance caractérisant le régime pluviométrique, dans les deux stations de **graphique 1: valeurs annuelles de l'IPS pour des stations pluviométrique sur la période (1903-2016)**



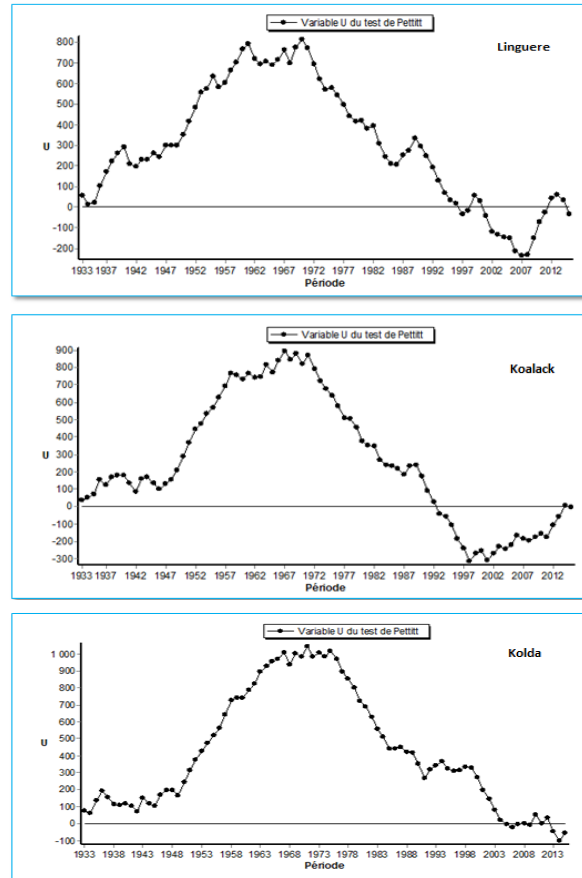
Sud, les tests de stationnarité ont été appliqués seulement sur les trois stations suivantes : Linguère, Kaolack et Kolda. Selon le test de Buishand, l'hypothèse nulle (absence de rupture) est rejetée, dans les trois stations, à un seuil de confiance de 99% (figure 3). Même résultat a été

obtenu d'après le test de Pettitt (figure4). Alors, la rupture est significative pour l'ensemble de stations. Pourtant sa date se diffère d'une station à l'autre.

**Figure 3: Test de Buishand pour les stations pluviométriques sur la période (1903-2019)**



**Figure 4: Test de Pettitt pour les stations pluviométriques sur la période (1903-2016)**



Les résultats de segmentation d'Hubert, montrent que la rupture a touché au début la partie Sud du pays, puis elle s'étend progressivement vers le Nord. Néanmoins, la baisse de la pluviométrie, pendant la période de rupture, est plus remarquable au nord qu'au sud (Linguère : -44.52%, Kaolack : -32.27% et Kolda :-16.03%).

L'étude de la variabilité climatique au Sénégal a montré alors, que le climat dans ce pays se caractérise par une forte variabilité interannuelle, dont l'intensité est plus importante au centre et au nord du pays. Ces résultats se conforment à un ensemble d'étude menées dans cette région (Ndong, JB. ,199 ; Bodian, A., 2014...etc.). En effet, le régime pluviométrique au Sénégal a connu, dans les années soixante, une rupture brutale, s'est manifestée par une diminution de précipitations, persistant jusqu'aujourd'hui, en atteignant une réduction de 18% par rapport à la période avant la rupture (1933-1967). Le nombre des années sèches, après la rupture (1968-2016), a dépassé 35 années sur un total de 48 années, avec sept années étaient très sèches.

D'autre coté, les résultats de l'enquête se corroborent fortement avec ceux de l'étude climatique. En fait, la majorité des migrants enquêtés ont confirmé que le Sénégal souffre d'un changement climatique, impactant fortement le régime pluviométrique et se manifestant généralement sous formes des sécheresses récurrentes. En outre, ils ont déclaré que ces sécheresses qui sont accompagnées à d'autres perturbations environnementales, à savoir : augmentation de la température, dégradation environnementale...etc., ont affecté négativement les conditions de vie de la population, en engendrant une baisse de récoltes, une mortalité de bétails, une récession de la pêche et aussi une récession économique avec une augmentation des prix et exacerbation de chômage.

En effet, plus de 60% des enquêtés ont confirmé que leurs ménages souffrent de ces répercussions. En revanche, environ de 46% de migrants ont affirmé que leur décision de migrer était fortement liée à ces perturbations environnementales et ses répercussions, qui ont impacté négativement les capacités limitées de leur vie. Les résultats de l'enquête a permis de mettre en lumière également l'existence d'une corrélation très significative entre la migration liée aux facteurs environnementaux et l'activité exercée par le responsable du ménage de migrant, du fait que cette migration concerne essentiellement les ménages, dont le responsable exerce une des activités étant vulnérables face aux conditions environnementales, à savoir la culture, l'élevage du bétail ou la pêche...etc.

**Tableau 7: Résultats du test de segmentation d'Hubert sur la période (1933-2016)**

Stations	Date de rupture		Moyenne	Ecart type
	Début	Fin		
Linguère	1933	1970	510.94	122.04
	1971	2007	283.446	104.79
	2008	2016	536.44	156.27
Kaolack	1933	1967	795.55	195.22
	1968	1998	535.17	143.13
	1999	2016	743.82	133.64
Kolda	1933	1956	1224.32	188.51
	1957	1958	1891	369.11
	1959	2016	1028	217.77

## 5. Conclusion

Les résultats de cette étude, nous amènent, à accepter de mettre une partie de la migration sénégalaise dans le cadre de migration climatique / environnementale, du fait, qu'elle est liée d'une manière ou d'une autre aux répercussions des perturbations climatiques et environnementales qu'a connues le pays. Ces perturbations qui sont manifestées fortement sous forme de sécheresses récurrentes, et ont impacté négativement la population, dont les capacités d'existence sont limitées et dépendent fortement à l'environnement.

## Bibliographie

- Brown, O., 2008 : *Migrations-et-changements-climatiques*. OIM, 60p.
- GIEC, 2008 et 2014 : *Changements Climatiques 2007 et 2013*
- Kébé, M., 2008 : *Le secteur des pêches au Sénégal : Tendances, enjeux et orientations politiques, Programme KURUKAN FUGAN, 2008*. Union Européenne/Gouvernement du Sénégal/Enda Graf/GRET.
- Dominique R.**, 2008. Partir pour mieux durer : la migration comme réponse à la sécheresse au Sénégal ? », *Espace populations sociétés*, **1**, 37-53.
- Gemene, F., Cavicchioli, A., 2010. Migrations et environnement : prévisions, enjeux, gouvernance. *Regards croisés sur l'économie*, **2**, 84-91.
- Ndong, J.B., 1995. L'évolution de la pluviométrie au Sénégal et les incidences de la sécheresse récente sur l'environnement. *Revue de géographie de Lyon*, 193-198.
- Piguet, É., Antoine P., et Paul de G., 2011. Changements climatiques et migrations : quels risques, quelles politiques ? ». *L'Information géographique*, **4**, 86-109.
- Sebbar A, Badri W, Fougrach H, Hsaine M, Saloui A, 2011, Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004), *Sècheresse* **22**, p141.

# ÉVALUATION DE LA SÉCHERESSE CLIMATIQUE ET DE SON IMPACT SUR LE PLAN D'EAU DU BARRAGE AL WAHDA (MAROC)

Hanchane M., Addou R., Elkhazzan B. et Souab M.

*FLSH Dhar El Mahraz (USMBA Fès, Maroc), Laboratoire Territoire, Patrimoine, Histoire;  
mohamed.hanchane@usmba.ac.ma*

**Résumé :** La présente étude évalue l'impact de la sécheresse sur l'étendue du barrage AL Wahda, faisant partie de la montagne rifaine marocaine et du bassin versant de l'Oued Ouergha. La sécheresse est calculée en utilisant l'indice IPS pendant la période septembre-mars (1980-2016). L'étendue du barrage est mesurée (1997-98 à 2015 à 2016) sur la base de l'imagerie satellitaire en calculant l'indice d'étendue d'eau (NDWI: Normalized Difference Water Index) pendant le mois d'avril qui correspond à la période des hautes eaux. Les résultats obtenus contribuent à la caractérisation de la sécheresse mensuelle durant la période 1980-2016 et montrent son impact sur l'étendue du barrage Al Wahda.

**Mots clés:** Sécheresse; indice NDWI; Barrage Al Wahda; Bassin Ouergha

**Abstract:** ASSESSMENT OF CLIMATE DROUGHT AND ITS IMPACT ON THE WATER PLAN OF THE AL WAHDA DAM (MOROCCO)

*This study assesses the impact of drought on the extent of the AL Wahda dam, part of the Moroccan Rif mountain and the Oued Ouergha watershed. Drought is calculated using the IPS index during the period September-March (1980-2016). The extent of the dam is measured (1997-98 to 2015 to 2016) on the basis of satellite imagery by calculating the water body index (NDWI: Normalized Difference Water Index) during the month of April which corresponds to the high water period. The results obtained contribute to the characterization of the monthly drought during the period 1980-2016 and show its impact on the extent of the Al Wahda dam.*

**Keywords:** Drought; NDWI index; Al Wahda Dam; Ouergha Basin

## Introduction

La sécheresse climatique est une caractéristique normale et récurrente du climat, bien qu'elle soit souvent considérée à tort comme un événement inattendu et dangereux (Isendahl et Schmidt, 2006). Son origine est une diminution des précipitations par rapport à une valeur normale, calculée sur une longue période, généralement une saison ou plus. C'est un risque naturel qui diffère des autres événements du fait qu'elle a un début, elle évolue au cours des mois, voire des années, et affecte une grande région spatiale. Elle a des impacts environnementaux importants et se produit dans pratiquement toutes les zones climatiques du monde, mais la vulnérabilité et le degré d'impact varient considérablement d'une région à une autre selon les capacités d'adaptation et de résilience des communautés. Son impact est abordé selon différents angles (Potop et al., 2013): les causes de la sécheresse pour comprendre les modes de la circulation atmosphérique à grande échelle associés aux épisodes de sécheresse, l'évaluation de la probabilité d'occurrence de la sécheresse pour divers degrés de gravité et de répartition spatiale; l'évaluation et la compréhension de l'impact de la sécheresse; les réponses de la société aux menaces de la sécheresse et les stratégies appropriées pour l'atténuer et s'adapter à son impact.

La présente étude s'intéresse au bassin de l'Oued Ouergha qui, et plus particulièrement à l'étendue d'eau du barrage Al Wahda qui joue un rôle crucial dans le développement socio-économique du pays. Sa vulnérabilité à la sécheresse constitue un enjeu majeur pour la région agricole du Gharb. Le but est d'évaluer l'impact du risque de la sécheresse climatique sur l'étendue d'eau de ce barrage.

## 1. Description de la zone d'étude, méthodologie et données

Le bassin versant de l'oued Ouergha est le principal affluent du Sebou. Il se situe dans le nord du Maroc entre les parallèles 34°20'N et 35°10'N et les méridiens 3°55'O et 5°20'O. Il s'étend sur la majeure partie de la montagne rifaine. Il est limité au Nord par la crête rifaine passant par Ketama, Bab Barred et Bab Taza, distant de la Mer Méditerranée d'environ 30 Km au sud, par les bassins versants des affluents pré-rifains du Sebou et à l'est par les affluents de la Moulouya et du Sebou du Périf oriental (figure 1). Son climat est de type méditerranéen, avec



une saison sèche d'une durée inversement proportionnelle à l'altitude (Hanchane et Addou, 2019). Sa partie avale alimente l'un des plus grands barrage du pays: barrage Al Wahda. Avec une hauteur de 88 m et un volume de retenue de 3.800 Mm<sup>3</sup>, le Barrage Al Wahda constitue le plus grand barrage du Royaume. Il permet la régularisation de 1.740 Mm<sup>3</sup> par an (Senoussi et al., 1999).

Pour évaluer la sévérité de la sécheresse climatique au niveau du bassin de l'Ouergha et son impact sur la plan d'eau du barrage Al Wahda, la présente étude suit la méthodologie suivante:

- Calcul de l'indice standardisé des précipitations (IPS) (McKee et al. 1993) pour 3 mois en partant du mois de septembre. Trois séquences d'une durée de trois mois sont ainsi calculées: septembre-novembre (P1), novembre-janvier (P2) et janvier-mars (P3). A partir des séquences choisies, 8 combinaisons de successions de périodes sèches et/ou humides sont possibles. L'évaluation des périodes sèches et/ou humides est réalisée sur la période 1980-2016 et elle est appliquée au niveau de 5 stations de la zone d'étude (Fig. 1). Elle nous renseigne sur les conditions hydriques qui alimentent le barrage avant la période des hautes eaux du mois d'avril. Les sources des données pluviométriques mensuelles utilisées dans cette étude sont issues des stations de mesure de l'Agence du Bassin Hydraulique de Sebou.

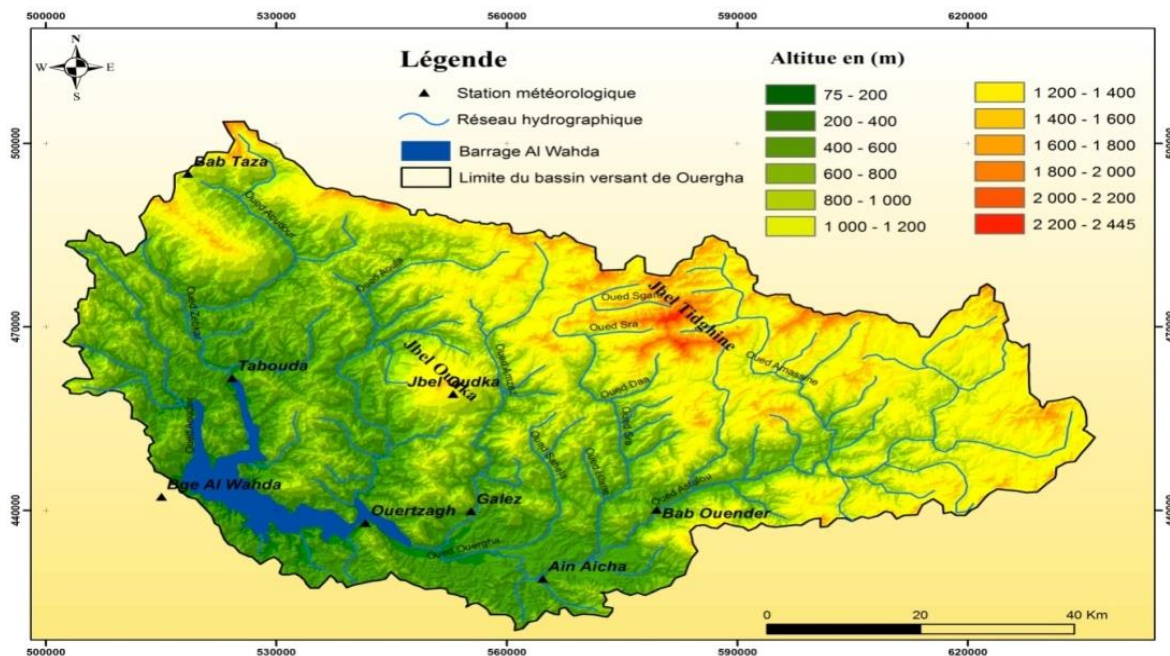


Figure 1: Localisation géographique des stations étudiées au sein du bassin de l'Ouergha et position du barrage Al Wahda.

- Extraction des plans d'eau du barrage Al Wahda à partir de l'imagerie satellitaire Landsat en adoptant la méthode développée par Verpoorter et al (2012), nommée GeoCover TM, qui est une méthode d'extraction des plans d'eau en combinant les images multi-temporelles Landsat. La méthode adoptée permet de calculer l'indice "Normalized Difference Water Index" (NDWI) qui utilise la bande proche infrarouge (PIR) et la bande de l'infrarouge à courtes longueurs d'onde (ShortWave InfraRed, SWIR) (McFEETERS, 1996).

$$NDWI = (PIR - SWIR) / (PIR + SWIR) (-)$$

Les images sont téléchargées à partir du site <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Les périodes choisies correspondent à la période des hautes eaux qui correspond au mois d'Avril. Les changements spatio-temporels du plan d'eau du barrage ont été évalués entre 1998 et 2010.

## 2. Résultats

La topographie contrôle en grande partie la redistribution locale de la pluie incidente au sein du bassin de l'Ouergha, surtout au nord où domine la crête du Rif qui dirige vers la vallée de l'Ouergha des affluents dans une direction nord-sud avec un régime torrentiel.

En année normale, un maximum pluviométrique est enregistré en novembre dans toutes les stations alors qu'une période pratiquement sèche marque les 3 mois de l'été (juin-août). En régime pluviométrique mensuel extrêmement sec, l'absence quasi-totale de pluies s'étale entre mai et octobre et des maximas pluviométriques sont, cependant, enregistrés entre les mois de novembre et de décembre. En régime exceptionnel, la pluviométrie s'écarte significativement des valeurs normales, et le mois de décembre enregistre les valeurs les plus extrêmes.

### 2.1. Evaluation de la sécheresse selon l'indice IPS

La caractérisation de la sécheresse de la période septembre-mars est déterminante pour le niveau des hautes eaux du barrage au mois d'avril. Durant cette période, trois séquences sèches et/ou humides sont évaluées: septembre-novembre (P1), novembre-janvier (P2) et janvier-mars (P3) (Tab. 1). En moyenne, l'intensité de la sécheresse a atteint un niveau de sévérité durant la période P2 (-1.7) et la période P1 (-1.54) alors qu'elle se situe à un niveau modéré durant la dernière période P3 (-1.39). Par contre, la sécheresse de la période janvier-mars (P3) est plus fréquente (14 cas) que celle des périodes P1 et P2 (8 cas par période). Les sécheresses ayant concerné l'ensemble des stations sont celles de septembre-novembre (P1) 1981, novembre-janvier 1992 (P2), novembre-janvier 1995, septembre-novembre 1998, septembre-novembre 2015 et novembre-janvier 2016. Leur niveau de sévérité varie entre modérée et sévère. La sécheresse la plus extrême est celle de la période septembre-novembre 1981 pendant laquelle l'indice IPS a enregistré des valeurs inférieures à -2 pour l'ensemble des stations. Quant aux périodes humides, elles enregistrent des valeurs relativement élevées et comparables en P2 (1.56) et P3 (1.55) par rapport à P1 (1.38). La fréquence des séquences humides par période sont presque également réparties entre les 3 périodes: 11 pour P1 et pour P2 et 10 pour P3. Les périodes ayant touché l'ensemble des stations sont au nombre de 6: P1 des années 1997 et 2002, P2 de 1997 et 2010 et P3 de 2009 et 2010. La valeur d'une exceptionnalité extrême (2.54) est enregistrée à Bab ouender durant la période P2 de l'année 2009. Par ailleurs, on peut considérer que les périodes P2 et P3 de l'année 2010 sont les plus humides de la période analysée avec des valeurs de l'IPS, dépassant souvent le seuil de 2 pour l'ensemble des stations.

Tableau 1: Fréquence des séquences sèches et humides (%), calculées selon l'indice IPS d'une durée de 3 mois pour trois périodes septembre-novembre (P1), novembre-janvier (P2) et janvier-mars (P3) (période: 1980-2016).

	Ain Aicha	Tabouda	Jbel Outhka	Galez	Bab Ouender	Moyenne
Séquences sèches						
Spi (P1-/P2-/P3-)	22	24	24	32	27	26
Spi (P1-/P2-/P3+)	0	14	8	3	3	5
Spi (P1-/P2+/P3-)	3	3	5	3	3	3
Spi (P1-/P2+/P3+)	11	14	14	16	16	14
Séquences humides						
Spi (P1+/P2+/P3+)	31	16	22	30	22	24
spi (P1+/P2+/P3-)	19	19	11	11	16	15
Spi (P1+/P2-/P3-)	11	0	11	5	8	7
Spi (P1+/P2-/P3+)	3	11	5	0	5	5

## 2.2. Impact de la sécheresse sur le plan d'eau du barrage Al Wahda

L'estimation de la superficie du plan d'eau du barrage Al Wahda selon l'indice NDWI durant la période des hautes eaux du mois d'avril est réalisée durant la période 1998-2016. Cependant, les années 2008, 2012 et 2013 sont manquantes à cause de la couverture nuageuse des images disponibles.

Par comparaison avec la superficie maximale du barrage qui est de 12.300 ha, le taux de réduction (TR %) du plan d'eau du barrage a été compris entre 9.84 et 20.18 pour l'ensemble des années. En revanche des taux de réduction ayant dépassé 20 % ont marqué les années 1999, 2000, 2014, 2015 et 2016. Le taux de réduction maximal de 52.83 a concerné l'année 2016. Pour les autres années, ce taux de réduction est compris entre 29.8 et 39.12 (Fig. 2). Les figures 3 et 4 montrent l'étendue d'eau du barrage pour deux situations extrêmes: 2001 (TR=9.84 %) et 2016 (TR=52.83 %).

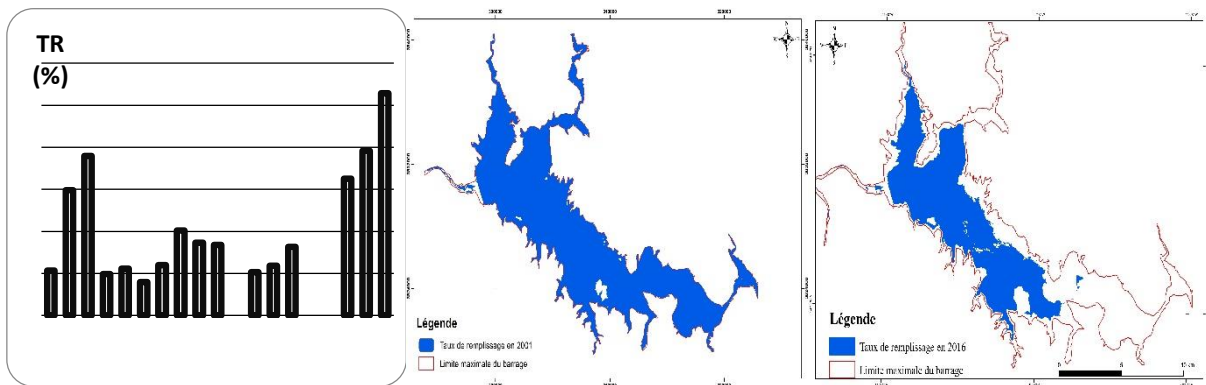
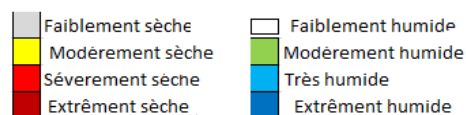


Figure 2 (à gauche): Taux de réduction (TR %) de l'étendue d'eau du barrage Al Wahda en (%); Figure 3 à 4: Extraction à partir de l'indice NDWI de l'étendue du barrage d'eau pendant la période des hautes eaux (mois d'avril) en 2001 (au milieu) et en 2016 (à droite).

La variation de l'étendue du barrage en fonction de la durée de la sécheresse et l'intensité de la sécheresse durant la période 1997-1998 à 2015-2016 est présentée sur le tableau 2.

Tableau 2: Durée et intensité de la sécheresse des périodes P1, P2 et P3 et taux de réduction (TR %) d'étendue d'eau du barrage Al Wahda (période 1997-98 à 2015-16).

Station	Aïn Aïcha			Bab Ouender			Galez			Jbel Outhka			Tabouda			TR (%)
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	
1997-1998																10.66
1998-1999																29.80
1999-2000																37.96
2000-2001																9.84
2001-2002																11.11
2002-2003																7.94
2003-2004																12.02
2004-2005																20.17
2005-2006																17.32
2006-2007																16.78
2007-2008																NA
2008-2009																10.32
2009-2010																11.81
2010-2011																16.33
2011-2012																NA
2012-2013																NA
2013-2014																32.50
2014-2015																39.12
2015-2016																52.83



D'après les résultats obtenus, on note une certaine correspondance entre la sécheresse et le TR (%) de l'étendue d'eau du barrage Al Wahda. En effet, l'année 2015-16 ayant connu le TR le plus bas et celle qui a été marquée par des sécheresses d'intensité variable durant toute la période septembre-mars et pour toutes les stations (combinaison P1-/P2-/P3-). Cette situation est presque similaire à celle des années 1998-99 et 1999-00 qui ont connu des TR respectifs de 29.8 et 37.96 %. Elle peut même rapprochée aux situations des années 2004-05, 2006-07 sans que le TR soit fortement réduit. Par ailleurs, les années marquées ayant connu un TR faible, généralement inférieur à 15 %, sont marquées, à quelques exceptions près, par des sécheresses qui sont dominées par une succession de périodes humides.

## Conclusion

Cette étude a examiné les caractéristiques spatio-temporelles des périodes sèches et humides au sein du bassin versant de l'Ouergha durant la période 1980-2016, en identifiant leur durée et leur intensité pour des durées de 3 mois consécutifs qui couvrent la période septembre-mars. Ensuite, elle a évalué l'impact de la sécheresse sur le plan d'eau du barrage Al Wahda au mois d'avril qui représente la période des hautes eaux. L'extraction des données relatives au plan d'eau a été réalisée à partir de l'imagerie satellitaire Landsat TM en calculant l'indice NDWI qui est basé sur la bande proche infrarouge (PIR) et une bande de l'infrarouge à courtes longueurs d'onde (SWIR). Cette évaluation a été réalisée durant la période 1998-2007. Les résultats montrent que l'étendue du barrage Al Wahda connaît des fluctuations importantes qui sont, à quelques exceptions près, en relation étroite avec la durée et l'intensité de la sécheresse de la période septembre-mars. En effet, des sécheresses couvrant l'ensemble de cette période et touchant l'ensemble des stations entourant le barrage Al Wahda ont un impact significatif sur la réduction de l'étendue d'eau de ce dernier.

## Bibliographie

- Hanchane M., Addou R. (2019). Bassin de l'Ouergha: caractérisation de la variabilité spatio-temporelle des précipitations annuelles et régimes climatiques selon les anomalies de pression au niveau de la mer. In. *Mutations socio-spatiales dans les montagnes rifaines (Maroc) et leurs impacts sur la patrimoine forestier* (Coord. Daïde H. et Elkhazzan B), Ouvrage publié dans le cadre du projet PICS (Université Le Mans (France) et Université Sidi Mohamed Ben Abdellah (Fès, Maroc)). 7-26.
- Isendahl N., Schmidt G. (2006). *Drought in the Mediterranean: WWF Policy Proposals*. Ed. WWF/Adena (Spain). 41 p.
- McFeeters S. K. (1996). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, **17**, 1425–1432.
- McKee T.B., Doeskin N.J., Kleist J. (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim California, USA, 17–22 January 1993, 179–184.
- Potop, V., Boroneanț, C., Možný, M., Štěpánek, P., & Skalák, P. (2013). Observed spatiotemporal characteristics of drought on various time scales over the Czech Republic. *Theoretical and Applied Climatology*, **115**(3-4), 563–581. doi:10.1007/s00704-013-0908-y
- Senoussi S., Agoumi A., Yacoubi M., Fakhraddine A., Sayouty E.H., Mokssit A., Chikri N. (1999). Changements climatiques et ressources en eau Bassin versant de l'Ouergha (Maroc). *Hydroécologie appliquée*, Tome 1/2, **11**, 163-182.
- Verpoorter C., Kutser T., Tranvik L. (2012). Automated mapping of water bodies using Landsat multispectral data. *Limnology and Oceanography: Methods*, **10**, 1037–1050.

# EVALUATION DE L'IMPACT SUR LA TEMPÉRATURE DE SURFACE DE CERTAINS PROJETS EMBLEMATIQUES DE REAMENAGEMENT DANS L'AIRE METROPOLITAINE DE CASABLANCA (MAROC)

Hassani N.<sup>1</sup>, Lebaut S.<sup>1</sup>, Sghir S.<sup>2</sup> et Drogue G.<sup>1</sup>

*1 Université de Lorraine, LOTERR, F-57000 Metz, France (nassima.hassani@univ-lorraine.fr)*

*2 Université Sultan Moulay Slimane, Laboratoire de Recherche en Management du Territoire, Communication et Modélisation (MTCM), Maroc*

**Résumé :** *La métropole de Casablanca, premier pôle économique du Maroc, a connu ces dernières décennies une mutation urbaine remarquable afin de répondre aux défis socio-démographiques et améliorer son attractivité. De nombreux projets d'envergure ont été lancés et ont abouti au réaménagement de plusieurs sites importants. La présente étude se propose d'analyser, à l'aide des données de la télédétection, quatre sites emblématiques ayant fait l'objet d'un réaménagement majeur au cours des 20 dernières années. Il s'agit d'évaluer l'impact de ces requalifications sur l'environnement urbain en s'appuyant sur les variations au niveau des températures de surface terrestres (Ts). Ceci implique d'examiner les Ts de ces sites avant et après ces opérations à l'aide d'une analyse basée sur des indices spectraux. L'objectif est ainsi de déterminer si les principaux projets urbains casablancais prennent en compte la problématique de la surchauffe urbaine et se traduisent ou non par une amélioration du confort thermique pour la population.*

**Mots clés :** *température de surface terrestre; images Landsat ; projets de réaménagement ; Grand Casablanca.*

**Abstract :** *The metropolis of Casablanca, Morocco's leading economic hub, has undergone remarkable urban transformation in recent decades in order to meet its socio-demographic challenges and improve its attractiveness. Many large-scale projects have been launched and have led to the redevelopment of several important sites. The present study proposes to analyze, with the help of remote sensing data, five iconic sites that have undergone major redevelopment in the last 20 years. The aim is to assess the impact of these redevelopments on the urban environment based on variations in land surface temperatures (LST). This involves examining the LST of these sites before and after these operations using a model based on spectral indices. The objective is to determine whether the main urban projects in Casablanca take into account the problem of urban overheating and whether or not they result in an improvement in the thermal comfort for the population.*

**Keywords :** *Land Surface Temperature; Landsat images; redevelopment projects; Greater Casablanca.*

## **Indoduction :**

Le processus d'urbanisation, qui consiste principalement en la conversion d'espaces naturels en surfaces rugueuses et imperméables, crée un micro-climat spécifique aux villes. Ainsi, pendant la journée, différents facteurs (propriétés thermiques des matériaux de construction, carence en eau et en végétation, freinage du vent par les bâtiments, faible albédo, etc.) provoquent une modification du bilan énergétique de la zone urbaine, entraînant des températures de surface terrestres (Ts) plus élevées.



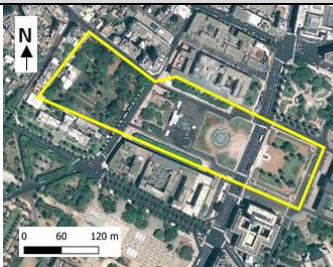




Mesurer les effets de l'urbanisation sur le climat local implique idéalement, de comparer la situation « pré-urbanisation » à la situation « post-urbanisation ». Les observations antérieures à l'urbanisation sont en effet les références idéales dans l'étude du climat urbain (Lowry, 1977). Or, la difficulté principale réside dans le fait que ces références sont rarement disponibles, ce qui conduit donc à utiliser les zones péri-urbaines ou les zones rurales environnantes comme référence. Néanmoins, certains espaces au sein de l'aire urbaine de Casablanca offrent justement cette opportunité puisqu'ils ont récemment fait l'objet d'une requalification urbaine. Il nous apparaît donc opportun d'examiner leur impact thermique potentiel à l'instar de l'étude menée par Renard et al. (2019) par exemple. L'objectif de la présente étude est ainsi d'examiner de manière comparative les Ts avant et après ces opérations pour en mesurer l'impact à l'aide de données issues des capteurs *Landsat* et des indices spectraux d'humidité et de végétation.

## **1. Sites étudiés**

La métropole de Casablanca, capitale économique du Maroc, a vu son paysage urbain se transformer au cours des dernières décennies : de nombreux projets d'envergure ont été lancés pour accompagner son développement socio-économique et sa croissance démographique. Dans notre étude, nous nous intéressons à quatre sites emblématiques ayant fait l'objet d'un réaménagement entre 2003 et 2020 (tableau 1) et tentons d'évaluer l'effet de ces opérations

urbaines sur la température au sol. Ces projets de réaménagement peuvent être classés en deux catégories : d'un côté des sites ayant fait l'objet d'une requalification urbaine (sites 1 et 2), et de l'autre, des sites ayant subi une urbanisation *stricto sensu* (sites 3 et 4).

**Tableau 1: Présentation des quatre sites emblématiques choisis.**

Site 1 : Anfa Park	Site ante aménagement 2011	Site post aménagement 2020
<p>Chantier phare et symbole du renouveau urbain du Maroc, le projet Casa-Anfa vise à créer un pôle urbain moderne sur le site de l'aéroport historique de la ville fermé en 2007. La partie nord a été transformée en un grand parc central de 50 hectares (Anfa Park).</p>		
Site 2 : Place Mohammed V	Site ante aménagement 2009	Site post aménagement 2020
<p>La grande place Mohammed V, créée par l'urbaniste Henri Prost pendant le protectorat français, a fait l'objet d'une rénovation importante en vue de la construction du Grand Théâtre de Casablanca, plus grand édifice de ce genre en Afrique.</p>		
Site 3 : Ville verte de Bouskoura	Site anteaménagement 2008	Site post aménagement 2020
<p>La ville verte de Bouskoura est un éco-quartier construit au sud de Casablanca et attenant à la forêt de Bouskoura à quelques kilomètres du centre-ville. Il s'agit d'un centre urbain mixte composé d'une zone d'activités et de résidences haut standing autour d'un golf paysager, destiné à alléger la pression démographique sur le centre-ville en attirant les citadins « huppés » vers la périphérie sud.</p>		
Site 4 : le quartier d'affaires de Sidi Maârouf	Site anteaménagement 2003	Site post aménagement 2020
<p>Du fait de sa situation stratégique à mi-chemin entre le centre-ville de Casablanca et l'aéroport international Mohamed V, ce qui fut autrefois un espace boisé a été transformé en un quartier d'affaires flambant neuf.</p>		

## 1. Données utilisées

Les indices spectraux tels que l'indice de végétation par différence normalisée (Normalized Difference Vegetation Index ou NDVI), l'indice de construction par différence normalisée (Normalized Difference Built-up Index ou NDBI), l'indice hydrique par différence normalisée (Normalized Difference Water Index ou NDWI) et l'indice hydrique par différence normalisée modifiée (Modified Normalized Difference Water Index ou MNDWI) (le MNDWI permet d'éliminer le bruit issu des surfaces bâties, tandis que le NDWI élimine le bruit issu de la végétation et des sols nus) ainsi que les Ts ont été calculés à partir de trois images satellites *Landsat* prises à trois dates différentes, à savoir 1995, 2011 et 2019 (tableau 2) dans des conditions anticycloniques assez similaires (tableau 3). Les Ts ont été établies à l'aide de l'algorithme *Single-Canal* (Sobrino et al., 2004; Barsi et al., 2005 ; Cristóbal et al., 2009; Jimenez-Munoz et al., 2009). L'objectif est ainsi d'étudier la corrélation qui existe entre les indices spectraux et les Ts pour expliquer l'impact des aménagements sur l'environnement urbain.

**Tableau 2: Caractéristiques des images *Landsat* multi-dates utilisées dans cette étude.**

Capteur	Date d'acquisition	Heure d'acquisition (UTC)	Résolution spatiale de la bande IRT (m)	Séquence
<i>Landsat TM</i>	21/06/1995	10h40	120	jour
<i>Landsat TM</i>	04/08/2011	10h40	120	jour
<i>Landsat OLI/TIRS</i>	07/06/2019	11h03	100	jour

**Tableau 3: Données météorologiques (moyennes horaires) au moment du passage des satellites (source : Direction Nationale de la Météorologie de Casablanca).**

Jour	Température de l'air (°C)	HR (%)	Vent moyen (km/h)	Direction du vent	Pression (hPa)
21/06/1995	22,5	81	9	360	1016,5
04/08/2011	23,0	74	11	360	1018,0
07/06/2019	22,5	50	26	20	1018,0

## 2. Résultats et discussion

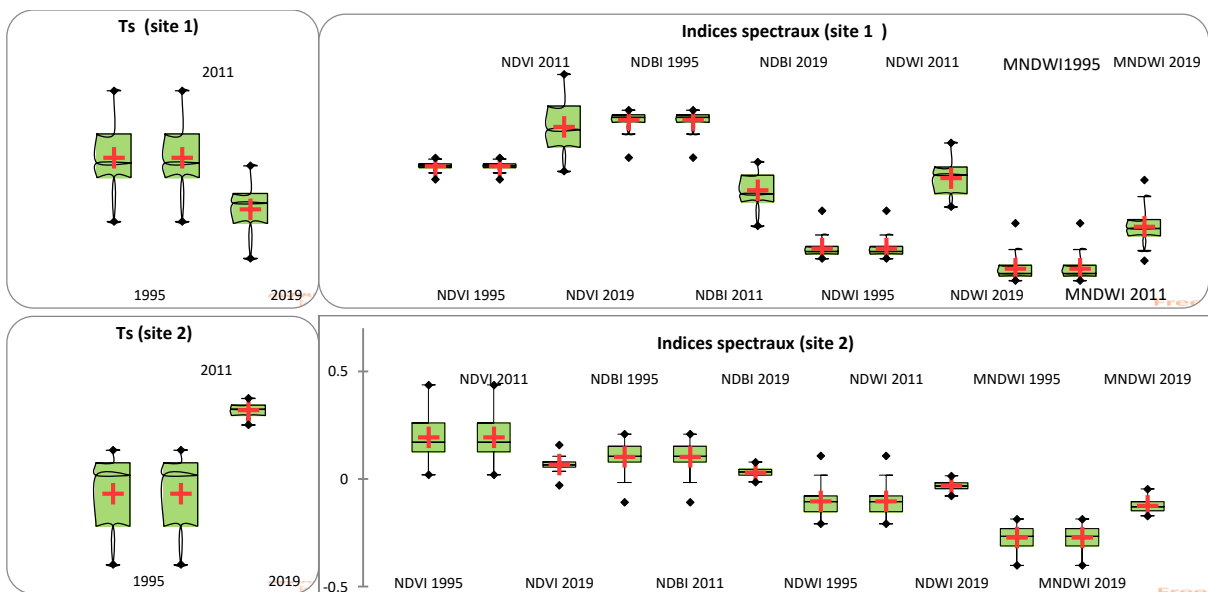
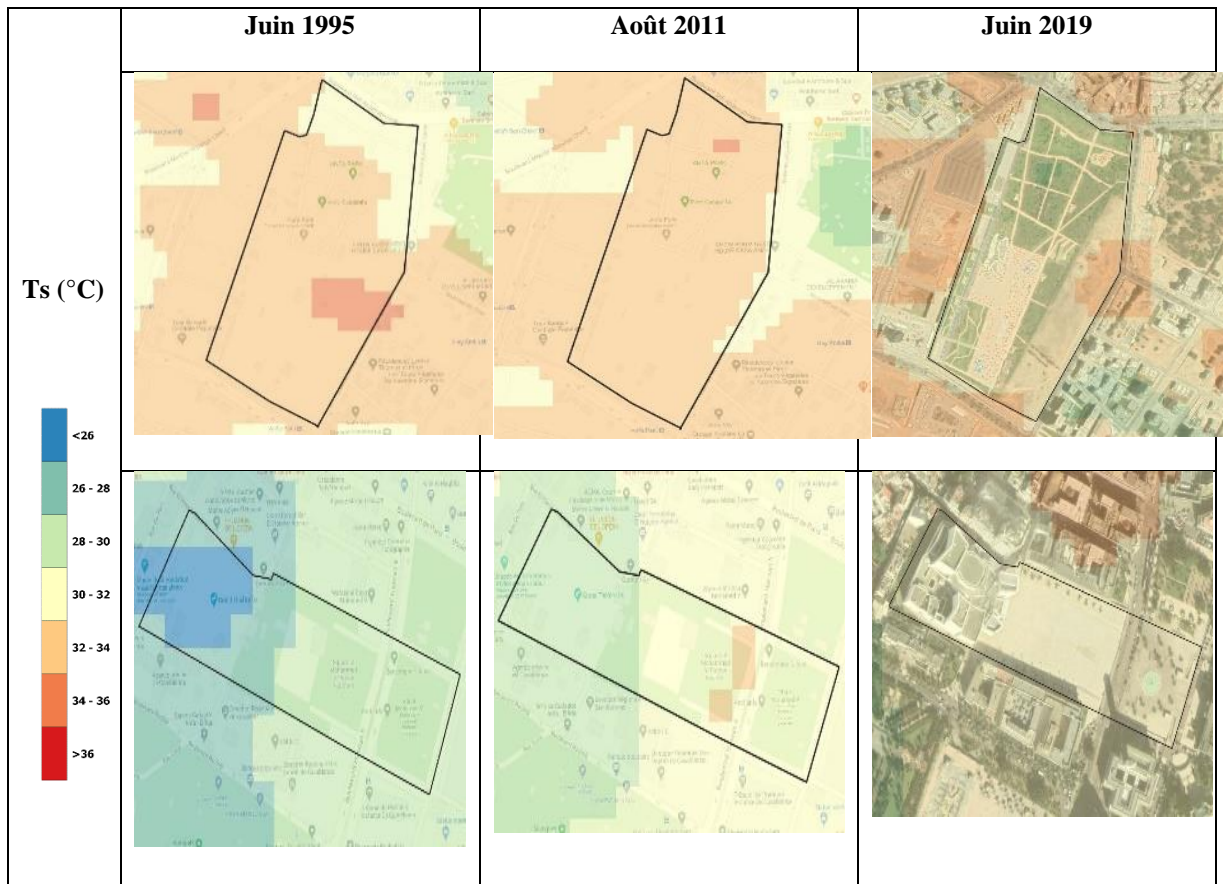
### 2.1. Les projets de requalification urbaine (sites 1 et 2)

Les sites qui ont subi une requalification urbaine affichent des résultats thermiques contrastés : sur la partie nord de l'ancien aéroport de Casa-Anfa, une augmentation de l'indice de végétation et d'humidité est relevée, coïncidant avec une baisse des Ts moyennes et médianes de 2°C et de l'indice NDBI (tableau 4 et figure 1). À l'inverse, sur la place Mohammed V, une augmentation des Ts entre 2°C et 3°C est constatée, associée à une baisse logique de l'indice NDVI (tableau 4 et figure 1). En revanche, de manière surprenante, l'indice NDBI a enregistré une baisse due au recours à des couleurs claires, ce qui a permis de limiter en partie les effets de l'imperméabilisation du sol.

Ce contraste entre les deux sites s'explique par la nature des mutations urbaines qu'ils ont subi. Dans le premier cas (Anfa Park), des sols nus et des surfaces imperméables ont cédé la place à

des surfaces végétalisées, des fontaines, un miroir d'eau de 700m<sup>2</sup>, ainsi qu'un canal long de 400m, en cohérence avec l'objectif du projet qui était de créer un « poumon vert » au sein de la ville *intra-muros*. Dans le second cas en revanche, la place Mohammed V a été intégralement imperméabilisée. Cela confirme l'effet rafraîchissant sur les surfaces obtenu en journée grâce à l'intégration d'espaces verts et de points d'eau.

**Tableau 4 :** Evolution des Ts sur le site d'Anfa Park et de la place Mohammed V sur la période 1995-2019.



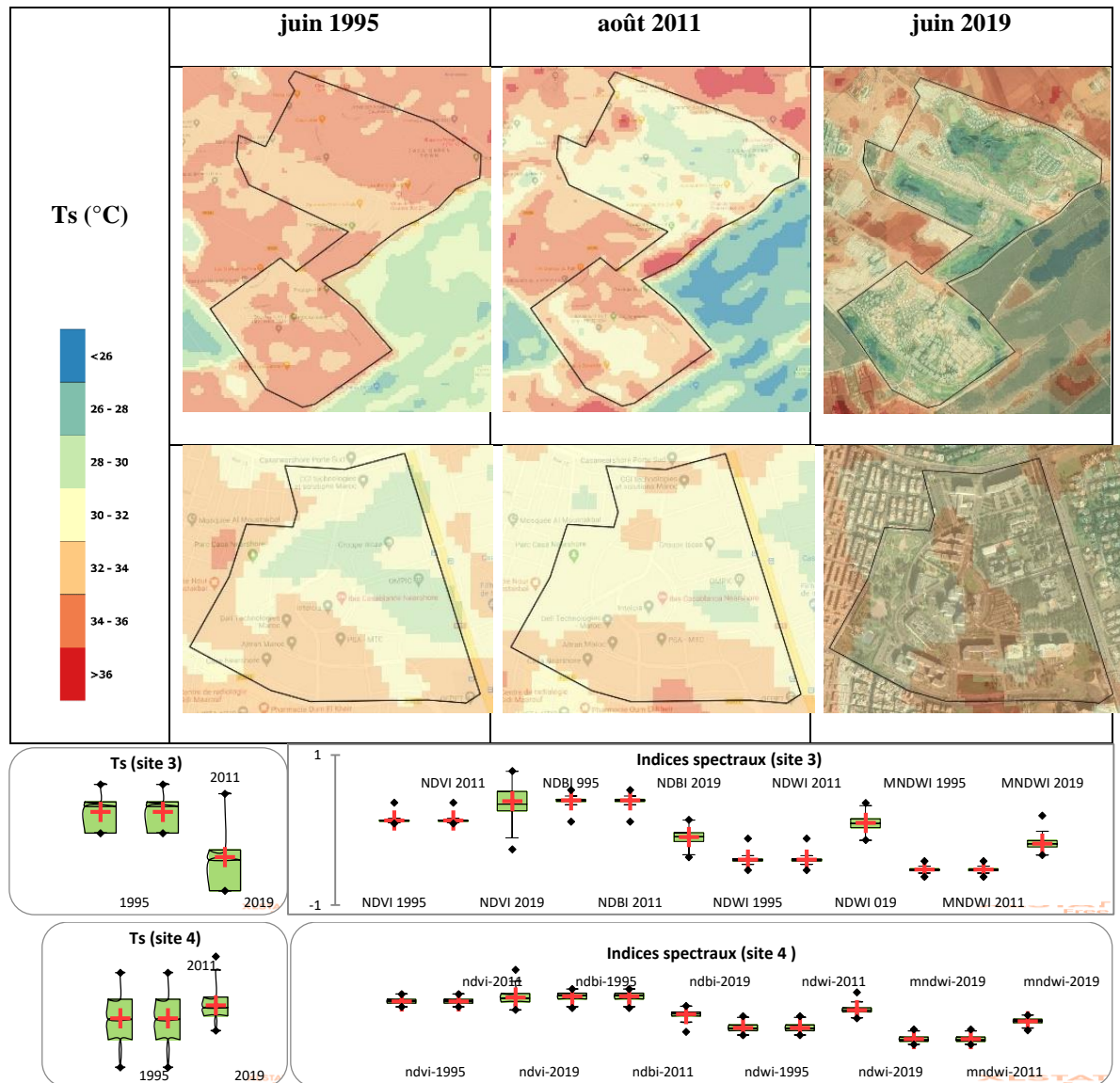
**Figure 35 :** Boîtes à moustaches des Ts des sites d'Anfa Park et de la place Mohammed V (croix rouge : moyenne; points noirs : valeurs min et max ; limite inférieure de la boîte : 1<sup>er</sup> quartile ; limite supérieure : 3<sup>e</sup> quartile).



## 2.2. Les nouveaux quartiers « sortis de terre » (sites4 et 5)

Intervenu entre 2011 et 2019, l'aménagement de la ville verte de Bouskoura a consisté en la conversion de champs de culture, faiblement irrigués et nus une bonne partie de l'année (Conseil Général du Développement Agricole, 2009) en un écoquartier flambant neuf. Cela a conduit à des changements urbains majeurs affectant les Tsdu fait de l'implantation d'une végétation importante (toits végétalisés, jardins, terrains de golf de 92ha, etc.) et de zones humides ou en eau (lacs, piscines, etc.). Les Ts moyennes et médianes ont ainsi diminué de 4°C et 5°C respectivement (tableau 5 et figure 2). Le changement d'occupation du sol est détecté par les indices spectraux NDVI, NDWI et MNDWI qui ont connu des hausses significatives, accompagnées d'une baisse du NDBI (figure 2). Ainsi, bien que ce projet puisse s'analyser comme un étalement urbain avec l'urbanisation de terres agricoles, le fait d'intégrer une végétation importante associée à une faible densité du bâti a conduit à l'apparition d'un îlot de fraîcheur local.

**Tableau 5 : Evolution des températures de surface pour la ville verte de Bouskoura et le quartier d'affaires de Sidi Maârouf sur la période 1995-2019**



Le quartier d'affaires de Sidi Maârouf (site 4), pour sa part, a été construit en lieu et place d'un site naturel boisé. Ce changement dans l'occupation du sol a logiquement entraîné une augmentation des Ts, mais de manière très modérée (hausse de la Ts moyenne d'environ 1°C) car le nouveau quartier présente une faible densité et intègre un parc urbain dans sa partie ouest ainsi que de la végétation entre les immeubles. De même, les indices de végétation et d'humidité ont également peu varié.

## Conclusion

Au total, cette étude a permis de reconstituer l'impact thermique de certains aménagements, parmi les plus importants réalisés au sein de la métropole de Casablanca au cours de la période s'étendant de 2003 à 2020. Dans ce laps de temps, ce territoire a connu une urbanisation rapide et considérable du fait de son développement socio-économique et de sa croissance démographique. Les résultats obtenus ont pour intérêt d'approfondir les études antérieures menées sur le Grand Casablanca (Hassani et al., 2021). Ainsi, bien que ces (ré)aménagements ne prennent pas expressément en compte les considérations microclimatiques, leur influence sur le climat local est souvent marquée, mettant en évidence les gains importants en termes de qualité de vie résultant du fait d'intégrer un couvert végétal et de limiter la densité urbaine. Toutefois, pour en mesurer la portée pleine et entière, il conviendrait de mesurer l'influence de ces projets sur les températures de l'air telles que ressenties par les habitants.

## Bibliographie :

- Barsi, J. A., Schott J. R., Palluconi F. D. & Hook S. J., 2005. Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. *In Earth Observing Systems X*, 58820E. International Society for Optics and Photonics <https://doi.org/10.1117/12.619990>.
- Conseil Général du Développement Agricole, 2009. *Atlas de l'agriculture marocaine*. Edition 2008, Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime, 51 p.
- Cristóbal J., Jiménez-Muñoz J. C., Sobrino J. A., Ninyerola M. & Pons X., 2009. Improvements in land surface temperature retrieval from the Landsat series thermal band using water vapor and air temperature. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 114, D08103, <https://doi.org/10.1029/2008JD010616>.
- Hassani N., Lebaut S., Drogue G. & Sghir S., 2021. Dynamique D'urbanisation Et Thermographies Satellitaires En Milieu Méditerranéen : le cas du Grand Casablanca (Maroc). *Bulletin de la Société Géographique de Liège (BSGLg)*, 76.
- Jimenez-Munoz J. C., Cristobal J., Sobrino J. A., Soria G., Ninyerola M., & Pons X., 2009. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(1), 339-349, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2007125>.
- Lowry W.P., 1977. Empirical estimation of the urban effects on climate : A problem analysis. *Journal of Applied Meteorology*, 16(2), 129-135, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016%3C0129:EEOUEO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016%3C0129:EEOUEO%3E2.0.CO;2).
- Renard F., Alonso L., Fitts Y., Hadjiosif A. & Comby J., 2019. Evaluation of the Effect of Urban Redevelopment on Surface Urban Heat Islands. *Remote Sensing*, 11(3), 299, <https://doi.org/10.3390/rs11030299>.
- Sobrino J. A., Jiménez-Muñoz J. C. & Paolini L., 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434-440, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>.

# IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES BESOINS HYDRIQUES DE L'AGRICULTURE DANS LES ZONES SUB SAHARIENNES

Hassini N. et Benbouzid Z.

*Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, Algérie,  
noureddine.hassini@univ-mosta.dz  
zineb.benbouzid@univ-mosta.dz*

## Résumé :

*La pluviométrie constitue, avec la température, une caractéristique fondamentale du climat. Son importance est telle que les diverses méthodes de classification des climats établies jusqu' alors reposent essentiellement sur la moyenne annuelle ou mensuelle des précipitations, en combinaison avec les moyennes et / ou les extrêmes de température. A l'échelle quotidienne, l'analyse des pluies révèle de nombreuses informations susceptibles de permettre « d'apprécier » le climat ou de déceler d'éventuels changements dans l'occurrence des principaux événements qui le caractérisent, notamment le début et la fin de la saison pluvieuse, ainsi que sa durée moyenne. Cette analyse qualitative sera complétée par l'estimation des risques d'occurrence d'épisodes secs à partir de deux dates significatives, notamment le début et la fin de campagnes agricoles et dont les durées plus ou moins longues traduit souvent une tendance à un changement du climat local.*

*Dans cette contribution, nous établirons une modélisation qui se fera à l'aide du modèle de Markov, à partir de deux séries de pluies quotidiennes recueillies à la station d'Alger Dar El Beida. Les résultats obtenus peuvent dans un premier temps servir de base à une démarche adaptative à même de limiter les effets changeants du climat qui demeure, sous nos latitudes, un fort agent régulateur de la production agricole.*

*Mots clés : pluviométrie, température, climat, modèle de Markov, sub Sahara, Algérie.*

## AGRICULTURE'S WATER REQUIREMENTS ADAPTATION AGAINST THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE IN SUB-SAHARAN AREAS

### Abstract :

*The rainfall constitutes, with the temperature, a fundamental characteristic of the climate. Its importance is such as the most classification methods of climates established until then are essentially based on the annual or monthly average of the precipitation, in combination with the averages and / or the extremes of temperature. In the daily scale, the analysis of rains reveals numerous information susceptible to allow " to appreciate " the climate or to reveal possible changes in occurrence of the main and characteristic events), in particular the beginning and the end of the rainy season, as well as its average duration. This qualitative analysis will be completed by the estimation of the risks of occurrence of dry episodes from two significant dates, like the beginning and the end of agricultural seasons and which the durations explain the changing local climate. In this contribution, we shall establish a modelling by means of the model of Markov's model, from two series of daily rains collected at Alger Dar El Beida meteorological station. The obtained results can be of use at first as base to an adaptive step in order to limit the effects of the climate which remains, under our latitudes, a strong regulating agent of the agricultural production.*

*Keywords: rainfall, temperature, climate, Markov model, sub-Saharan, Algeria*

### Introduction

La variabilité dans le temps des précipitations accroît considérablement le risque de sécheresse (Abderrahmani et *al*, 2006). Cet aléa climatique, constitue une contrainte majeure au développement de l'agriculture en général et des cultures pluviales en particulier. En effet, beaucoup de nos agriculteurs hésitent, par précaution, à investir dans des cultures stratégiques comme le blé, dont le rendement dépend pour une large part de la composante climatique. Le déficit hydrique engendré par la sécheresse augmente la sensibilité des plantes aux valeurs extrêmes de température, notamment en dehors de la saison humide (Durand et *al*, 2013), renforçant ainsi leur dépendance vis-à-vis du climat. Pour pallier à ces contraintes, il convient d'ajuster le « calendrier agricole » aux principaux événements climatiques et déterminer les itinéraires techniques les plus favorables au développement des cultures. Cette démarche vise principalement à réduire les risques induits par la

variabilité et « l'évolution » du climat et assurer une agriculture durable et une autosuffisance alimentaire.

## 1. Données et méthode :

Les données climatologiques utilisées dans la présente étude sont les températures et les précipitations quotidiennes recueillies à la station météorologique d'Alger Dar El Beida. Afin de détecter un éventuel changement climatique, nous avons considéré deux séries :

- Une série de référence, se rapportant à la période 1945-1977
- Une série de test couvrant la période 2004-2014.

Cette dernière série permettra la comparaison et la caractérisation des principaux événements climatiques susceptibles d'influer de façon directe ou indirecte sur la campagne agricole. La méthodologie adoptée consiste en une analyse des données à l'aide du logiciel statistique Instat+ afin d'en extraire les informations pertinentes pour les prises de décision à court et moyen terme (Choisnel E, 1992). Pour effectuer l'analyse, on admet que la saison pluvieuse commence à la première occasion où le cumul pluviométrique est supérieur ou égal à 5 mm sur deux jours successifs à partir du 1<sup>er</sup> octobre. De même un jour présente un caractère pluvieux si la quantité de pluie recueillie en 24 heures est supérieure ou égale à 0.1 mm. Enfin le calcul du bilan hydrique permet de localiser dans le temps la fin de la saison des pluies ; en général un bilan hydrique proche de zéro témoigne de la fin des précipitations.

## 2. Résultats

### 2.1. Analyse de la période de référence

La station météorologique d'Alger Dar el Beida ayant pour coordonnées géographiques 3°25" Est, 36°72" Ouest est située à 24 m d'altitude et reçoit en moyenne 680 mm de pluie par an, quantité suffisante pour satisfaire les besoins des cultures annuelles. Cependant, sa distribution peut réduire considérablement son efficacité (Dastane, 1977). La saison pluvieuse dure en moyenne 145 jours, elle débute vers le 10 octobre pour s'achever durant la première décennie de mars, à l'exception de la période 1951-1958 où les pluies ont commencé au-delà du 31 octobre. L'analyse fréquentielle des durées des saisons pluvieuses montre une valeur modale de 150 jours. Cette séquence peut s'avérer insuffisante dans le cas où elle ne cadre pas avec le cycle des cultures, d'où la nécessité de mettre en place une stratégie consistant à repérer les épisodes favorables du climat pour en tirer le meilleur parti. Cette approche probabiliste permet, entre autres, d'estimer les chances d'occurrence de deux jours pluvieux consécutifs et de prévoir la période pouvant concentrer le maximum de précipitations.

Pour compléter l'analyse, nous avons procédé à l'évaluation statistique par le modèle de Markov des principaux événements caractéristiques de la période de référence, à savoir l'occurrence de la pluie pour un jour donné de l'année  $p(mm)$ , l'occurrence de deux jours consécutifs pluvieux  $pr$  et d'occurrence d'un jour sec précédé d'un jour pluvieux  $pr$ .

Cette analyse nécessite une phase préparatoire qui consiste à inventorier les jours secs ( $dd$ ), les jours pluvieux ( $rr$ ) ainsi que les couples pluie-sécheresse ( $rd$ ) et sécheresse-pluie ( $dr$ ). Le tableau 1 ci-dessous présente un extrait de la phase préparatoire des données. Dans le tableau 1 est donné un décompte des événements précités relatifs à la première pentade du mois de septembre de 10 années consécutives, où  $Tr$  désigne le total des jours pluvieux et  $Ir$  le logarithme des valeurs dont la somme permettra d'évaluer le paramètre de forme de la distribution.

Tableau 1 : Répertoire des évènements climatiques à partir du 1er septembre dans la station d'Alger Dar el Beida

<i>dd</i> jours secs	<i>dr</i> sécheresse- pluie	<i>rd</i> pluie- sécheresse	<i>rr</i> jours pluvieux	<i>Tr</i> total des jours pluvieux	<i>Ir</i> logarithme des valeurs
9	0	1	0	1.93	0.65
8	1	1	0	1.93	0.65
8	1	1	0	30.88	3.43
9	1	0	0	0	0
8	0	2	0	12.75	3.65

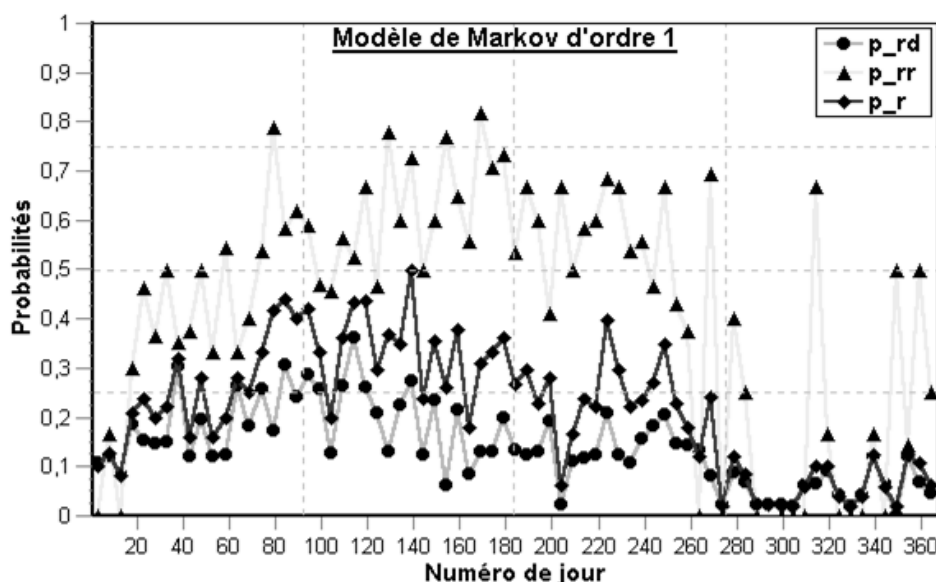


Figure 1 : Répertoire des évènements climatiques à partir du 1er septembre dans la station d'Alger Dar el Beida

Les probabilités associées aux événements décrits ci-dessus sont représentés en figure 1

***Pr*** : Probabilité d'occurrence de la pluie pour un jour donné de l'année (mm).

***Prr***: Probabilité d'occurrence de deux jours consécutifs pluvieux

***Prd*** : Probabilité d'occurrence d'un jour sec précédé d'un jour pluvieux

Ces résultats présentés sur la figure 1 confirment l'amorce des pluies d'automne, la première probabilité significative se rapportant au début d'octobre, tandis que les chances de pluies estivales sont pratiquement nulles à partir du 270<sup>e</sup> jour soit vers la fin mai.

## 2.2 Analyse de la période test

Un changement climatique régional peut être perçu non seulement à travers la variation quantitative des variables indicatrices telles que la température (Houghton J.T, 1995), mais également à partir d'un décalage dans le temps des événements climatiques habituels. Dans cette perspective, nous avons procédé à l'analyse des mêmes événements sur la période de dix années agricoles de 2004-2005 à 2013-2014, à la même station et en conservant les mêmes définitions que précédemment. Le tableau 2 ci-dessous résume les principaux résultats.

On note une régularité dans le début des pluies ; toutes les saisons pluvieuses débutant entre le 6 et le 16 octobre, ainsi qu'un allongement de la saison d'une dizaine de jours environ, pouvant ainsi s'étendre jusqu'à 167 jours. Cependant, cet accroissement peut être dû à l'effet de période et il n'en résulte pas nécessairement une augmentation des précipitations.

Ainsi, le risque de sécheresse subsiste et son effet dépend du stade phénologique de la culture. Pour la plupart des espèces étudiées une période critique de sensibilité à la sécheresse vers les phases floraison formation des fruits. Les céréales, quant à elles, présentent une sensibilité accrue en période de remplissage du grain. (Kirkhamet *al.*, 1990).

Tableau 2 : début et fin de la saison pluvieuse dans la station d'Alger Dar el Beida

Années	Début des pluies (N° du jour)*	Fin des pluies (N° du jour)*	Longueur de la saison (Jours)
04-05	41	208	167
05-06	46	206	160
06-07	38	183	145
07-08	44	185	141
08-09	36	183	147
09-10	38	183	145
10-11	46	184	138
11-12	39	183	144
12-13	40	187	147
13-14	37	198	161

\*Le N° du jour est déterminé en comptant à partir du 1<sup>er</sup> septembre

### 2.2.1 Estimation du risque de sécheresse :

Dans le climat semi-aride méditerranéen la sécheresse est un phénomène qui survient habituellement à l'approche de l'été. Cependant, la variabilité des précipitations dans le temps favorise l'occurrence d'épisodes secs plus ou moins longs à n'importe quelle période de la saison agricole (Hassini *et al.*, 2015). La figure 2 montre l'alternance d'épisodes pluvieux et secs au cours de l'année allant du 1<sup>er</sup> septembre 2004 au 31 août 2005. L'application du modèle de Markov aux pluies quotidiennes relatives à la période de référence permet de déterminer les séquences sèches maximales pouvant survenir en avril, mai et juin. En avril, la durée maximale d'une séquence sèche oscille entre 8 et 15 jours. En mai, elle varie de 12 à 16 jours. En juin, la sécheresse peut durer jusqu'à vingt-sept jours. Une telle information permet une intervention amont pour le choix d'une date de semis optimale. L'analyse effectuée sur la période test a permis de déterminer les durées maximales de séquences sèches pouvant survenir après la floraison (Figure 3), le semis étant effectué le 1<sup>er</sup> octobre, coïncidant avec le début de la saison des pluies. Les durées maximales de sécheresse les plus fréquentes sont de sept et onze jours. Les probabilités associées sont d'autant plus élevées que l'on approche de la saison des grandes chaleurs.

### 2.2.2. Date optimale de semis

Nous avons procédé à la simulation de six dates hypothétiques de semis de la culture de blé, allant du 1<sup>er</sup> octobre au 15 décembre. Une date de semis sera validée en minimisant le risque de sécheresse encouru à partir de la floraison. Celle-ci est déterminée à l'aide du cumul de températures à base 0°C.

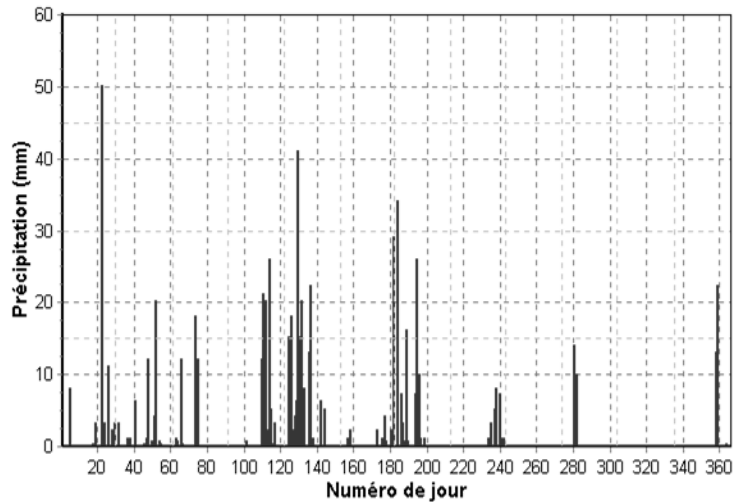


Figure 2 : Variation de la pluie quotidienne de l'année agricole 2004-2005 dans la station d'Alger Dar el Beida

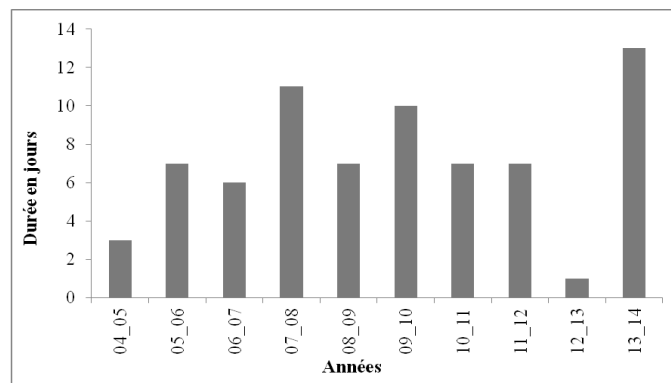


Figure 3 : Durée des séquences sèches après la floraison dans la station d'Alger Dar el Beida

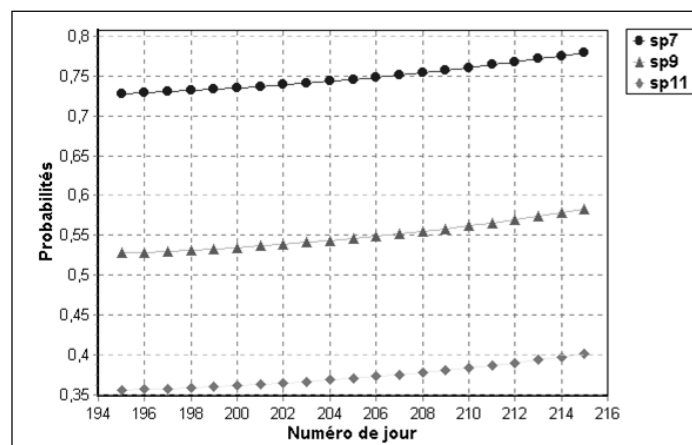


Figure 4 : Probabilités d'occurrence de séquences sèches de 7, 9 et 11 jours à compter du 13 mars dans la station d'Alger Dar el Beida.

Sur les figures 4 et 5 sont donnés les principaux résultats pour deux dates de semis théoriques à savoir le 13 mars et le 8 avril.

Notons qu'une séquence sèche de 7 à 9 jours peut, dans certains cas, causer des dégâts physiologiques importants et réduire considérablement le rendement. D'autre part, la simulation montre qu'un semis tardif augmente la probabilité d'un tel aléa climatique. De ce

fait, il apparait que la date du 1<sup>er</sup> octobre est une date présentant moins de risque d'échec, compte tenu du régime pluviométrique de la zone étudiée.

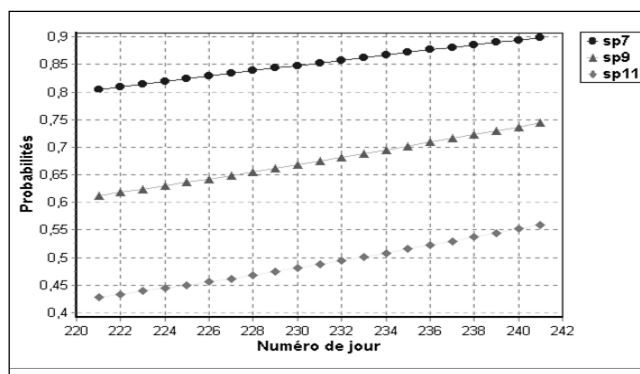


Figure 5 : Probabilités d'occurrence de séquences sèches de 7, 9 et 11 jours à compter du 8 avril (date de semis : 15/12) dans la station d'Alger Dar el Beida

## Conclusion

L'objectif assigné à la présente étude est de détecter, à partir de l'analyse des pluies, une éventuelle « anomalie » climatique. Le changement entrevu apparait présentement comme un allongement relatif de la saison des pluies. Abstraction faite de l'effet de période, on peut admettre que cette variation relève soit d'une délimitation moins nette entre les saisons météorologiques, soit d'un régime pluviométrique perturbé. Néanmoins, ceci demeure sans effet notable sur les cultures pluviales, dont les besoins en eau sont assurés, le cas échéant, par la réserve du sol.

La modélisation des pluies quotidiennes montre qu'une grande proportion des précipitations survient, de manière continue entre novembre et avril, avec de fortes probabilités d'occurrence de deux jours consécutifs pluvieux. Enfin, la stabilité relative des événements considérés constitue un gros avantage pour les campagnes agricoles. Elle permet d'établir un calendrier agricole conforme et de réduire les risques liés aux aléas climatiques dans les systèmes de production.

## Bibliographie

- Abderrahmani B., Abbou M., Dobbi A. et Hassini N., 2006. Evénements climatiques : Caractérisation de la sécheresse dans la région d'Oran, *Actes du XIX Colloque de l'AIC, Epernay*, pp. 37-42,
- Choisnel E, 1992. L'agro-météorologie, outil de décision, la Météorologie VII<sup>e</sup>, série N°42, pp. 4-10
- Dastane N.G., 1977. Précipitations efficaces, *Bull. FAO Irrigation et drainage*, 25, pp. 94-100
- Durand J.L., Lorgeou J., Picon-Cochard C., Volaire F., 2013. Ecophysiologie de la réponse et de l'adaptation des plantes fourragères et prairiales au changement climatique, *Fourrages*, **214**, pp. 111-118
- Hassini N., Abderrahmani B., Dobbi A., 2015. Changement climatique et phénomènes extrêmes : actions symbiotiques du climat et du milieu naturel dans l'occurrence de la sécheresse en Algérie. *XXVIII Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Liège, pp. 503-508
- Houghton J.T., Meira Filho L.G., Callender B.A., Harris N., Kattemberg A., Maskell A., 1995. Climate change 1995. The science of climate change. (eds), *Cambridge University Press*, Cambridge. IPCC,
- Kirkham M.B., Stewart B.A. and Nielsen D.R., 1990. *Plant response to water deficit, In irrigation of agricultural crops* Ed., *Agronomy Monograph* **30**, ASA-CSSA-SSSA, Madison WI, USA, pp. 323-342,



# Optimisation d'un modèle atmosphérique transnational de prédiction de la concentration journalière D'OZONE : intégration de paramètres météorologiques pour une évaluation de l'exposition à l'échelle kilométrique

Honorine Gauthier-Manuel<sup>1,2</sup>, Frederic Mauny<sup>1,2</sup>, Mathieu Boilleaut<sup>4</sup>, Marie Ristori<sup>4</sup>, Sophie Pujol<sup>1,2</sup>, Anne-Laure Parmentier<sup>1,2</sup> et Nadine Bernard<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> : Laboratoire Chrono-Environnement, UMR 6249, CNRS - Université de Franche-Comté, Usc INRA, Besançon, France ([honorine.gauthier-manuel@univ-fcomte.fr](mailto:honorine.gauthier-manuel@univ-fcomte.fr))

<sup>2</sup> : Centre Hospitalier Universitaire, uMETH Inserm CIC 1431, Besançon, France

<sup>3</sup> : Laboratoire ThéMA, UMR 6049, CNRS, Université Bourgogne-Franche-Comté, Besançon, France

<sup>4</sup> : ATMO Bourgogne-Franche-Comté, Besançon, France

## Résumé :

L'ozone ( $O_3$ ) est un polluant atmosphérique secondaire formé lors de réactions photochimiques, en présence de précurseurs ( $NO_x$ , COV, CO). L'exposition à l' $O_3$  est délicate à modéliser car ce polluant présente une forte variabilité spatio-temporelle. Le but des présents travaux est d'optimiser l'évaluation des concentrations journalières d' $O_3$  modélisées à échelle kilométrique, à l'aide de modèles MARS et de données météorologiques. La plateforme de modélisation PREVEST a généré une prédiction de concentrations maximales journalières d' $O_3$  pour un maillage de 3km de côté. La station de mesure de la qualité de l'air du réseau ATMO-Bourgogne-Franche-Comté, Besançon-Prévoyance (France) a enregistré quotidiennement les niveaux d'exposition à l' $O_3$ . Les données modélisées ont été comparées aux concentrations journalières mesurées localement. Des modèles MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines) ont été utilisés pour optimiser l'évaluation des concentrations d' $O_3$  à l'échelle kilométrique à l'aide de données météorologiques (température, humidité relative, vitesse du vent, hauteur de précipitations). Les variables météorologiques étaient significativement associées aux écarts modèle-mesure, en particulier la température. La prise en compte des variables météorologiques mesurées localement permet d'améliorer l'évaluation de concentrations journalières d' $O_3$ . Dans un contexte de changement climatique et d'épisodes récurrents de vagues de chaleur, l'influence de la température apparaît donc centrale dans l'optimisation de modèles atmosphériques.

**Mots-clés :** Ozone, exposition à échelle fine, variables météorologiques, optimisation.

## Abstract:

Ozone ( $O_3$ ) is a secondary atmospheric pollutant produced by photochemical reactions, in presence of precursors ( $NO_x$ , COV, CO). Ozone exposure is complex to assess because this pollutant is highly variable in space and time. The aim of this work is to optimize the assessment of ozone concentrations at the kilometric scale using MARS models and meteorological data. The modelling platform PREVEST provided daily maximum ozone concentrations on a 3km grid. The air quality monitoring station of Besançon-Prévoyance (France) measured the daily ozone concentrations. The modelled data have been compared to the local measurements. MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines) have been used to optimize the assessment of ozone exposure concentrations at the kilometric scale using meteorological data measured locally (temperature, relative humidity, wind speed, rainfall). The meteorological variables were significantly associated with discrepancy between modelled and measured concentrations. This was particularly the case for temperature. Taking locally-measured meteorological variables into account improves the assessment of daily  $O_3$  concentration. In a context of climate change and recurrent heat waves, the influence of temperature appears to be central in the optimization of atmospheric models.

**Keywords:** Ozone, fine-scale exposure, meteorological variables, optimization

## Introduction

Les polluants photo-oxydants de l'air (PAN, ozone ( $O_3$ )) présentent un enjeu sanitaire et environnemental majeur (Royal Society (Great Britain), 2008; Zhang et al., 2019). Ces préoccupations sont grandissantes face à l'élévation globale de la température de l'air dû au changement climatique et aux relations étroites entre comportement des photo-oxydants dans l'atmosphère (dispersion et transformation) et conditions météorologiques (Royal Society (Great Britain), 2008). L' $O_3$  est un polluant atmosphérique secondaire, formé lors de réactions photochimiques en présence de précurseurs (composés organiques volatiles (COV), oxydes d'azote ( $NO_x$ )) et sous l'influence de rayonnements solaires. La température, l'humidité relative et la vitesse des vents influent également sur les réactions photochimiques impliquées dans la formation et la dispersion de l' $O_3$  (Ramos et al., 2018; Royal Society, 2008). Ce polluant présente une forte variabilité dans le temps (saisonnalité, cycle nyctéméral) et dans l'espace

(Castell-Balaguer et al., 2012). C'est pourquoi l'évaluation des niveaux d'exposition humaine à l'O<sub>3</sub> est complexe.

L'O<sub>3</sub> a des impacts reconnus sur la santé humaine (Brunekreef and Holgate, 2002; Zhang et al., 2019). Il est à l'origine de troubles du système respiratoire et cardio-vasculaire, et engendre l'irritation des muqueuses des yeux et du nez (Bejot et al., 2011; Nuvolone et al., 2018; Zhang et al., 2019). Les outils de modélisation des concentrations d'O<sub>3</sub> ont connu un essor important durant les dernières décennies. La plateforme de modélisation PREVEST, produit une évaluation journalière des concentrations d'O<sub>3</sub> à échelle transnationale (France, Allemagne, Suisse, Luxembourg). Cette continuité spatiale de l'information permet d'évaluer l'exposition à l'O<sub>3</sub> sur une large emprise spatiale. Toutefois, l'utilisation de données de modélisation pour évaluer l'exposition humaine à ce polluant, nécessite précision et exactitude. Steven Porter et ses collaborateurs (2015) ont suggéré que les outils de modélisation pouvaient présenter des biais et des inexactitudes, et pouvaient demander des améliorations avant d'entrer en application dans des études épidémiologiques.

Dans le cadre de notre étude, nous disposons de concentrations journalières d'O<sub>3</sub> calculées à échelle transnationale par la plateforme de modélisation PREVEST, sur un maillage à échelle kilométrique. L'objectif des présents travaux était d'optimiser l'évaluation des concentrations journalières d'O<sub>3</sub> modélisées à échelle kilométrique, en intégrant des variables météorologiques dans des modèles MARS. Cette optimisation pourrait permettre de mieux évaluer l'exposition humaine à ce polluant.

## **Données et méthodes :**

### **2.1 Concentrations d'ozone**

Les concentrations maximales journalières mesurées ( $[O_3]_{\text{mesurée}}$ ) par la station de mesure fixe d'O<sub>3</sub> de Besançon-Prévoyance au cours de l'année 2018 ont été fournies par le réseau régional de surveillance de la qualité de l'air d'ATMO Bourgogne-Franche-Comté. Les concentrations maximales journalières modélisées ( $[O_3]_{\text{modélisée}}$ ) sur la commune de Besançon sont issues de la plateforme de modélisation PREVEST, développée et gérée par ATMO Grand-Est. Cette plateforme génère un maillage de 3km de côté qui s'étend sur le quart Nord-Est de la France, la Suisse, le Luxembourg et une partie de l'Allemagne. Le modèle PREVEST couple le modèle national de chimie-transport de l'air CHIMERE (Mailler et al., 2017; Menut et al., 2013; Valari et al., 2011) et le modèle météorologique WRF (Weather Research and Forecasting), utilisé dans de nombreux outils de simulation de la qualité de l'air (Thunis et al., 2016).

L'écart entre les concentrations modélisées et celles mesurées est calculé afin d'estimer la validité des concentrations modélisées par le modèle PREVEST :

$$\text{Écart modèle-mesure} = [O_3]_{\text{modélisée}} - [O_3]_{\text{mesurée}}$$

### **2.2 Variables météorologiques**

Les variables météorologiques prises en compte sont : température quotidienne maximale (°C), humidité relative moyenne (%), hauteur de précipitations (mm) et vitesse de vent maximale instantanée (m.s<sup>-1</sup>). Elles ont été mesurées quotidiennement par la station Météo France de Besançon. La distance entre la station de mesure d'O<sub>3</sub> (Besançon-Prévoyance) et la station Météo France de Besançon est de 1,95 km. Les variables météorologiques listées précédemment sont ensuite utilisées comme variables explicatives de l'écart modèle-mesure dans des modèles MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines).

### **2.3 Modèles MARS et optimisation des concentrations modélisées**

Les MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines) sont une méthode de régression multivariée non-paramétrique proposée par Friedman en 1991 (Friedman, 1991; Friedman and Roosen, 1995). Ils permettent de générer des régressions non-linéaires dites segmentées (« piecewise linear regression ») en identifiant des « turning points » dans la relation entre la variable à prédire et un ensemble de variables explicatives (Boehmke and Greenwell, 2019). Les variables sont sélectionnées automatiquement par le modèle grâce à une procédure « forward-backward » qui permet d'intégrer les variables contribuant de manière significative au modèle tout en évitant la production d'un modèle sur-ajusté.

Dans un premier temps, l'influence de chaque variable météorologique est considérée isolément en construisant quatre modèles prenant en compte chaque variable seule. Dans un second temps, un cinquième modèle prenant en compte les quatre variables météorologiques est construit, avec de possibles interactions entre les variables du modèle.

Enfin, le modèle MARS permet de modéliser mais surtout de prédire l'écart modèle-mesure en fonction des variables explicatives choisies. Cette prédiction de l'écart permet in fine d'ajuster les concentrations journalières d'ozone modélisées :

[O3] modélisée corrigée = [O3] modélisée – écart modèle-mesure prédit par le modèle MARS

## Résultats

### 3.1 Effet dissocié de variables météorologiques sur l'écart modèle-mesure

La série temporelle des concentrations d'ozone modélisées brutes, mesurées, et corrigées avec les modèles MARS intégrant séparément chaque variable météorologique est présentée en Figure 1. La correction la plus efficace est celle prenant en compte la température maximale ( $R^2 = 0,366$ ) (Figure 1.A), suivie de l'humidité relative ( $R^2 = 0,259$ ) (Figure 1.B) et la vitesse de vent maximale instantanée ( $R^2 = 0,114$ ) (Figure 1.C). Le modèle prenant en compte la température maximale journalière reproduit mieux les oscillations des mesures (Figure 1.A) en particulier au cours de la période printanière et estivale. L'amplitude des variations inter-journalières des concentrations d'O3 mesurée est forte. Les valeurs d'O3 modélisée brutes ne présentent pas une telle variabilité inter-journalière et tendent à lisser cette série temporelle. La prise en compte de la vitesse de vents maximale instantanée permet de mieux représenter les baisses de concentrations, notamment lors de la période hivernale (octobre à janvier) (Figure 1.C). Enfin, la hauteur de précipitations quotidienne ne présente aucune association significative avec l'écart modèle-mesure (le seul terme introduit dans le modèle étant l'intercept) (Figure 1.D).

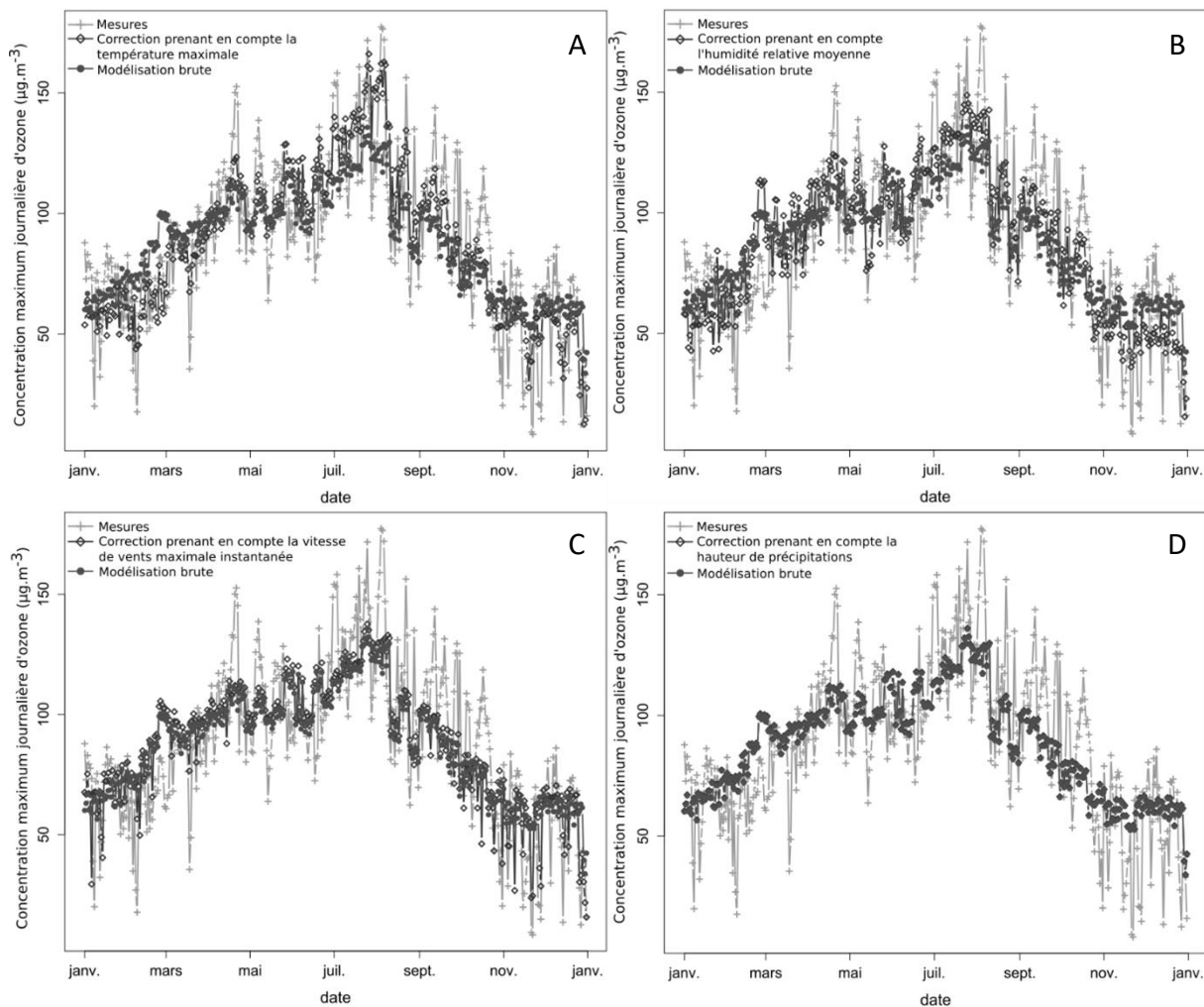


Figure 36: Concentration d'ozone journalière mesurée, modélisée brute (PREVEST), et corrigée avec l'une des variables météorologiques suivantes : température maximale (A), humidité relative moyenne (B), vitesse maximale instantanée de vents (C), hauteur de précipitations (D) ; à Besançon-Prévoyance en 2018

### 3.2 Effet combiné de variables météorologiques sur l'écart modèle-mesure

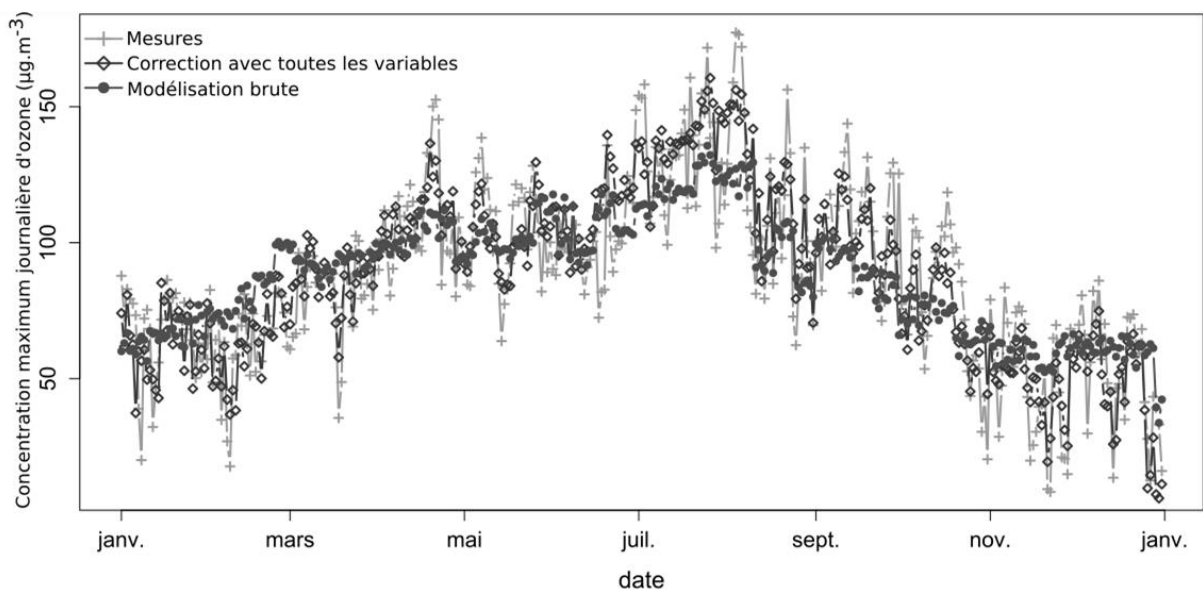


Figure 37 : Concentration d'ozone maximale journalière mesurée, modélisée brute (PREVEST), et corrigée à l'aide de quatre variables météorologiques (température maximale, humidité relative moyenne, vitesse maximale instantanée de vents, hauteur de précipitations), à Besançon-Prévoyance en 2018.

La Figure 2 présente la série temporelle des concentrations d’ozone modélisées brutes, mesurées, et corrigées avec les modèles MARS intégrant les quatre variables météorologiques. Cette correction est efficace et permet d’obtenir un meilleur suivi des pics de concentrations tout au long de l’année. Les valeurs d’O<sub>3</sub> modélisée corrigée contrastent avec celles d’O<sub>3</sub> modélisée qui ne présentent que peu de variabilité inter-journalière.

### **3.3 Comparaison de l’effet combiné des quatre variables météorologiques et de l’effet de la température maximale**

L’efficacité de la correction incluant les quatre variables météorologiques (Figure 2) est comparée à celle qui présentait le meilleur résultat dans la section 3.1 (température maximale, Figure 1.A). La correction intégrant les quatre variables météorologiques s’avère plus efficace ( $R^2 = 0,493$ ) que celle intégrant la température maximale ( $R^2 = 0,366$ ), en particulier au niveau des baisses de concentrations. Ce modèle permet une oscillation plus forte des concentrations et une variabilité des concentrations proches de celle des mesures. La complémentarité des variables offre une correction plus précise tout au long de l’année considérée.

#### **Discussion :**

L’intégration au modèle de plusieurs variables météorologiques mesurées localement a permis d’optimiser l’évaluation des concentrations journalières d’O<sub>3</sub> à l’échelle kilométrique. La variable température maximale journalière a une influence marquée sur l’écart modèle-mesure. Elle fournit une correction efficace sur les pics printaniers et estivaux (lissés pour l’O<sub>3</sub> modélisée) et lors de forts épisodes d’ensoleillement. Cette variable, fortement corrélée aux rayonnements solaires, catalyse les réactions photochimiques produisant l’O<sub>3</sub> (Bernard et al., 1999; Houzé, 2006), elle est donc corrélée positivement avec les concentrations d’ozone. La contribution de la variable vitesse maximale de vent est marquée sur la prédiction des baisses de concentration en O<sub>3</sub>. Cette constatation est en lien avec l’influence du vent sur la dispersion de l’O<sub>3</sub>. Cependant, des spécificités locales, telle que la topographie, pourraient réduire l’efficacité de la correction.

La prise en compte simultanée des quatre variables météorologiques offre une correction plus précise que chacune des variables prise isolément. Toutefois, l’apport de la correction intégrant les quatre variables est faible en comparaison à la correction apportée par la seule variable température (Figure 2). La température est disponible dans la majorité des stations météorologiques, ce qui n’est pas le cas des autres variables (comme la vitesse de vents). Afin de répondre au besoin d’optimisation et aux contraintes de disponibilité des données météorologiques sur un large territoire, la correction utilisant uniquement la variable météorologique la plus efficace est à retenir.

#### **Conclusion :**

La prise en compte de variables météorologiques mesurées localement, tout particulièrement la température maximale, permet d’améliorer l’évaluation de l’exposition journalière à l’O<sub>3</sub>. Dans un contexte de changement climatique et d’épisodes récurrents de vagues de chaleur, l’influence de la température apparaît donc centrale dans l’optimisation de modèles atmosphériques. Enfin, l’effet d’une exposition conjointe à des vagues de chaleur et à des concentrations élevées d’ozone reste incertain et constitue un enjeu sanitaire grandissant.

#### **Bibliographie**

Bejot, Y., Henrotin, J.B., Osseby, G.V., Zeller, M., Cottin, Y., Giroud, M., 2011. Impact of ozone air pollution on ischemic cerebral and cardiac events in Dijon, France. *Arch. Cardiovasc. Dis. Suppl.*,

- XXIes journées européennes de la société française de cardiologie, 3, **1**, 93.  
[https://doi.org/10.1016/S1878-6480\(11\)70282-8](https://doi.org/10.1016/S1878-6480(11)70282-8)
- Bernard, N., Gerber, M., Astre, C., Saintot, M., 1999. Ozone Measurement with Passive Samplers: Validation and Use for Ozone Pollution Assessment in Montpellier, France. *Environ. Sci. Technol.* **33**, **2**, 217–222. <https://doi.org/10.1021/es971140k>
- Boehmke, B., Greenwell, B.M., 2019. *Hands-On Machine Learning with R*. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9780367816377>
- Brunekreef, B., Holgate, S.T., 2002. Air pollution and health. *The Lancet*. **360**, **9341**, 1233–1242. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(02\)11274-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(02)11274-8)
- Castell-Balaguer, N., Téllez, L., Mantilla, E., 2012. Daily, seasonal and monthly variations in ozone levels recorded at the Turia river basin in Valencia (Eastern Spain). *Environ. Sci. Pollut. Res.* **19**, **8**, 3461–3480. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0881-5>
- Friedman, J.H., 1991. Multivariate Adaptive Regression Splines. *Ann. Stat.* **19**, **1**, 1–67. <https://doi.org/10.1214/aos/1176347963>
- Friedman, J.H., Roosen, C.B., 1995. An introduction to multivariate adaptive regression splines. *Stat. Methods Med. Res.* **4**, **3**, 197–217. <https://doi.org/10.1177/096228029500400303>
- Houzé, M.-L., 2006. *Prévision et spatialisation des concentrations en ozone troposphérique en Bourgogne (phdthesis)*. Université de Bourgogne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00458793>.
- Mailler, S., Menut, L., Khvorostyanov, D., Valari, M., Couvidat, F., Siour, G., Turquety, S., Briant, R., Tuccella, P., Bessagnet, B., Colette, A., Létinois, L., Markakis, K., Meleux, F., 2017. CHIMERE-2017: from urban to hemispheric chemistry-transport modeling. *Geosci. Model Dev.* **10**, **6**, 2397–2423. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2397-2017>
- Menut, L., Bessagnet, B., Khvorostyanov, D., Beekmann, M., Blond, N., Colette, A., Coll, I., Curci, G., Foret, G., Hodzic, A., Mailler, S., Meleux, F., Monge, J.-L., Pison, I., Siour, G., Turquety, S., Valari, M., Vautard, R., Vivanco, M.G., 2013. CHIMERE 2013: a model for regional atmospheric composition modelling. *Geosci. Model Dev.* **6**, **4**, 981–1028. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-981-2013>
- Nuvolone, D., Petri, D., Voller, F., 2018. The effects of ozone on human health. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **25**, **9**, 8074–8088. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9239-3>
- Ramos, Y., Requia, W.J., St-Onge, B., Blanchet, J.-P., Kestens, Y., Smargiassi, A., 2018. Spatial modeling of daily concentrations of ground-level ozone in Montreal, Canada: A comparison of geostatistical approaches. *Environ. Res.* **166**, 487–496. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.06.036>
- Royal Society (Great Britain), 2008. Ground-level ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications. The Royal Society, London.
- Steven Porter, P., Rao, S.T., Hogrefe, C., Gego, E., Mathur, R., 2015. Methods for reducing biases and errors in regional photochemical model outputs for use in emission reduction and exposure assessments. *Atmos. Environ.* **112**, 178–188. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.039>
- Thunis, P., Miranda, A., Baldasano, J.M., Blond, N., Douros, J., Graff, A., Janssen, S., Juda-Rezler, K., Karvosenoja, N., Maffei, G., Martilli, A., Rasoloharimahefa, M., Real, E., Viaene, P., Volta, M., White, L., 2016. Overview of current regional and local scale air quality modelling practices: Assessment and planning tools in the EU. *Environ. Sci. Policy*, Multidisciplinary research findings in support to the EU air quality policy: experiences from the APPRAISAL, SEFIRA and ACCENT-Plus EU FP7 projects **65**, 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.03.013>
- Valari, M., Menut, L., Chatignoux, E., 2011. Using a Chemistry Transport Model to Account for the Spatial Variability of Exposure Concentrations in Epidemiologic Air Pollution Studies. *J. Air Waste Manag. Assoc.* **61**, **2**, 164–179. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.61.2.164>
- Zhang, J., Wei, Y., Fang, Z., 2019. Ozone Pollution: A Major Health Hazard Worldwide. *Front. Immunol.* **10**, 2518. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.02518>

# EVENEMENTS HYDRO-PLUVIOMETRIQUES EXTREMES ET RISQUES D'INONDATIONS DANS LA CUVETTE-CONGOLAISE (RÉPUBLIQUE DU CONGO) DE 1960 À 2019

Ibiassi Mahoungou G.<sup>1</sup>, Mbilou Gampio U.<sup>2</sup>, Hanchane M.<sup>3</sup> et Maniaka F.W.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> : Laboratoire Géographie-Environnement et Aménagement (LAGEA), Formation doctorale de Géographie (Faculté des Lettres, Arts et des Sciences Humaines), LERPESCH, Ecole Normale Supérieure, Université Marien NGOUABI, B P 69 Brazzaville–Congo. E-mail : [trionpheom7@gmail.com](mailto:trionpheom7@gmail.com) // [geoffroyibiassi7@gmail.com](mailto:geoffroyibiassi7@gmail.com)

<sup>2</sup> : Parcours type Géologie, Faculté des Sciences et Techniques Université Marien NGOUABI, E-mail : [gampiombilou@gmail.com](mailto:gampiombilou@gmail.com)

<sup>3</sup> Laboratoire : Territoire, Patrimoine et Histoire, FLSH Dhar El Mehraz, USMBA Fès, Maroc, [mohamed.hanchane@usmba.ac.ma](mailto:mohamed.hanchane@usmba.ac.ma)

## Resume

La présente étude analyse l'évolution des événements hydro-pluviométriques extrêmes dans la Cuvette congolaise (République du Congo) de 1960 à 2019. Il est question de mettre en relief la relation entre les événements pluvio-extrêmes et les événements hydrologiques extrêmes (inondations). Deux types de données sont utilisés : les données pluviométriques et hydrologiques sur la période 1960-2019 provenant des services météorologiques (Direction de la Météorologie) et hydrologiques (SCVN) du Congo. Les résultats, reposant sur les méthodes statistiques tirées de la théorie des valeurs extrêmes (GEV), montrent une recrudescence des événements hydrologiques extrêmes (inondations) en relation positive et significative avec les événements pluvio-extrêmes (les hauteurs totales annuelles de pluies des jours humides et très humides).

**Mots-clés** : Evènements hydro-climatiques, Extrêmes climatiques, Cuvette congolaise ; République du Congo

## Abstract

This article analyzes the evolution of extreme hydro-climatic events in the Congolese Basin (Republic of the Congo) from 1960 to 2019. It is a question of highlighting the relationship between pluvio-extreme events and extreme hydrological events (floods). Two types of data are used: rainfall and hydrological data over the period 1960-2019 from the meteorological (Direction de la Météorologie) and hydrological (SCVN) services of Congo. Analyzes of the data, based on statistical methods drawn from the theory of extreme values (EVS), show an upsurge in extreme hydrological events (floods) in a positive and significant relationship with rainfall events (the total annual rainfall in humid and very humid days).

**Keywords**: Hydro-climatic events, Climatic extremes, Congolese basin; Republic of Congo

## Introduction

L'évolution du climat mondial actuel est de plus en plus exposée aux extrêmes climatiques à savoir les inondations et les secheresses, entraînant ainsi des conséquences significatives sur les régimes hydrologiques des cours d'eau. Les récentes études en République du Congo attestent une modification des régimes pluviométriques (Ibiassi Mahoungou et al. 2019 ; 2018) desquels dépendent les régimes hydrologiques.

Les projections climatiques futures du climat de l'Afrique Centrale (GIEC, 2018 ; Sankoué et al., 2018, Pokam Mban et al., 2018, Mansour Almazroui et al., 2019 ; Fotso-Nguemo et al., 2019 ; Tsalefac et al., 2015 ; Sonwa et al. 2015, Hanensler et al., 2013) traduisent une augmentation des extrêmes pluviométriques, notamment : l'augmentation des événements pluvieux extrêmes ; l'augmentation des jours très pluvieux, une augmentation des précipitations consécutives sur 5 jours, une augmentation de l'intensité des jours de pluie (les précipitations maximales sur 5 jours). Par conséquent, la République du Congo sera sous la menace d'une intensification du risque des hautes eaux (crues) dans les zones potentiellement inondables comme la Cuvette congolaise dont les états de surfaces (topographie faibles) accroissent sa vulnérabilité aux inondations (figure 1) et les impacts socio-économiques considérables sur les populations et l'agriculture. Les récentes inondations dans la partie septentrionale de la République du Congo en octobre-novembre 2019, qualifiées de

catastrophes naturelles, témoignent d'une réponse positive de la vulnérabilité de cet espace aux risques des événements pluvio-extrêmes, d'autant plus que la relation positive entre l'évolution des précipitations et les débits est établie dans le bassin versant du fleuve-Congo (Ibiassi Mahoungou et al., 2017).

Dans ce contexte de changement climatique aux conséquences prévisibles, la situation de la Cuvette congolaise mérite une attention particulière, notamment sur la tendance des pluies et des débits extrêmes, leur fréquence de retour selon une hypothèse de non stationnarité. En effet, l'analyse de la fréquence de retour des événements climatiques et hydrologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique est une étape nécessaire pour une aide à la prise de décision en matière d'aménagement durable du territoire (Hanchane et al., 2019). C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude, qui vise à donner aux usagers et aux décideurs des outils d'aide à la décision pour la prévention des catastrophes naturelles d'origine pluvio-hydrologiques dans la Cuvette congolaise, afin d'accroître sa capacité d'adaptation et d'augmenter sa résilience.

## 1. Données et méthodes

### 1.1. Présentation de la zone d'étude

La Cuvette congolaise est située entre les longitudes 15°24' et 18° Est et les latitudes 2°Nord et 2°50' Sud, avec une superficie d'environ  $3,5.10^6 \text{Km}^2$  (figure 1).

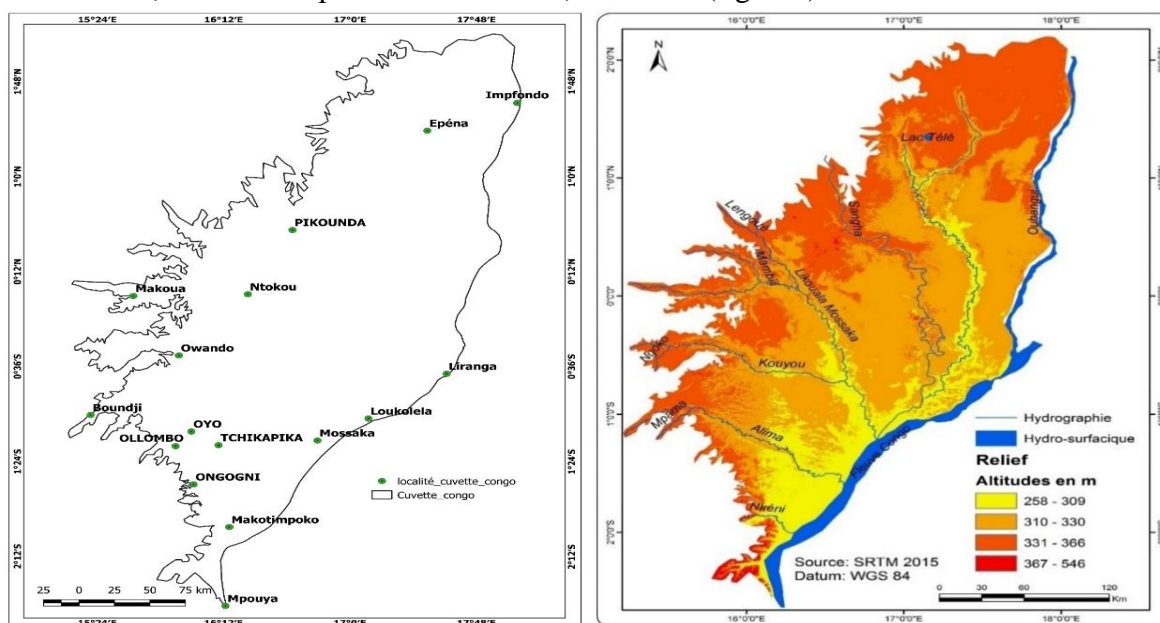


Figure 1 : localisation de la cuvette congolaise (source : les auteurs, 2020)

Elle appartient au domaine climatique équatorial, caractérisé par un régime pluviométrique et thermique bimodal, avec des maximums pluviométriques centrés sur les saisons de Mars-Avril-Mai et Septembre-Octobre-Novembre (Ibiassi et al., 2019). Ce rythme pluviométrique annuel dépend du balancement saisonnier de la Zone de Congergie Intertropicale (Ibiassi et al., 2021). La période des hautes eaux dans ce bassin s'observe aux mois de novembre et avril (Mbilou et al, 2016). La Cuvette congolaise représente une basse plaine alluviale d'altitude inférieure à 400 m qui couvre plus des deux tiers de l'ensemble de la zone d'étude dont l'affaissement a eu lieu au quaternaire où les alluvions sableuses et argileuses se sont accumulées (figure 1). Sa végétation est en grande partie dominée par la savane. On estime que 42% de la superficie de la Cuvette congolaise soit représentée par les affleurements de roches sédimentaires meubles, très peu ou pas consolidées (Moukolo et Cheikh, 2003). Le bassin est caractérisé par l'important développement des sols ferrallitiques appauvris modaux et surtout



des sols ferrallitiques remaniés sur roches basiques. Il existe également quelques zones de juxtaposition de sols ferrallitiques et des sols hydromorphes à pseudo-gley. L'étude stratigraphique laisse entrevoir a priori une succession hydrogéologique d'ensemble assez simple où les aquifères non confinés (nappes libres) sont principalement constitués d'alluvions quaternaires, de sables et grès tendres des séries Batékés et de grès continentaux du Stanley Pool. La population locale a pour activité principale l'agriculture et la pêche qui sont les principales sources génératrices de revenu.

### ***1.2. Données utilisées***

Les données Hydro-climatiques suivantes ont été utilisées durant la période 1960-2019 : les précipitations et les débits extrêmes.

Pour les précipitations nous avons : les précipitations quotidiennes ( $P_{jmax}$ ), correspondantes à l'intensité de pluies journalières (SDII), la hauteur totale annuelle de pluies des jours très humides (R95p), la hauteur totale annuelle de pluies des jours humides (R90p).

Les débits utilisés sont ceux instantanés maximaux ( $Q_{max}$ ) qui correspondent aux débits journaliers maximaux des principaux cours d'eau suivants : Sangha, l'Oubangui et Fleuve Congo).

Les séries ont été traitées avec les outils d'analyse statistique de données : XLSAT Premium, CLIMPACT2 et GEV sous Matlab.

### ***1.3. Méthode de traitement et d'analyse des données***

Les méthodes d'analyse utilisées sont statistiques, les mêmes utilisées par Yapi et al. (2019), Hanchane (2018), Hanchane (2019) et Obda et al. (2009). Ces méthodes ont permis d'apprécier l'évolution des événements hydro-climatiques extrêmes dans la Cuvette congolaise et d'analyser leurs fréquences, leurs intensités et leurs périodes de retour. Les principaux indices caractérisant les extrêmes hydro-climatiques pour la détermination des événements pluvio-extrêmes (EPE) sont : l'intensité de pluies journalières (SDII), la hauteur totale des jours humides (R90p) et la hauteur totale annuelle de pluies des jours très humides (R95p). Ces événements ont été caractérisés par leur fréquence (nombre de jours pluvieux où l'intensité est  $\geq$  au 95<sup>e</sup> centile et 90<sup>e</sup> centile).

Le calcul de la fréquence de retour des événements extrêmes est basé sur la loi GEV (Generalized Events Extreme) selon des hypothèses de stationnarité et de non-stationnarité du climat (Cheng et al (2014). Le programme NEVA (Nonstationary Extreme Value Analysis), développé par Cheng et al (2014), a permis d'estimer la période de retour des valeurs extrêmes selon les hypothèses de stationnarité et de non stationnarité des séries de valeurs extrêmes. L'hypothèse de stationnarité est vérifiée par le test de Mann-Kendall et l'estimation des périodes et des niveaux de retour reposent sur des simulations nommées MCMC (Méthode de Monte Carlo par la Chaîne de Markov).

## **2. Résultats**

### ***2.1. Tendances des précipitations journalières maximales et des débits maximaux***

L'analyse des données des précipitations journalières maximales et des débits maximaux (figure 3) selon le test "Z" de Mann Kendall affiche une évolution stationnaire des  $P_{jmax}$  ( $Z=1.42$ ) avec une valeur positive de la statistique Z de Mann Kendall et une p-value supérieure au seuil  $\alpha$  (0.05) (figure 3A). Les  $Q_{jmax}$  relatifs sont non stationnaires avec une tendance générale vers la diminution ( $Z=-2.24$ ). En effet, les débits maximaux du Fleuve Congo (figure 3B), de l'Oubangui (Figure 3 C) et de la Sangha (figure 3 D) traduisent une tendance à la diminution avec des valeurs négatives de la statistique Z de Mann Kendall.

Cependant elle n'est significative que pour le Fleuve-Congo et l'Oubangui qui ont des p-values inférieures au seuil  $\alpha$  (0.05).

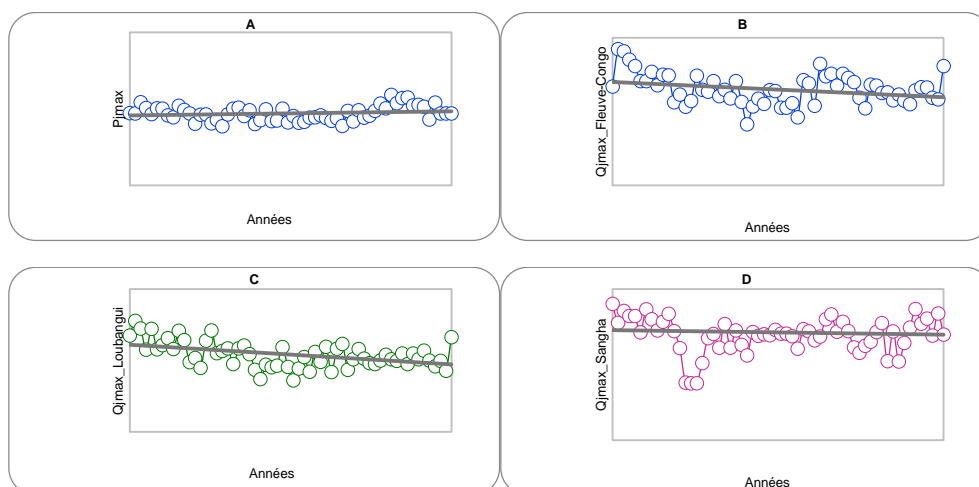


Figure 3: Tendence des précipitations et des débits maximaux dans la Cuvette congolaise de 1960 à 2019

## 2.2. Détermination des périodes de retours des événements pluvio-hydrologiques extrêmes dans la Cuvette-congolaise de 1960 à 2019

Les événements pluviométriques et hydrologiques extrêmes correspondant au R95p ont un temps de retour de 15 ans, soit une probabilité de 6% de se produire plusieurs fois dans une même année particulière ou une fois pendant plusieurs années consécutives. Par contre, Les événements pluviométriques extrêmes correspondant au R90p ont un temps de retour de 10 ans sur le Fleuve-Congo, soit une probabilité de 10% de se produire plusieurs fois dans une même année particulière, ou une fois pendant plusieurs années consécutives.

Tableau 1: Années et périodes de retour des événements pluvio-hydrologiques extrêmes dans le bassin de la Cuvette-Congolaise de 1960 à 2019

Variabes	Extrêmes pluvio-hydrologiques	Années d'extrêmes pluvio-hydrologiques	Périodes de retour	Probabilité d'occurrence
Evenements pluviométriques extrêmes	R95p	1962,2008, 2010, 2011	15 ans	6%
	R90p	1962,2006,2008,2009, 2010,2011, 2016	9 ans	11%
Evenements hydrologiques extrêmes sur le fleuve Congo	R95p	1961,1962,1963,1997	15 ans	6%
	R90p	1961,1962, 1963, 1964,1997, 2019	10 ans	10%
Evenements hydrologiques extrêmes sur l'Oubangui	R95p	1961,1962,1964,1975	15 ans	6%
	R90p	1960, 1961, 1962, 1964,1969, 1975, 2019	9 ans	11%
Evenements hydrologiques extrêmes sur la Sangha	R95p	1960,1962,1966,2014	15 ans	6%
	R90p	1960,1962, 1966, 1970,1999, 2014, 2018, 2019	7 ans	14%

Les extrêmes hydrologiques ont un temps de retour de 9 ans sur l'Oubangui, soit une probabilité de 11% de se produire plusieurs fois dans une même année particulière, ou une fois pendant plusieurs années consécutives ; un temps de retour de 7 ans sur la Sangha, soit une probabilité de 14% de se produire plusieurs fois dans une même année particulière, ou une fois pendant plusieurs années consécutives.

## 3. Discussion des résultats

Les résultats sur l'évolution des événements pluviométriques extrêmes et les événements hydrologiques extrêmes dans le bassin de la Cuvette congolaise montrent une évolution synchrone en termes de tendance à la baisse faiblement significative. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par Ibiassi Mahoungou et al. (2017).

Cette tendance à la baisse des événements pluvio-extrêmes dans la Cuvette congolaise n'explique pas le risque d'inondation.

De même, les résultats des corrélations entre les événements pluviométriques extrêmes et les événements hydrologiques extrêmes dans la Cuvette-congolaise (tableau 2) indiquent une relation positive bien que faiblement significative entre les événements pluviométriques extrêmes et les événements hydrologiques extrêmes dans la Cuvette-congolaise.

Ces résultats expliquent partiellement l'ampleur des conséquences (inondations) qu'occasionnent les extrêmes hydrologiques dans la Cuvette congolaise durant cette dernière décennie. Ils sont similaires avec ceux trouvés par Hanchaneet al., (2019), qui trouvent une relation positive entre les événements pluvio-extrêmes et les débits extrêmes entraînant un risque de pluies-débit extrêmes dans le bassin versant de l'Oued Melloulou (Maroc).

**Tableau 2** : Résultats des corrélations canoniques entre les événements pluviométriques extrêmes et les événements hydrologiques extrêmes dans la Cuvette-congolaise.

Variables	Pjmax	Qjmax_Fleuve-Congo	Qjmax_Loubangui	Qjmax_Sangha
Pjmax	<b>1</b>	0,094	0,120	0,180
Qjmax_Fleuve-Congo	0,094	<b>1</b>	0,678	0,430
Qjmax_Oubangui	0,120	0,678	<b>1</b>	0,247
Qjmax_Sangha	0,180	0,430	0,247	<b>1</b>

Pour expliquer l'ampleur des conséquences des événements hydrologiques extrêmes dans la Cuvette-congolaise, en dehors des événements pluviométriques extrêmes, il faut y associer les caractéristiques bio-physiques de la Cuvette congolaise, notamment son relief faible (figure 1) et son réseau hydrographique dense convergeant vers une zone à topographie faible, la rendant ainsi très sensible et potentiellement inondable à l'accumulation des événements pluvio-hydrologiques extrêmes pendant plusieurs jours consécutifs.

## Conclusion

L'évolution des événements pluvio-hydrologiques extrêmes dans la cuvette congolaise de 1960 à 2019 traduit une tendance à la baisse non significative pour les pluies extrêmes ( $P_j \max$ ) et à la baisse significative pour les extrêmes ( $Q_j \max$ ). L'analyse des périodes de retour montrent l'existence des périodes de retour de 15 ans pour le  $R_{95p}$  et le  $Q_{95p}$ , avec une probabilité de 6% de se produire plusieurs fois dans une même année particulière, ou une fois pendant plusieurs années consécutives. Le  $R_{90p}$  et le  $Q_{90p}$  montrent les périodes de retour allant de 7 à 10 ans sur le Fleuve-Congo, l'Oubangui et la Sangha avec des probabilités de 10% à 11% de se produire plusieurs fois dans une même année particulière, ou une fois pendant plusieurs années consécutives. Ces résultats associés aux caractéristiques physiques de la cuvette congolaise (topographie et réseau hydrographique) peuvent expliquer la fréquence et la recrudescence des inondations dans la cuvette congolaise au cours de cette dernière décennie, avec des conséquences néfastes enregistrées en 2019. Tenant compte des projections futures du climat de l'Afrique Centrale traduisant une augmentation des extrêmes pluviométriques, notamment l'augmentation des jours très pluvieux, l'augmentation des accumulations des précipitations consécutives sur 5 jours et de leurs intensités, la cuvette congolaise serait de plus en plus exposée aux risques d'inondations et de plus en plus vulnérable. Comme perspective, il

serait judicieux d'envisager l'élaboration d'une cartographie des zones potentiellement inondables de la Cuvette-congolaise dans le contexte climatique actuel pour accroître sa capacité d'adaptation et sa résilience.

## Références bibliographiques

- Cheng L., AghaKouchak A., Gilleland E., Katz R. W. 2014. Non-stationary extreme value analysis in a changing climate. *Climatic Change*, **127**, 353–369.
- Fotso-Nguemo Thierry C., Ismaïla Diallo, Moussa Diakhate, Derbetini A. Vondou, Mamadou L. Mbaye, et al. 2019. Projected changes in the seasonal cycle of extreme rainfall events from CORDEX simulations over Central Africa. *Climatic Change*, <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02492-9>; 19p.
- GIEC. 2018. Changements climatiques : les éléments scientifiques (résumé à l'intention des décideurs). 27 p.
- Hanchane M., Addou R. Obda K. 2019. Risque de pluies-débitsextrêmes dans le bassin versant de l'oued melloulou : analyse de tendance et période de retour. *Actes de colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), Thessaloniki - Grèce*, 469-474.
- Hanchane M. 2016. Variabilité des pluies exceptionnelles dans le bassin versant de Sebou (Maroc) : intensité et période de Retour selon l'hypothèse de non stationnarité temporelle. *Actes de colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Lausanne – Besançon*, 279-283.
- Haensler A., Saeed F. et Jacob D. 2013. Assessment of projected climate change signals over central Africa based on a multitude of global and regional climate projections. In: *Climate Change Scenarios for the Congo Basin. [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)]*. Climate Service Centre Report No. 11, Hamburg, Germany, ISSN : 2192-4058, 219p.
- Ibiassi Mahoungou G.; G.P. Wando G.P.; Souamy Legrand E., (2021): Positionnement de la Zone de Convergence Inter tropicale et évolution pluviométrique en République du Congo; revue Espace Géographique et Société Marocaine (EGSM) n°45/46, 89-103
- Ibiassi Mahoungou G., Maniaka F.W., Mbani C., (2019). Évolutions spatio-temporelles des saisons pluviométriques en République du Congo de 1932 à 2016; *Actes de colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), Thessaloniki – Grèce*, 315-320.
- Ibiassi Mahoungou G., Ndinga P., Maniaka F.W. 2016. Problématique de la modification des régimes Pluviométriques au sud-Congo (République du Congo) de 1932 à 2012, *Actes du XXIX Colloque International, Lausanne-Besançon, Lausanne – Besançon*, 291-296.
- Ibiassi Mahoungou G., Pandi A., Ayissou L. 2017. Extrêmes hydrologiques et variabilité décennale des précipitations saisonnières dans le bassin versant du fleuve Congo à Brazzaville (République du Congo) ; Harmattan. *In Géographie du Congo (Mélanges offerts au Professeur Bonaventure Maurice Mengho)*, 207-223.
- Tsalefac M., Hiol Hiol F., Mahé G., Laraque A., Sonwa D., Scholte P., Pokam W. et al. 2015. Climat de l'Afrique centrale : passé, présent et futur. In *Les forêts du Bassin du Congo - Forêts et changements climatiques. Eds : de Wasseige C., Tadoum M., Eba 'aAtyi R. et Doumenge C. Weyrich. Belgique*. 128 p.
- Mbilou Gampio U., Ngouala Mabonzo M., Tchomou M. 2016. Etude de la composition physico-chimique des eaux du bassin de la cuvette congolaise (République du Congo). *REVIST*, **28**, 1-12.
- Pokam Mba Wilfried, Georges-Noel T Longandjo, Wilfran Moufouma-Okia, Jean-Pierre Bell, Rachel James et al. 2018. Consequences of 1.5 °C and 2 °C global warming levels for temperature and precipitation changes over Central Africa. *Environ. Res. Lett.* 13p.
- Moukolo N. 1992. État des connaissances actuelles sur l'hydrogéologie du Congo Brazzaville. *Hydrogéologie, No 1-2*, 47-58.
- Obda. Kh et al. 2009. Hydrologie du Haut Melloulou (Moyen Atlas Nord Oriental). *Rev. Geomaghrib*, **5**, 89-102.
- Salaheddine El. 2008. Comparaison des méthodes d'estimation des paramètres du modèle GEV non stationnaire. *Rev des sciences de l'eau*, **21**, 35-50.
- Yapi A.F., Oga Y.M.S., N'guessan Bi V.H., Kpan O.J.G., Biemi J. 2019. Analyse des extrêmes pluviométriques par la méthode des indices climatiques dans la région de la marahoué (centre ouest de la côte d'ivoire). *Actes de colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), Thessaloniki - Grèce*, 283-288.

# CONTRIBUTION A L'ANALYSE DE LA VARIABILITE HYDRO CLIMATIQUE AU BASSIN DU NIGER : CAS DE LA STATION DE NIAMEY

Illiassou Naroua<sup>1</sup>, Hassoumi Djibo<sup>2</sup>, Souley Issaka<sup>3</sup> et Abdoul Madjid Ibrahima Abdou<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Département des Sciences de l'Environnement, Faculté des Sciences Agronomiques, Université Bobakar Bâ de Tillabéri, Niger, BP 175 Tillabéri Niger, +227 20711300, E-mail : [iliaso2002@gmail.com](mailto:iliaso2002@gmail.com)

<sup>2</sup>Département de Socio-Economie Agricole, Faculté des Sciences Agronomiques, Université Bobakar Bâ de Tillabéri, Niger, BP 175 Tillabéri Niger, +227 20711300, E-mail : [dhassoumi@yahoo.fr](mailto:dhassoumi@yahoo.fr)

<sup>3</sup>Département de Production durable des Cultures, Faculté des Sciences Agronomiques, Université Bobakar Bâ de Tillabéri, Niger, BP 175 Tillabéri Niger, +227 20711300, E-mail : [souleymayaki@gmail.com](mailto:souleymayaki@gmail.com)

<sup>4</sup>Université Bobakar Bâ de Tillabéri, Niger, E-mail : [abdoulmajid.ibrahim@gmail.com](mailto:abdoulmajid.ibrahim@gmail.com)

## Résumé

La caractérisation de la variabilité hydro-climatique permet d'améliorer les connaissances sur les phénomènes du climat et les écoulements des cours d'eau, ce qui facilite la prise de décisions pour la gestion durable des ressources en eau et la protection de l'environnement. Elle se justifie en particulier dans le contexte actuel du changement climatique où les écosystèmes sont susceptibles d'être à haut risque des phénomènes climatiques extrêmes (sécheresse, pluies très intenses, inondation, etc.). L'objectif de ce travail est de caractériser la variabilité des paramètres hydro-climatiques (précipitation et débit) mesurés à la station de Niamey. D'une part, il a été calculé les indices pluviométrique et hydrométrique et d'autre part, il a été appliqué des tests statistiques de détection de rupture et de segmentation de séries (de Pettit de Lee et Heghinian et de Hubert) à l'aide du logiciel KhronoStat 1.01, et d'analyse fréquentielle (ajustement de la loi de Gumbel), sur les séries chronologiques de débits et de pluviométrie annuelles, respectivement de 1984-2020 et 1985-2016. La pluviométrie se caractérise par une succession de période déficitaire et excédentaire par rapport à la moyenne de la série étudiée ainsi qu'un changement par incrémentation de la moyenne en début des années 1990 (tests de Pettit et de Lee et Heghinian). Par ailleurs, les écoulements se caractérisent par une période déficitaire (1984-1995) et une période excédentaire (1996-2020) par rapport à la moyenne de la série étudiée, ainsi que trois changements par augmentation de la moyenne respectivement dans les années 1990 (tests de Pettit et de Lee et Heghinian et de Hubert), en 2018 et en 2020 (Tests de Hubert). Les événements de crues et pluviométrie les plus fréquents (ceux ayant une chance sur deux de survenir) sont respectivement autour de 782,11 m<sup>3</sup>/s et 514,32 mm et les valeurs rares (ayant une période de retour supérieur ou égale à 50 ans) sont respectivement de 1293,16 m<sup>3</sup>/s et 796,67 mm. Ces résultats aideront à la prise de décisions telles que la conception des ouvrages hydrauliques, la gestion des ressources en eau et la prévention et la lutte contre les inondations.

**Mots clés :** Variabilité hydro climatique ; Bassin du Niger, Station de Niamey

## 1. Introduction

Depuis les bouleversements climatiques des années 1970, comme dans tous les bassins tropicaux, il a été observé des perturbations hydro climatiques dans le bassin versant du Niger (Décroix et al., 2013). La variabilité des précipitations durant plusieurs décennies a affecté les écoulements des cours d'eau du Sahel et en particulier ceux du fleuve Niger (Amani et Nguetora, 2002). Cette variabilité hydro, résulte en partie de la disparition de la couverture végétale naturelle, elle-même due à la combinaison des effets de la sécheresse et des causes anthropiques, d'une part, et d'autre part, des événements de cumul pluviométrique élevé (Mahé et Paturel, 2009 ; Descroix et al., 2013). La perte de la couverture végétale, résultat de l'encroustement des sols et de la sécheresse, au-delà de réduire la rétention des écoulements, a favorisé l'ensablement des cours d'eau et, en ajoutant à cela l'évolution du régime pluviométrique, les risques d'inondation dans les régions riveraines du Niger moyen se sont aggravés considérablement (Mahamadou et al., 2018). Dans ce bassin du Niger, le débit reçu par la zone Sahélienne est beaucoup moins élevé que celui qu'elle produit depuis 40 ans, du fait de la dégradation des états de surface (Mahé et al., 2011). Par ailleurs, de forts régimes d'écoulements superficiels ont été observés à des années de moindre cumul pluviométrique (Decroix et al., 2018). Ce phénomène de variabilité des écoulements a été aussi très souvent lié aux effets du changement climatique. En ce sens que la projection des scénarios futures est très incertaine et la caractérisation des tendances des paramètres climatiques est

difficilement appréciable. Dans ce contexte d'environnement dégradé et de recrudescence des phénomènes météorologiques extrêmes conduisant à des catastrophes climatiques telles que la sécheresse et les inondations ainsi que leurs corollaires, il est crucial de comprendre le comportement des paramètres impliqués dans la réaction hydrologique de ce bassin versant. Ainsi, l'objectif de ce travail est de caractériser la variabilité des paramètres hydro-climatiques (précipitation et débit) mesurés à la station de Niamey à travers l'application des tests statistiques de détection de rupture et d'analyse fréquentielle, sur les séries des trente dernières années de débits et de précipitations annuelles.

## **2. Matériels et Méthode**

### **2.1. Présentation de la zone d'étude et série de données**

La zone d'étude est le bassin versant du Niger, précisément dans la zone du Niger moyen, à la station de Niamey, comprise entre les coordonnées : 13°30'9 de latitudes Nord et 02°05'2 longitudes Est, caractérisée par une faible pluviométrie contribuant aux cours d'eau principale d'entre 250 et 700mm (Mahamadou et al., 2018). Des séries chronologiques de débits mensuels et annuels du cours d'eau du fleuve Niger, d'entre 1984 et 2020, mesurées à la station de Niamey, et de pluviométries mensuelles et annuelles d'entre 1985 et 2016, ont été collectées, respectivement à l'Agence du Bassin de Niger (ABN) et à la Direction Nationale de la Météorologie (DNM).

### **2.2. Méthodologie**

Des outils non statistiques et statistiques ont servi pour l'analyse de la variabilité hydro climatique dans le cadre cette étude. Il a été analysé l'évolution du cumul pluviométrique annuel à travers l'évaluation de l'indice pluviométrique (Descroix et al., 2013 ; Mahé et Paturel 2009; Alamouet al., 2016) qui, permet de dégager la variabilité interannuelle, le déficit pluviométrique annuelle ainsi que les grandes tendances des séries chronologiques. Cet indice se calcule comme suit :  $I = \frac{x_i - \bar{X}}{\sigma}$  où I représente l'indice pluviométrique,  $X_i$  le cumul annuel,  $\bar{X}$  la moyenne des cumuls annuels et  $\sigma$  l'écart type de la série des données.

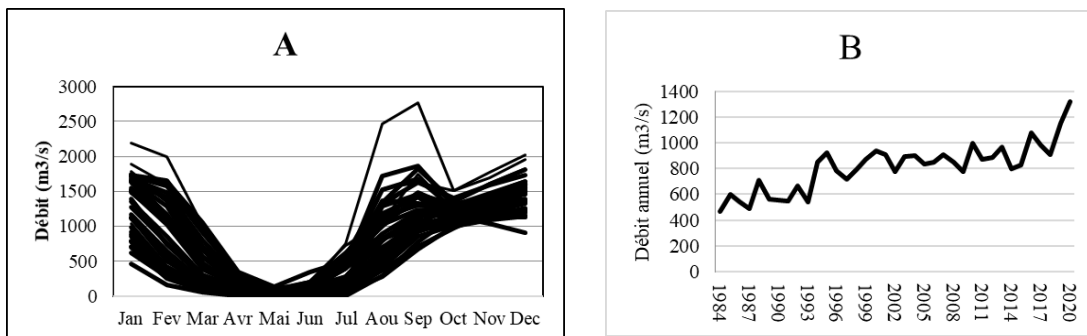
De même, les représentations graphiques de la série chronologique mensuelle et celle des cumuls annuels des débits a permis d'analyser les régimes d'écoulement trimestrielle et décennal (Amani et Nguetora, 2002; Mahé et Paturel, 2009). Par ailleurs, les tests de détection de rupture (de Pettit de Lee et Heghinian et de Hubert) ont été effectués à l'aide du logiciel KhronoStat 1.01, dans l'objectif de déterminer de changement dans la loi de probabilité de séries chronologiques (Alamouet al., 2016 ; Decroix et al., 2018) ; ce qui se traduit par la détection d'un changement de moyenne (ou rupture) des dites séries chronologiques et, conséquemment, celle des dates ou période de rupture. En outre, les séries chronologiques ont été soumises aux tests d'indépendance de Wald-Wolfowitz, de stationnarité de Kendall et d'homogénéité de Wilcoxon et postérieurement, l'analyse fréquentielle a consisté à l'application de la loi de distribution de Gumbel (Avahoulin et al., 2013 ; Koumassi et al., 2014).

## **3. Résultats et Discussion**

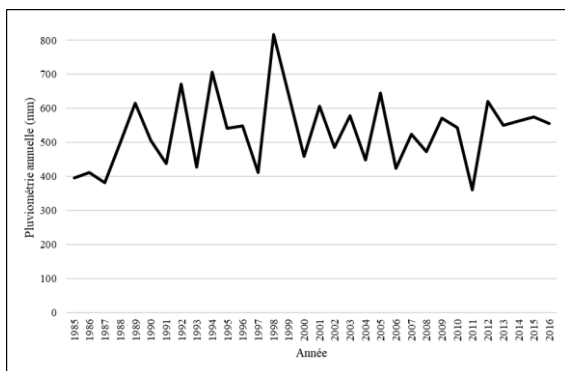
### **3.1. Analyse de la variabilité interannuelle**

Il ressort de l'analyse descriptive des séries chronologiques des moyennes de 812,57 m<sup>3</sup>/s et 531,15 mm et d'écart type de 185,39 et 102,43, respectivement pour les écoulements et la pluviométrie. Les valeurs de cumul annuel mini et maxi des écoulements (Figure 1B) ont correspondu respectivement à 468,45 et 1319,02 m<sup>3</sup>/s alors que ceux de la pluviométrie sont de 359,8 et 816,6 mm (Figure 2) ; ceci concordant aux observations de Descroix et al., (2013). Le régime des écoulements se caractérise par deux saisons de haute eau correspondants aux premier et troisième semestres (crue guinéenne et crue locale) et deux saisons de basse eau

(deuxième et quatrième trimestre) (Figure 1A). En outre, à partir de l'année 1993, on observe une tendance évolutive du débit jusqu'en 2020 (Figure 1B) et corolairement l'accroissement du risque d'inondation dans les zones riveraines du cours d'eau commecela a été déterminé parBechler-Carmaux et al., (2000) et Mahamadou et al., (2018).



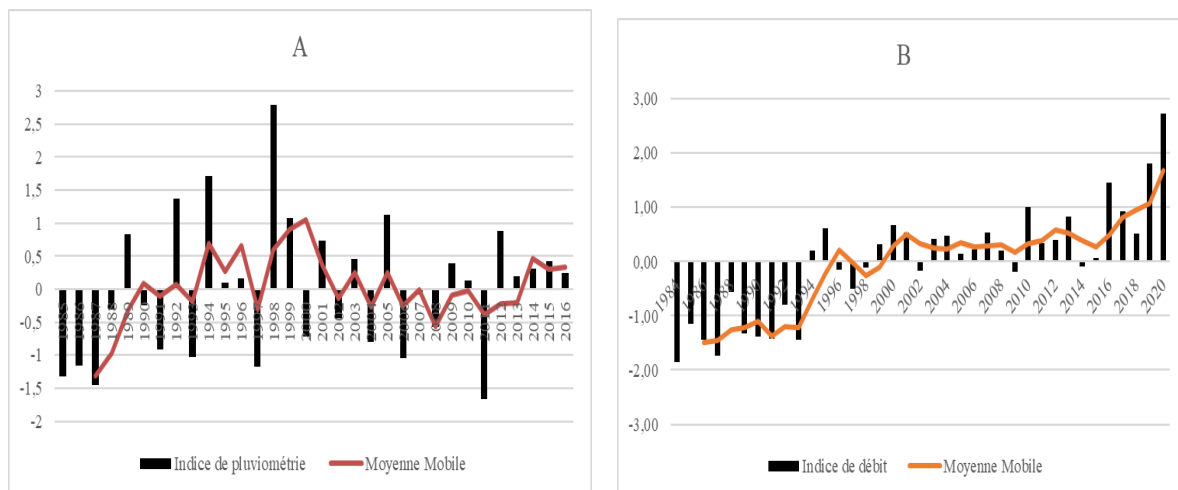
**Figure 1. (A) Régime annuel des écoulements et (B) Variabilité inter annuelle des écoulements**



**Figure 2. Variabilité inter annuelle de la pluviométrie**

La représentation graphique (Figure 3A) des indices de pluviométrie calculés et leurs moyennes mobiles montrent une tendance irrégulière de successions de périodes secs et humides comme pour le cas du travail de Ali et Lebel (2009), tandis que du point de vue hydrométrique (Figure 3B), la tendance est marquée par la succession d'une période déficitaire (entre 1984 et 1995) et d'une autre excédentaire (entre 1996 et 2020).

En dépit du caractère déficitaire de plusieurs années pluviométriques de cette dernière période (1996-2020), ses indices hydrométriques ont été excédentaires. Ceci a été expliquée par plusieurs auteurs comme étant le paradoxe hydrologique du sahel (Amani et Nguetora, 2002 ; Mahé et Patrel, 2009 ; Mahé et al., 2011 ; Descroix et al., 2018). Des années de faible indice pluviométrique (2002-2013) ont engendré des indices hydrométriques excédentaires du fait de la réduction de la couverture végétale naturelle d'une part, et d'autre part, des effets de l'urbanisation (Braccio et Tiepolo, 2016).



**Figure 3. (A) Indice pluviométrique de la série de 1985 à 2016 à la station de Niamey et (B) Indice hydrométrique de la série chronologique de 1984 à 2020 à la station de Niamey.**

### 3.2. Détection de rupture dans les séries chronologiques de pluviométrie et de débit

Les tests de Lee et Heghinian, et de Pettitt ont permis de détecter respectivement une rupture en 1993 et en 1998 sur la série des écoulements et, en 1987 et 1991 sur la série des précipitations (Tableau 1). Par ailleurs, la procédure de segmentation de Hubert (Tableau 2) a conduit à trois ruptures (1984-1993 ; 1994-2018 et 2019-2020) de la série des débits et à aucune de celle de la pluviométrie (1985-2016).

**Tableau 1. Ruptures des séries chronologiques selon les tests de Pettit et de Lee et Heghinian**

PARAMETRES	TESTS DE RUPTURE	ANNEE DE RUPTURE	MOYENNE AVANT LA RUPTURE	MOYENNE APRES LA RUPTURE
DEBIT (M3/S) (1984-2020)	LEE ET HEGHINIAN	1993	568,63	902,91
	PETTIT	1998	650,5	923,07
PLUVIOMETRIE(MM) (1985-2016)	LEE ET HEGHINIAN	1987	396,73	545,05
	PETTIT	1991	464,16	549,908

**Tableau 2. Détection de rupture des séries chronologiques selon le test de segmentation de Hubert**

SEGMENTATION DE HUBERT	PERIODE DE RUPTURE	MOYENNE	ECART TYPE
DEBIT EN M3/S (1984-2020)	1984-1993	568,65	72,58
	1994-2018	876,452	81,12
	2019-2020	1233,7	120,632
PLUVIOMETRIE EN MM (1985-2016)	1985-2016	531,15	104,06

Il ressort de l'analyse de ces dates de ruptures que le changement de moyenne des pluviométries est non seulement moindre, mais aussi, il se produit un peu plus tôt par rapport à celui des débits. Le changement de moyenne des précipitations se traduit par une augmentation de la moyenne en début des années 1990, ceci concordant par des indices pluviométriques excédentaires durant ces années (Figure 3A), comme ce fut dans l'étude de Mahamadou et al., (2018). Quant aux



changements de moyenne des débits, elles se manifestent aussi par des augmentations de la moyenne, dans les années 1990 (tests de Lee et Heghinian, de Pettitt et d'Hubert), en 2018 et en 2020 (test de Hubert).

### 3.3. Analyse fréquentielle des débits et précipitations maximums

La figure 4 (A) et (B) montre les ajustements de la loi de Gumbel sur les séries chronologiques de débit et de pluviométrie et le Tableau 3 présente les paramètres des équations de ladite loi pour chacune des séries. Les cumuls de débit et de précipitation s'ajustent bien à la loi de Gumbel avec une marge d'erreur de 5% (Figure 4A et 4B). Les paramètres de l'équation de Gumbel ont permis de calculer les quantiles pour différentes périodes de retour T (Tableau 4).

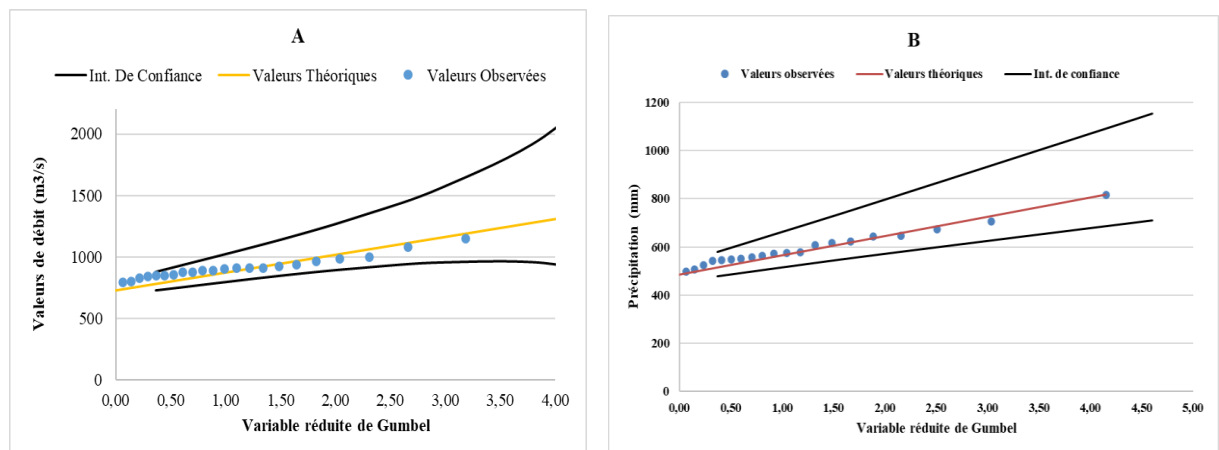


Figure 4. Ajustement de la loi de Gumbel sur les séries chronologiques de débit (A) et de précipitation (B)

Tableau 3. Paramètres de l'équation de Gumbel

	GRADEX	MODE	TAILLE DE L'ECHANTILLON
HYDROMETRIE	144,55	729,13	37
PLUVIOMETRIE	79,86	485,05	32

Tableau 4. Quantiles estimés sur les séries chronologiques de débit et de précipitation

PERIODE DE RETOUR T (ANS)	100	50	20	10	5	2
PROBABILITE DE NON DEPASSEMENT	0,99	0,98	0,95	0,9	0,8	0,5
P (MM) POUR PERIODE DE RETOUR T	852,43	796,67	722,26	664,77	604,84	514,32
Q (M3/S) POUR PERIODE DE RETOUR T	1394,08	1293,16	1158,47	1054,42	945,95	782,11

Il ressort de l'analyse fréquentielle que des événements ayant une chance sur deux de survenir peuvent atteindre 782,5 m³/s et 514,32 mm, respectivement pour les crues et la pluviométrie. Analogiquement, les événements ayant une chance sur 10 ou une chance sur 100 de survenir peuvent atteindre 1054,42 m³/s et 664,77 mm ou 1394,08 m³/s et 852,43 mm, respectivement pour les crues et la pluviométrie.

#### 4. Conclusions

La variabilité pluviométrique durant plusieurs décennies ainsi que les effets anthropiques et de l'accoutrement des sols, ont affecté les écoulements des cours d'eau du sahel et en particulier, ceux du bassin du Niger. Ceci rend difficile l'appréciation des tendances des paramètres climatiques et, très incertaine la projection des scénarios futures. C'est dans ce sens que ce travail vient contribuer à l'amélioration des connaissances sur la variabilité hydro climatique du bassin du Niger moyen. Il ressort, la succession de périodes déficitaires et excédentaires par rapport à la moyenne de la série pluviométrique étudiée, de manière irrégulière, avec un seul changement de moyenne en début des années 1990 (test de Lee et Heghinian, et de Pettitt) et, la succession d'une courte (1984-1993) et longue (1994-2002) période, respectivement déficitaire et excédentaire par rapport à la moyenne de la série de débit étudiée. On dénombre trois changements par augmentation de la moyenne des débits survenus respectivement durant les années 1990 (test de Lee et Heghinian, de Pettitt et d'Hubert), en 2018 et en 2020 (test d'Hubert). Les crues et pluviométrie les plus fréquents sont respectivement autour de 782,11 m<sup>3</sup>/s et 514,32 mm et les valeurs rares (ayant une période de retour supérieur ou égale à 50 ans) sont respectivement de 1293,16 m<sup>3</sup>/s et 796,67 mm.

#### 5. Bibliographie

- Alamou, E., A, Quenum G., M., LAWIN, E., A., B., D. F. et Afouda A. 2016. Variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie dans le bassin de l'Ouémé, Bénin *Afrique SCIENCE* **12(3)**, pp.315-328.
- Ali, A. and Lebel, T. (2009), The Sahelian standardized rainfall index revisited. *Int. J. Climatol.*, **29**: 1705-1714.
- Amani, A. ; Nguetora, M. 2002. Evidence d'une modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Niamey. Lannen, H., V., Demuth, S.p. 449-456.
- Avahounlin, F. R., Lawin, A. E., Alamou, E., Chabi, A. & Afouda, A. 2013. Analyse Fréquentielle des Séries de Pluies et Débits Maximaux de L'Ouémé et Estimation des Débits de Pointe. *Eur. J. Sci. Res.*, **107**, 355-369.
- Bechler-Carmaux, N., Mietton, M. et Lamotte, M. 2000. Le risque d'inondation fluviale à Niamey (Niger). Aléa, vulnérabilité et cartographie//River flood risks in Niamey (Niger). *Annales de Géographie*, **612**, 176-187.
- Braccio, S. et Tiepolo, M. 2016. *Analyse du risque d'inondation à Niamey, Niger*. V. Tarchiani et M. Tiepolo. 276p.
- Descroix, L., Guichard, F., Grippa, M., Lambert, L.A., Panthou, G., Mahé, G., Gal, L., Dardel, C., Quantin, G., Kergoat, L., Bouaita, Y., Hiernaux, P., Vischel, T., Pellarin, T., Faty, B., Wilcox, C., Abdou, M.M., Mamadou, I., Vandervaere, J., Diongue-Niang, A., N'diaye, O., Sané, Y., Dacosta, H., Gosset, M., Cassé, C., Sultan, B., Barry, A., Amogu, O., Nnomo, B.N., Barry, A., & Paturel, J. 2018. Evolution of Surface Hydrology in the Sahelo-Sudanian Strip: An Updated Review. *Water*, **10**, 478.
- Descroix, L., Niang, A. D., Dacosta, H., Panthou, G., Quantin, G., et Diedhiou, A. 2013. Évolution des pluies de cumul élevé et recrudescence des crues depuis 1951 dans le bassin du Niger moyen (Sahel) », *Climatologie*, p. 37-49.
- Koumassi, D. H. Tchibozo, A. E. Vissin, E. et Houssou, C. 2014. Analyse fréquentielle des événements hydro-pluviométriques extrêmes dans le bassin de la Sota au Bénin. *Afrique SCIENCE* **10(2)** 137 – 148
- Mahamadou, B.I., Moussa, I., et Maiga, O. 2018. Évolution des caractéristiques pluviométriques et recrudescence des inondations dans les localités riveraines du fleuve Niger. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*
- Mahé, G. et Paturel, J. 2009. 1896-2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers. *Comptes Rendus Geoscience*, **341**, 538-546.
- Mahé, G., Lienou, G., Bamba, F., Paturel, J., E., Adeaga, O., Descroix, L., Mariko, A., Olivry, A., J., Sangare, S., Ogilvie, A. et Clanet, J., C. 2011. Le fleuve Niger et le changement climatique au cours des 100 dernières années. Franks, E. Boegh, E. Blyth, D.M. Hannah, and K.K. Yilmaz, 344, 131-137.

# CHANGEMENT CLIMATIQUE – LA SITUATION INTERNATIONALE A L'AUBE DE LA COP26 A GLASGOW

Juvanon Du Vachat Regis

*Météo et Climat, 73 avenue de Paris, 94165 Saint-Mandé Cedex, [rjduvachat@gmail.com](mailto:rjduvachat@gmail.com)*

**Résumé :** *On fait l'historique des conférences climat de l'ONU (conférences des parties ou COP) depuis la conférence de Paris en 2015 (COP21) qui a permis l'Accord de Paris, célébré au niveau international. L'architecture de l'Accord est analysée, expliquant les sujets en jeu dans les COP suivantes : COP22 à Marrakech en 2016, COP23 à Bonn en 2017, COP24 à Katowice en 2018, et COP25 à Madrid en 2019. On examine le tournant de l'année 2020, lorsque les Etats-Unis, deuxième émetteur mondial de gaz à effet de serre après la Chine, reviennent dans le jeu international. Les nouvelles contributions volontaires dues pour fin 2020, doivent être présentées à la COP26 à Glasgow en Ecosse en novembre 2021. Les engagements de neutralité carbone des grands pays sont aussi discutés. Enfin la pandémie de la Covid-19, dont les conséquences ont été importantes en montrant une réduction effective mais non voulue des émissions, est analysée en conclusion.*

**Mots-clés :** *Changement climatique, négociations internationales, conférence des parties, contributions volontaires*

**Abstract :** *The climate conferences of the UNFCCC (conferences of parties or COP) are presented from COP21 at Paris (2015) where a successful agreement has been found, largely celebrated in the world. The structure of the Paris Agreement is presented in detail, because it explains the topics discussed in the following COPs : COP22 (Marrakech, 2016), COP23 (Bonn, 2017), COP24 (Katowice, 2018) and COP25 (Madrid, 2019). But there is a turning point in the year 2020, with the coming back of the USA in the international play, as they are the second country after China for the green-house gas emissions. We analyse the Intended Nationally Determined Contributions (INDC) to be presented during COP26 at Glasgow (November 2021) and the net zero-target of major economies. Finally, Covid-19 pandemic gives an example of an involuntary reduction of emissions, that could suggest ideas for future.*

**Mots-clés :** *Climate change, international negotiations, conference of parties, national contributions*

## Introduction

Le changement climatique est maintenant un thème géopolitique récurrent et régulier que l'on évoque tous les jours, même au temps de la Covid-19, où l'on est amené à comparer les impacts des deux phénomènes en indiquant souvent que les risques sont beaucoup plus grands avec le changement climatique (Dupuy, 2021) ! Malgré de sévères contraintes le calendrier des cinq ans (2016-2020) depuis l'Accord de Paris (2015) s'est tenu quasi normalement. L'agenda a comporté des COP inutiles ou ratées mais aussi des publications de rapports spéciaux du GIEC, dans une alternance habituelle. Après la description de l'Accord de Paris (2015), on fait l'historique des conférences climat qui ont suivi (2016-2020) et de leurs résultats. Un retournement s'opère en 2020 avec le retour des Etats-Unis dans le jeu international et précisément dans l'Accord de Paris. La conférence climat reportée en 2021, du fait de la pandémie Covid-19 est évoquée, avec la présentation des nouvelles contributions volontaires de réduction qui doivent rehausser les ambitions des Etats. La pandémie Covid-19 est évoquée en conclusion, puisqu'elle représente une réduction sensible d'activités, donc d'émissions de GES et pourrait préfigurer le monde futur.

## 1. L'Accord de Paris

Voici d'abord une lecture littérale de l'Accord de Paris à travers ses caractéristiques principales. Il s'agit d'un protocole à la Convention Climat de Rio (1992) qui est contraignant, mais ne prévoit pas de sanctions en cas de non-respect. Il entre en vigueur en 2020, après avoir été ratifié en moins d'un an par la plupart des pays signataires. Le but est de contenir le réchauffement global nettement en-dessous de 2°C et si possible en-dessous de 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels. Le seuil de 1,5°C a été demandé par les pays les plus vulnérables, notamment insulaires. Il n'y a pas d'objectif de réduction des émissions, alors que certaines versions antérieures du texte le prévoyaient. L'Accord vise un pic des émissions

mondiales dans les meilleurs délais. Un équilibre après 2050 sera recherché entre émissions anthropiques et absorptions par les puits de carbone (notamment les forêts). Enfin chaque pays communique sa contribution nationale aux réductions d'émissions, dont un bilan est effectué tous les 5 ans à partir de 2018 et qui devra manifester une progression !

Maintenant on examine l'Accord de façon plus critique en s'inspirant des commentaires d'une spécialiste des négociations climatiques (Dahan, 2016). Il s'agit certes d'une réussite diplomatique, où l'ensemble des pays signataires figurent au même niveau – contrairement à la division entre pays du Nord et pays du Sud dans le cas du Protocole de Kyoto – mais qui n'engage pas véritablement. Même l'aspect financier avec le fonds vert de 100 milliards par an pour les pays du Sud ne représente pas une contrainte importante face aux défis du changement climatique dans ces pays du Sud, auxquels s'ajoute le développement d'une économie bas carbone dans les pays émergents (Brésil, Afrique du Sud,...). Sur le plan de la négociation, le groupe des pays du Sud, étiqueté « G77 + Chine » comprend des pays tels que l'Arabie Saoudite, l'Inde, la Malaisie, ou les petites îles, qui ont des intérêts très différents, ce qui engendre de fortes dissensions internes. Le groupe africain, lui est plus uni et pèse d'un certain poids. Sur un plan général, on observe une évolution rapide de la géopolitique de l'énergie. Ainsi en cinq ans les Etats-Unis ont développé le gaz de schiste et n'ont plus besoin du pétrole du Moyen-Orient, chose que personne n'avait vu venir. Sur un plan financier, les organismes tels que le Fonds Monétaire International et la Banque mondiale continuent de financer des programmes basés sur l'exploitation des énergies fossiles ! C'est vraiment paradoxal, quand on prône comme la France (et l'Europe) la construction d'une Agence Mondiale de l'Environnement. Notons pour finir que l'Accord de Paris ne présente pas de dynamique concrète de réduction des émissions, en pointant des secteurs précis très émetteurs comme les transports (aérien, maritime).

## **2. L'agenda international du climat (2016-2020)**

Malgré de sévères contraintes le calendrier international des cinq ans (2016-2020) depuis l'Accord de Paris s'est tenu normalement. L'Agenda a comporté des COP inutiles ou ratées mais aussi des publications de rapports spéciaux du GIEC, puisque c'est une alternance des réunions GIEC, avec publications de rapports et des COP qui scandent l'agenda international sur le climat. Il faut souligner que la première année après 2015 a été largement consacrée à la ratification de l'Accord de Paris, réalisée en moins d'un an. En fait pour entrer en vigueur (terme consacré) il n'était pas nécessaire de passer par le parlement, une acceptation ou approbation du gouvernement suffisait. Enfin pour être effective, la ratification doit être approuvée par un minimum de 55% des pays, représentant au moins 55% des émissions mondiales de GES. Il se trouve que même la Corée du Nord l'a approuvé ! Certains pays l'ont fait tardivement comme la Russie en novembre 2019, en exigeant de tenir compte de l'immense forêt boréale (810 Mha) et sans verser de contribution aux pays du Sud ! Après la Russie, 186 pays (plus l'Europe) ont ratifié l'Accord de Paris, alors que 195 l'ont signé. Deux pays en sont absents : la Turquie et l'Iran, parmi les pays qui émettent plus de 1% des émissions globales.

Revenons alors à l'Agenda international. Après la COP21, qui a permis l'Accord de Paris, largement célébrée au niveau diplomatique international, la COP22 à Marrakech en 2016 prolonge l'Agenda de Lima (COP20 en 2014) et les résultats de Paris (2015). Cette COP22 présente une forte démonstration de l'engagement du Maroc pour l'environnement. Cependant son ambiance est plombée par les déclarations de Donald Trump sur le retrait des Etats-Unis de l'Accord de Paris ! Des sujets très techniques comme le Protocole de Montréal sur la protection de la couche d'ozone (Accord de Kigali en oct. 2016) et les engagements de réduction de l'Aviation civile Internationale sont cependant actés (Juvanon du Vachat, 2019). Puis la COP23 à Bonn, sous la présidence des îles Fidji, examine les règles d'application de l'Accord de Paris

et formule des principes sur le fonds vert, dans la mesure où la présidence s'exerce par un pays du Sud. Cette COP23 a lieu à Bonn pour éviter, semble-t-il, les critiques sur les trajets avion au tarif exorbitant qui n'auraient pas manqué si elle s'était tenue aux îles Fidji (qui sont aux antipodes de la planète climat occidentale). La COP24 à Katowice en Pologne en décembre 2018 s'inscrit dans la suite de Bonn et ne décide pas grand-chose ! Elle a lieu dans ce pays européen très charbonnier, ce que ne manqueront pas de souligner les ONG — notamment avec la tradition du « fossile » du jour ! La COP25 à Madrid en 2019, préparée en un temps record, puisqu'elle a remplacé au pied levé la réunion qui devait se tenir à Santiago au Chili, mais qui n'a pu se tenir à cause d'une forte mobilisation sociale (de type « gilets jaunes » en France). En fait c'était d'abord au Brésil qu'elle devait avoir lieu, mais J. Bolsonaro n'en voulait pas ! Un autre point important à Madrid a été la mobilisation de 20 000 militants écologistes dans les rues de Madrid au premier jour de la réunion (6 décembre 2019) pour tenter d'infléchir les décisions, comme cela avait été le cas à Copenhague en 2009. Cette COP25 a cependant pris des décisions importantes sur la préservation des océans mais n'a pu rehausser les ambitions des Contributions Nationales (INDC), comme cela était espéré, renvoyant ce processus à la COP26 à Glasgow en Ecosse en novembre 2021. La réunion d'ailleurs se termine avec un accord obtenu de justesse, après quarante-huit heures de prolongation, comme la plupart des COP !

Le déroulement des différentes COP amène à se poser des questions sur l'utilité de tels rendez-vous (Fabius, 2020). La lourdeur de ces réunions au sommet est critiquée à la fois par des pro-Climat et des climato-sceptiques, pour des raisons différentes mais qui se rejoignent sur l'inefficacité de ces grands-messes ! Aussi est-il suggéré d'en tenir une seulement tous les deux ans, afin de mieux les préparer et de leur donner plus de visibilité et de rayonnement. Il faudrait surtout rassembler la totalité des acteurs étatiques et non étatiques, les collectivités locales et les entreprises et plus largement mobiliser aussi les initiatives générales et sectorielles, enfin les financiers et les technologues. Mais le plus important c'est de fixer des objectifs précis pour que les COP soient l'occasion de se confronter et d'avancer, comme cela a été le cas de la COP21 avec les INDC préparées à l'avance.

### **3. Les Rapports spéciaux du GIEC (2016-2020)**

Un premier rapport spécial du GIEC a été demandé par la COP21 en 2015. Il s'agit d'étudier un monde à 1,5°C de réchauffement global et les moyens d'y arriver (<http://report.ipcc.ch/sr1.5/index.html>). Il a été réalisé de façon transdisciplinaire en associant les trois groupes spécialisés du GIEC. On en retient deux conclusions importantes : un monde à 2°C est très différent d'un monde à 1,5 °C de réchauffement global; c'est encore possible de rester en-dessous de 1,5°C mais les efforts seront très importants et concernent tous les GES et tous les secteurs. Deux autres rapports thématiques sont publiés en 2019 : sur la couverture terrestre et le changement climatique (<http://report.ipcc.ch/srccl>) et sur l'océan et la cryosphère avec le changement climatique (<http://report.ipcc.ch/srocc>).

### **4. Les contributions volontaires pour la COP26 (Glasgow)**

La fin de l'année 2020 marque l'échéance où les différentes parties à la Convention Climat doivent soumettre leurs nouvelles contributions volontaires (INDC), c'est-à-dire leurs nouveaux engagements de réduction, en principe plus ambitieux que les premiers soumis pour la COP21 en 2015. A cet effet P. Espinosa, secrétaire générale de la Convention Climat, a fait une déclaration fin 2019 pour encourager fortement les parties à faire cette soumission pour le 31 décembre 2020 (Espinosa, 2019). Voilà ce qu'il en est au début de l'année 2021. Seulement 45 parties : 44 pays plus l'Union Européenne prise comme un bloc, l'ont effectué en remplissant à cet effet le registre des Nations Unies. Cet ensemble représente environ 28% des émissions

globales, incluant des émetteurs importants comme le Royaume Uni et l'Union Européenne. On note cependant des absences significatives que sont les Etats-Unis, l'Inde et la Chine. Parmi les pays qui annoncent de nouvelles cibles, on trouve pêle-mêle : l'Union Européenne, la Russie, le Brésil, l'Australie, le Japon, la Corée du Sud, l'Argentine, le Mexique, la Zambie et le Royaume Uni. Si on inclut des pays qui ont indiqué leur intention de relever leur niveau d'ambition pour leur contribution volontaire, on arrive à 82 pays, représentant environ 33% des émissions globales. Parmi les pays qui n'ont pas annoncé de nouveaux plans on compte : l'Inde, l'Indonésie, l'Iran, le Canada, l'Arabie Saoudite et l'Afrique du Sud, six pays qui contribuent collectivement à 17% des émissions globales.

Par ailleurs un certain nombre de « grands pays » ont fait des annonces de neutralité carbone pour le futur. La Chine vise cet objectif pour 2060 et ajustera sa contribution nationale en 2030 pour rester cohérent. Pour l'Union Européenne c'est en 2050, comme le Japon et le Royaume Uni. Les Etats-Unis, avec le nouveau président J. Biden, vont probablement faire une déclaration analogue. La Figure 1 montre les courbes de réduction des « grands pays », à partir de 1990 qui est la référence de l'Union Européenne et du Royaume Uni et jusqu'en 2017 (émissions historiques connues). Les courbes sont extrapolées linéairement jusqu'en 2030, avec les trajectoires à suivre pour atteindre la neutralité carbone. La Figure 2 fait un travail similaire à partir de 2005, qui est la référence des Etats-Unis. Sa contribution volontaire court jusqu'à 2025 seulement. L'Inde qui n'exprime pas ses intentions futures en pourcentage, n'y figure pas (comme pour la Figure 1). Cependant, que signifie réellement la neutralité carbone ? Il s'agit d'absorber tout ce que l'on émet, grâce aux forêts, à l'océan, et en utilisant le stockage de carbone dans des aquifères souterrains, mais aussi en réduisant les émissions par tous les moyens (mode de vie, efficacité énergétique). A noter que la technique de stockage du carbone fait encore l'objet de recherches et n'est pas vraiment opérationnelle et qu'il faudra utiliser tous les leviers disponibles.

Il reste que pour synthétiser ces différentes contributions volontaires, et évaluer le réchauffement global qui en résulte, il faudrait qu'elles soient exprimées dans des repères comparables (unités et date de référence), ce qui est loin d'être le cas, comme en 2015.

## **Conclusion**

Cette réflexion sur l'agenda international du climat actualise les présentations précédentes faites aux congrès de l'AIC en 2016, à Besançon, l'année suivant la COP25, et en 2019 à Thessalonique en Grèce. A cette occasion, un premier bilan de l'Accord de Paris avait été effectué, soulignant l'urgence à agir (« il ne reste que trois ans ! » dit la secrétaire générale de la Convention Climat). Dans notre article, nous avons décrit le cheminement ONU sien sur le climat depuis l'Accord historique de Paris. Comme on l'aura constaté, ce cheminement très lent pour le grand public et les journalistes est souvent critiqué, parce que ces accords ont un contenu juridique important, qui explique cette lourdeur, mais aussi parce que les pays, qui jouent leur image au niveau international, sont très soucieux de leurs intérêts nationaux. Voici encore une réflexion issue de la récente crise sanitaire, sachant que l'individu ne change que sous la contrainte, comme l'enseigne la sociologie. En effet la Covid-19 a entraîné une réduction importante des émissions de GES (dans le transport et notamment l'avion), mais de courte durée, dont il faut savoir tirer parti pour inciter toutes les parties prenantes à réaliser des réductions dans leur secteur. Notons enfin les mouvements très divers à la fois citoyens et collectifs (marches pour le climat) qui démontrent une mobilisation importante dans ce sens.

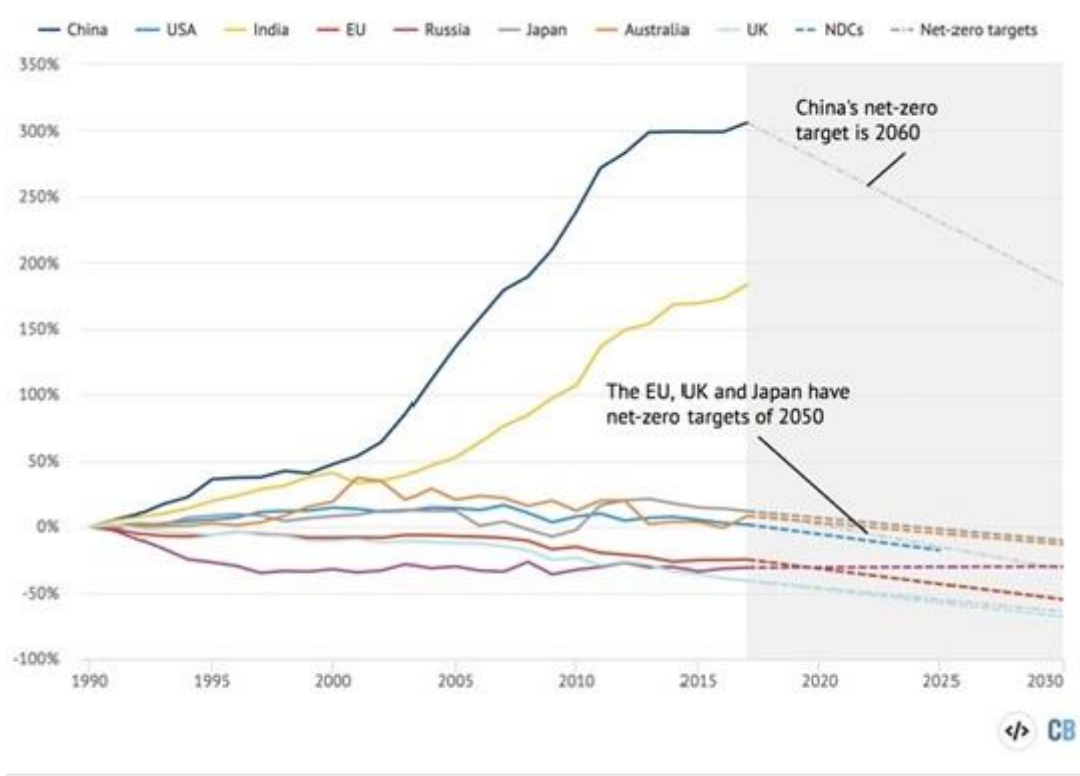


Figure 1 : Evolution des émissions (%) à partir de 1990 (pointillés : NDC & Neutralité C) Source : CarbonBrief.

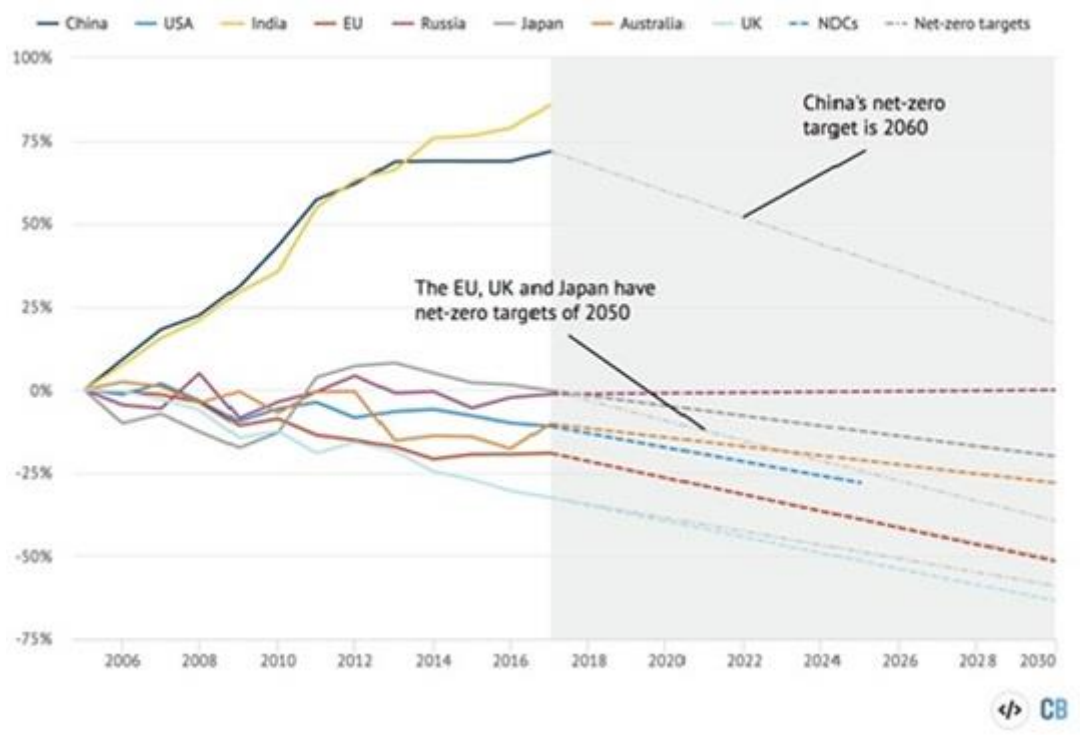


Figure 2 : Evolution des émissions (%) à partir de 2005 (pointillés : NDC & Neutralité C) Source : CarbonBrief.

## Acronymes

COP : Conference Of Parties

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (en anglais IPCC : Intergovernmental Panel of Climate Change)

INDC : Intended Nationally Determined Contribution

## Bibliographie

Dahan, A., 2016 : Ce qu'il reste à faire après l'accord de Paris sur le climat. Interview le 5 janvier 2016 sur le site ID4D : [www.ideas4development.org](http://www.ideas4development.org).

Dupuy JP, 2021 : *La catastrophe ou la vie. Pensées par temps de pandémie*. Editions du Seuil, 264 p.

Espinosa P., 2019 : Déclaration de l'ONU sur les changements climatiques le 20 décembre 2019. Site de la Convention Climat ([www.unfccc.int](http://www.unfccc.int)).

Fabius L., 2020 : *Rouge carbone*. Editions de l'Observatoire, 256 p.

Juvanon du Vachat R., 2016 : La conférence climat de Paris. Enjeux et perspectives. *Actes du 29<sup>ème</sup> colloque de l'AIC*, Besançon, Lausanne, p. 297-302.<http://www.climato.be/aic/colloques.html>

Juvanon du Vachat R., 2019 : Changement climatique. Panorama international. *Actes du 33<sup>ème</sup> colloque de l'AIC*, Thessalonique, p. 21-26.<http://www.climato.be/aic/colloques.html>



# UTILISATION D'UN MULTI-MODELE COMME UN OUTIL DE PROSPECTIVE CLIMATIQUE DANS LA SAVANE DE LA COTE D'IVOIRE

\*Kanga kouakou Hermann Michel<sup>1</sup>, Tra Bi Zamble Armand<sup>1</sup>, Konan Bah Quentin<sup>1</sup>, Dibi Kangah Pauline<sup>2</sup> et Assi-Kaudjhis Joseph P<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Université Alassane OUATTARA (Côte d'Ivoire), Laboratoire d'Analyse des Vulnérabilités Socio-environnementales (LAVSE), BP V 18 Bouaké 01.

<sup>2</sup> Université Félix Houphouët BOIGNY (Côte d'Ivoire), Institut de Géographie Tropicale (IGT), BP V34 Abidjan 01.....

Personne contact : KANGA Kouakou Hermann Michel ; email : [rmannkanga@gmail.com](mailto:rmannkanga@gmail.com)

**RESUME** : La communauté scientifique est de plus en plus préoccupée par la question du changement climatique. Subséquentement, de nombreux scénarii de modèles climatiques ont été élaborés pour simuler le climat futur. Cependant, l'insuffisance de Modèle Climatique Régional (MCR) plus précis rend difficile la simulation du climat, surtout dans les pays en développement comme la Côte d'Ivoire qui utilise plus les Modèles de Circulation Généraux (MCG). Dans ce pays, l'économie repose sur une agriculture pluviale qui est largement tributaire du climat. Ainsi, une connaissance plus précise du climat futur constitue un atout prospectif. Cette étude a pour objectif d'analyser la précision de MCR utilisable dans la zone savannicole de la Côte d'Ivoire. Ainsi, s'agit il de comparer l'exactitude d'un multi-modèle climatique aux données observables des stations synoptiques (Bouaké ; Bondoukou et Korhogo) en Côte d'Ivoire. Ce MCG est la cinquième phase du "Coupled Model Intercomparaison Project" (la génération CMIP5) utilisant les scénarii du "Radiative Concentration Pathways" (RCP) dont les RCP 4.5 et RCP 8.5. Les paramètres climatiques utilisés sont la pluviométrie et la température. La comparaison entre les relevés thermiques observés et les données du multi-modèle (selon les scénarii choisis) démontre que les températures sont en général bien simulées, malgré quelques nuances. En outre, le scénario RCP 8.5 reproduit le régime pluviométrique avec quelques biais, surtout à Bouaké et Bondoukou. Par contre, la pluviométrie des trois stations étudiées est mieux simulée par le scénario RCP 4.5 dans l'ensemble. En somme, l'approche multi-modèle apparaît comme un outil palliatif important pour l'insuffisance de stations climatiques au sol et une bonne méthode d'analyse du climat futur.

**Mots-clés** : CMIP5, scénarii, simulation, Côte d'Ivoire

**Abstract** : The scientific community is increasingly concerned about the issue of climate change. Subsequently, many climate model scenario were developed to simulate the future climate. However, the insufficiency of a more precise Regional Climate Model (RCM) makes it difficult to simulate the climate, especially in developing countries such as Côte d'Ivoire, which uses more General Circulation Model (GCM). In this country, the economy is based on rain-fed agriculture which is largely dependent on the climate. Thus, a more precise knowledge of the future climate constitutes a prospective asset. The objective of this study is to analyze the precision of the RCM that can be used in the savannah zone of the Côte d'Ivoire. Thus, it is a question to comparing the accuracy of a climate multi-model with observable data from synoptic stations (Bouaké, Bondoukou and Korhogo) in Côte d'Ivoire. This GCM is fifth phase of the Coupled Model Intercomparaison Project (the CMIP 5 generation) using the Radiative Concentration Pathways (RCP) scenario including RCP 4.5 and RCP 8.5. the climatic parameters used are rainfall and temperature. The comparison between the observed thermal readings and the multi-model data (depending on the scenarios chosen) shows that the temperatures are generally well simulated, despite some nuances. In addition, the RCP 8.5 scenario reproduces the rainfall regime with some bias, especially Bouaké and Bondoukou. On the other hand, the rainfall of the three stations studied is better simulated by the RCP 4.5 scenario overall. In short, the multi-model approach appears to be an important palliative tool for the insufficiency of climate stations on the ground and a good method of analyzing the future climate.

**Keys words** : CMIP5, scenario, simulation, Côte d'Ivoire

## 1. Introduction

Depuis près de trois décennies, les sommets internationaux sur le climat se sont amplifiés. Les mass-médias, les scientifiques et les politiques font le relais de ces rencontres et informent sur la récurrence des catastrophes hydrométéorologiques. Cela dénote que le changement climatique en cours est une réalité, et les activités anthropiques en sont sans équivoque responsables (Alex et al., 2017, p. 9). Les impacts de ce dérèglement du climat sont nombreux et rendent vulnérables les systèmes qui en dépendent ; en Afrique surtout, où l'économie agricole est largement tributaire du climat. En Côte d'Ivoire, les études sur la variabilité et le changement climatique révèlent entre autres, des sécheresses récurrentes, pluies irrégulières, un décalage saisonnier, une réduction des terres arables, une érosion côtière et des inondations (Kouassi et al., 2014, p. 198 ; Kanga, 2016, pp. 188-189).

Les incertitudes et menaces climatiques amènent les scientifiques à se projeter dans le futur. Ainsi, des scénarii et modèles de simulation sont élaborés. Deux principaux modèles sont connus. Il s'agit des Modèles de Circulation Généraux (MCG) et des Modèles Climatiques Régionaux (MCR).

Cependant la modélisation du système climatique est complexe et l'utilisation des MCG soulèvent des difficultés (IPCC, 2001). Selon Logan (2011, p. 6), le MCR, est meilleur du point de vue de la résolution spatiale et des résultats. Cependant, en Côte d'Ivoire l'utilisation des MCR n'est pas vulgarisée. Alors que, faire des projections climatiques fiables à partir des MCG apparaît comme une piste de solution. Partant, quelle est l'avantage d'une approche multi-modèle dans la zone savanicole de la Côte d'Ivoire ? C'est ce qui motive cette présente étude dont l'objectif est, d'élaborer et d'analyser un multi-modèle performant dans la zone savanicole de la Côte d'Ivoire.

## 2. Matériels données et méthodes

### 2.1. Présentation du cadre d'étude

La zoned'étude se localise en zone de savane dans la partie nord de la Côte d'Ivoire. Il s'agit précisément du quart nord-est de la Côte d'ivoire. Elle est comprise entre les latitudes 10 50 et 7 20 nord et les longitudes 7 80 et 2 80 ouest et comporte trois stations synoptiques que sont Bondoukou, Bouaké et Korhogo (figure 1).

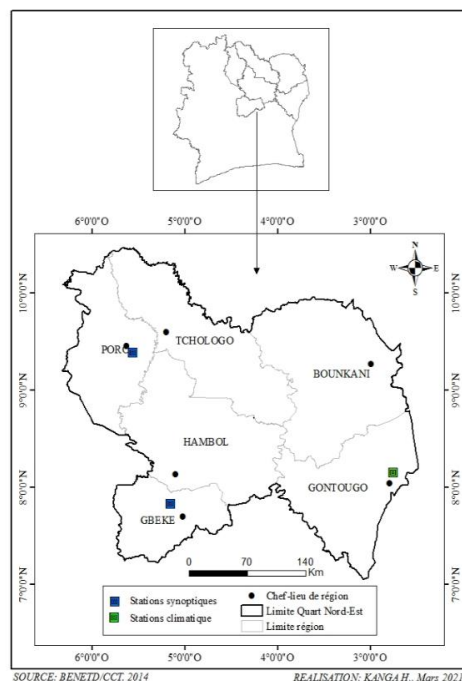


Figure 1 : Localisation du cadre d'étude

### 2.2. Données de l'étude

Les données d'observation proviennent des stations synoptiques de Bondoukou, Bouaké et Korhogo. Elles se situent dans la partie la plus déficitaire en pluie et la plus chaude de la Côte d'Ivoire (Brou, 2005, p.534. La période de référence choisie est 1961-1990, car les données climatiques in situ (pluviométriques et thermiques) sont plus homogènes sur cet intervalle. Les données de simulation proviennent des 11 MCG issus du CIMP5. Il s'agit de MIROC-ESM, CNRM-CM5, CanESM2, FGOALS-s2, BNU-ESM, MIROC5, GFDL-ESM2G, MIROC-ESM-CHEM, GFDL-ESM2M, MRI-CGCM3 et bcc-csm1-1. Ces 11 modèles ont été utilisés pour réduire au maximum les biais.

Deux types différents de scénarii sont utilisés pour cette étude. Il s'agit d'un scénario moyen, le RCP 4.5 où les émissions et concentration de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) se stabilisent sans dépassement à 4,5 W/m<sup>2</sup> jusqu'à l'horizon 2100, et un scénario pessimiste, le RCP 8.5 où les émissions et concentration de gaz à effet de serre croissent rapidement jusqu'à l'horizon 2100. Le choix des périodes est déterminé aussi par la disponibilité des données et à la longueur des séries chronologiques.

### 2.3. Méthodes

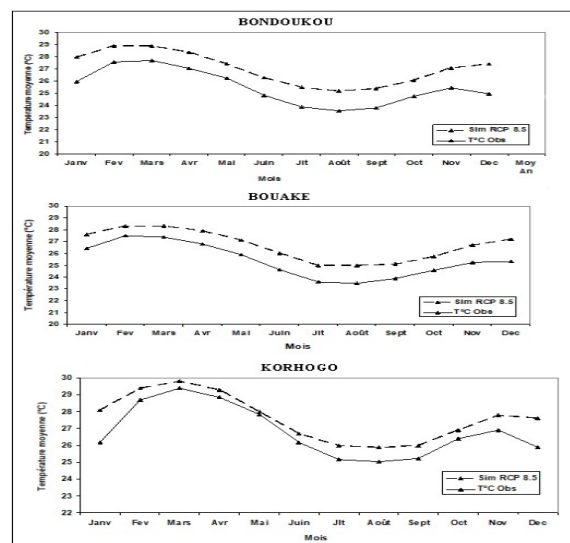
Les 11 modèles du CMIP5 ont été choisis pour les stations synoptiques de la zone d'étude. Ainsi, à partir des données issues des 11 différents modèles, un ensemble « multi-modèle » est créé comme le recommande Doukpolo (2014), p.178. Kouamé et al.(2014, p. 208), stipulent que l'utilisation d'un multi-modèle est la norme. En effet, un ensemble multi-modèle est généré par la moyenne de données issues de 11 différents modèles.

De plus, une appréciation visuelle des graphiques est aussi utilisée pour suivre les variations mensuelle et annuelle des températures et pluviométrie. Le but est de vérifier si l'ensemble multi-modèle reproduit les régimes et les tendances thermiques et de pluies des stations synoptiques étudiées. L'accent est également mis sur les débuts et fins des saisons pluviométriques.

### 3. Résultats

#### 3.1. Comparaison de régimes thermiques (1961 à 1990) entre les résultats de données observées et simulés (RCP 8.5)

Les régimes thermiques (observées et simulées) sur la période de référence 1961-1990 révèlent une grande similarité comme illustré dans la figure 2. A l'observation de la figure 2, les régimes thermiques observés sont bien simulés, cela veut dire qu'ils sont bien reproduits par les données de simulation. Le régime thermique simulé est bimodal au niveau de toutes les trois stations étudiées. Les maxima et minima thermiques des données de simulation reproduisent avec quelques biais celles qui sont observées surtout à Bondoukou. Selon le RCP 8.5, qui est un scénario pessimiste, les simulations surestiment les observations comme l'atteste la figure 2.

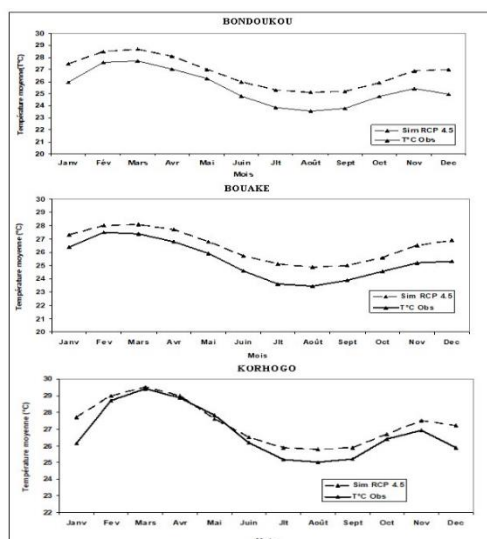


**Figure 2 :**Régimes thermiques issus de données observées et simulées sur la période de 1961 à 1990 dans la savane ivoirienne selon le RCP 8.5

*Source :* Résultats de traitement des données thermiques, Kanga et al., 2020.

#### 3.2. Comparaison des régimes thermiques (1961-1990) entre les résultats des données observées et simulées selon le RCP 4.5

Selon le scénario RCP 4.5, les régimes thermiques à partir des données observées et simulées présentent aussi une grande similarité au niveau de toutes les stations étudiées. La figure 3 le démontre. A toutes les stations, le régime des températures observées est bien simulé. Il est bimodal. Cependant, c'est la position des maxima qui fait la différence. Les maxima sont très bien simulés au niveau de Bondoukou et Korhogo tandis qu'à Bouaké on observe un biais. Dans ce cas présent aussi, les simulations issues du multi-modèle surestiment les observations (Figure 3).



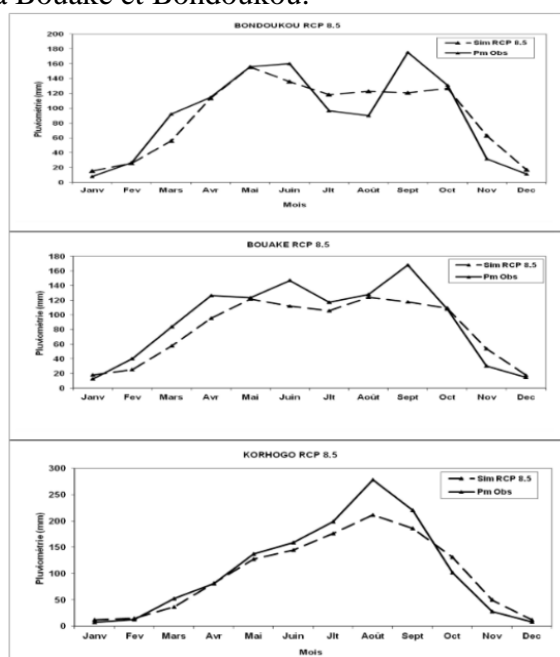
**Figure 3** :Régimes thermiques issus des données observées et simulées sur la période de 1961 à 1990 dans le Nord ivoirien selon le RCP 4.5

*Source* : Résultats de traitement des données thermiques, Kanga et al., 2020.

### 3.3. Comparaison sur la période de référence 1961-1990 des régimes pluviométriques de données observées et simulées selon le RCP 8.5

La distribution de la pluviométrie au niveau des trois stations étudiées est assez bien simuléeselon le scénario RCP 8.5 comme l'indique la figure 4. A Bondoukou, le régime des pluies simulé est aussi bimodal accentué comme dans le cas des données observées. Cependant, les pics ne sont pas bien simulés. Le régime pluviométrique à Bouaké est bimodal confus pour les données observées, tandis qu'il est bimodal accentué dans le cas des données simulées. Ainsi le régime pluviométrique à la station de Bouaké n'est pas bien simulé comme le montre la figure 4. En revanche, le régime pluviométrique à Korhogo est très bien simulé. En effet, la figure 4 montre un régime monomodal dans les deux cas.

En résumé, le multi-modèle reproduit le régime puviométrique avec quelques biais dans le nord de la Côte d'Ivoire surtout à Bouaké et Bondoukou.



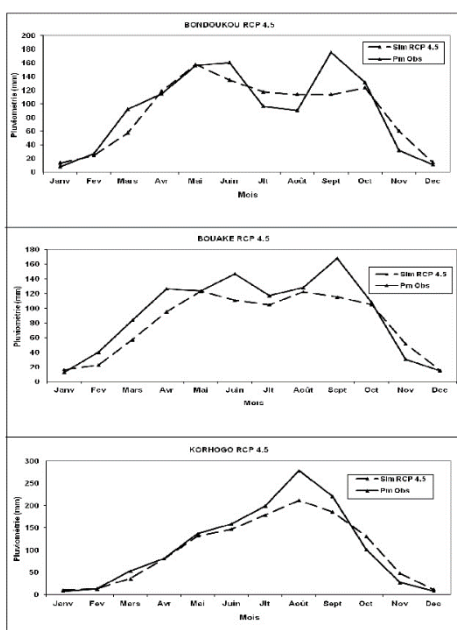
**Figure 4** :Régimes pluviométriques des données observées et simulées sur la période de 1961 à 1990 dans la savane ivoirienne selon le scénario RCP 8.5

*Source* : Résultats de traitement des données pluviométriques, Kanga et al., 2020.

### 3.4. Comparaison sur la période de référence 1961-1990 des régimes pluviométriques de données observées et simulées selon le RCP 4.5

A partir du RCP 4.5, la distribution temporelle de la pluviométrie est bien simulée dans le Nord ivoirien. A Bondoukou, le régime pluviométrique à partir des données observées est bimodal accentué. Pour les données simulées, le régime pluviométrique demeure aussi bimodal accentué (Figure 5). Cependant les maxima ne s'observent pas au même moment. A Bouaké, le régime pluviométrique à partir des données observées et simulées est un régime bimodal confus. Cependant, ici encore les maxima ne se présentent pas aux mêmes dates dans les deux cas. A Korhogo, le régime pluviométrique est bimodal pour les données observées comme simulées. L'unique maximum se présente en août. La distribution pluviométrique est alors très bien simulée à Korhogo.

En résumé, à partir de la référence 1961-1990, le multi-modèle reproduit très bien les régimes pluviométriques des différentes stations du cadre d'étude selon le scénario RCP 4.5.



**Figure 5 :** Régimes pluviométriques des données observées et simulées sur la période de 1961 à 1990 dans la savane ivoirienne selon le scénario RCP 4.5

*Source :* Résultats de traitement des données thermiques, Kanga et al., 2020

## CONCLUSION

L'approche multi-modèle constitue un outil performant dans l'ensemble pour la prospection climatique à partir des MCG. Selon les deux scénarii (RCP 4.5 et RCP 8.5) choisis pour cette étude, le régime thermique est bien simulé au niveau des trois stations (Bondoukou, Bouaké et Korhogo) étudiées, surtout pour le scénario RCP 4.5. Le régime thermique est bimodal. Cependant, des biais sont à signaler quant aux pics qui ne sont pas toujours bien simulés.

Le régime pluviométrique en général est aussi bien simulé dans les cas des scénarii RCP 8.5 et RCP 4.5. Cependant, à l'observation, les maxima sont pas bien simulés dans l'ensemble. Un décalage, un mois après ou avant le pic des données observées. En revanche, il est à notifier que à la station de Korhogo les pics sont très bien simulés selon les deux scénarii.

Les données thermiques sont mieux simulées que celles de la pluviométrie. Mais en général, cette approche multi-modèle a révélé des atouts indéniables même si elle présente toujours quelques biais qu'il conviendrait d'améliorer pour vulgarisation. Ainsi, cette étude pourrait s'affiner à travers la

combinaison d'autres méthodes statistiques comme l'EQM (Empirical Quantil Mapping) pour corriger et réduire les biais.

## Bibliographie

Alex B., Baillat A., Gemenne F., Jouzel J., 2017. RAPPORT D'ETUDE N°2 *Données scientifiques et scénarios climatiques*, Paris, IRIS et GRIP, 85 p.

Barrat J-M, 2012. *Changements Climatiques en Afrique de l'Ouest et Conséquences sur les Eaux Souterraines*, Rapport OSS-GICRESAIT n° 13, 41 p.

Brou Y., Akindes F., Bigot S., 2005. Perceptions sociales et gestion communautaire de la variabilité climatique en Côte d'Ivoire. *Cahiers Agricultures*, Agence Universitaire de la Francophonie (AUF), vol. 14, n° 6, novembre-décembre 2005, pp.533- 540.

Doukpolo B., 2014. *Changements climatiques et productions agricoles dans l'ouest de la république centrafricaine*, Thèse de doctorat, Laboratoire Pierre Pagny, Université d'Abomey-Calavi, Abomey, 338 p.

GIEC, 2007, *Contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Résumé à l'intention des décideurs. Genève, Organisation météorologique mondiale, 22 p. [En ligne].

IPCC, 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the IPCC (ed. by J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken & K. S. White) Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Kanga K. H., (2016), *Sécheresse et vulnérabilité socio-spatiale dans le « quart Nord-Est » de la Côte d'Ivoire*, Thèse de doctorat de géographie, Université Alassane OUATTARA, Bouaké, 347 p.

Kouamé Y., Soro G., Kouakou K., Kouadio Z., N'diaye M., Tié A., Issiaka S., 2014. Scénarios des changements climatiques pour les précipitations et les températures en Afrique subsaharienne tropicale humide : cas du bassin versant de Davo, Côte d'Ivoire, in *Larhyss Journal* ISSN 1112-3680, (18), pp. 197-213.

Logan T., Charron I., Chaumont D., Houle D., 2011. *Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise*, Québec, Ouranos, DRF et MRNF, 125 p.

Tra Bi A., 2013, *Etude de l'impact des activités anthropiques et de la variabilité climatique sur la végétation et les usages des sols, par utilisation de la télédétection et des statistiques agricoles, sur le bassin versant du Bouregreg (MAROC)*, Thèse de doctorat, Laboratoire Dynamique des Réseaux et des Territoires, Université d'Artois, 190 p.

# Cartographie du stress thermique au sein d'une cour d'école parisienne : Couplage de mesures microclimatiques fixes et mobiles

Karam G. (1,2), Chanial M. (1,3), Chaumont M. (1), Hendel M. (1,2), et Royon L. (1)

(1) Université de Paris, LIED, UMR 8236, CNRS, F-75013, Paris, France, ghid.karam@esiee.fr

(2) Université Gustave Eiffel, ESIEE Paris, Département SEN, F-93162, Noisy-le-Grand, France

(3) Mairie de Paris, Direction de la Propreté et de l'Eau & de la Voirie et des Déplacements, Paris, France

**Résumé :** Le dérèglement climatique sera à l'origine de vagues de chaleurs plus fréquentes, plus intenses et de plus longue durée à l'horizon 2050. Dans le cadre de son Plan Climat et de sa stratégie de résilience, la Ville de Paris déploie, à travers son programme Oasis, un maillage d'îlots de fraîcheur urbains. Des travaux de réaménagements sont conduits au sein des cours d'écoles afin de réduire le stress thermique des usagers. Sur la base d'un cas d'étude, nous établissons une première méthodologie afin de quantifier l'impact microclimatique de la transformation d'une cour d'école par des mesures microclimatiques mobiles lors de vagues de chaleur. Celles-ci sont couplées avec des données de stations fixes situées hors de la cour pour quantifier l'évolution du stress thermique, évalué par l'UTCI. La cartographie du stress thermique ainsi obtenue permet un premier diagnostic microclimatique de la cour d'école.

**Mots clés :** Mesures microclimatiques mobiles, UTCI, cartographie, couplage.

**Abstract:** Climate change will result in more frequent, more intense and longer-lasting heat waves by 2050. As part of its Climate Plan and its resilience strategy, the City of Paris is deploying, through its Oasis program, a network of urban cool islands to mitigate the urban heat island phenomena: schoolyards are renovated in order to reduce the heat stress of users. We establish a methodology aiming to quantify the microclimatic impact of the transformation. Mobile measurements are carried out within a case courtyard under hot conditions and coupled with fixed weather station data to evaluate heat stress using UTCI. The heat stress mapping thus obtained allows a first microclimatic diagnosis of the schoolyard.

**Keywords:** UTCI, heat stress mapping, coupled microclimatic measurements

## Introduction

Outre l'augmentation des températures annuelles moyennes, le dérèglement climatique sera à l'origine de vagues de chaleur plus fréquentes, plus intenses et de plus longue durée à l'horizon 2050 (Bador *et al.*, 2017). L'adaptation des villes à ces nouveaux extrêmes fait l'objet de recherches visant à mettre en place des parcours et îlots de fraîcheur urbains afin d'atténuer les causes et effets de ces phénomènes (Lai *et al.*, 2019).

Dans le cadre de son plan Climat et de sa Stratégie de Résilience (Mairie de Paris, 2017, 2018), la Ville de Paris prévoit de déployer, à travers son programme Oasis, un maillage d'îlots de fraîcheur urbains constitué de cours d'écoles débitumées et végétalisées. Le maillage de cours d'écoles ainsi transformées permettra de pallier le manque d'espaces verts de la capitale et s'inscrit dans une stratégie de rafraîchissement urbain à la fois globale et de proximité.

L'évaluation *in situ* de la performance rafraîchissante des travaux est un enjeu important pour la Ville de Paris. L'étude de l'impact microclimatique de techniques de rafraîchissement urbain est le sujet de nombreux travaux expérimentaux et numériques menés à différentes échelles du territoire. Parmi les travaux expérimentaux, certains s'appuient sur des mesures mobiles, d'autres fixes (Hendel, 2016; Moheghe *et al.*, 2018). De manière plus générale, l'observation de l'évolution des sites avant et après application des stratégies de végétalisation est nécessaire à l'évaluation de l'efficacité de ces dernières (Bowler *et al.*, 2010).

Nous nous concentrons dans cet article sur les mesures mobiles qui permettent d'établir une cartographie du stress thermique avant et après les travaux de réaménagement. Une synthèse tenant compte de diverses corrections temporelles permettra de diagnostiquer de manière quantitative l'impact microclimatique des travaux de réaménagement au sein de la cour de l'Ecole Daumesnil. La méthode proposée ici sera mise en œuvre dans le cadre du projet FEDER UIA OASIS pour l'évaluation du rafraîchissement obtenu dans 10 cours d'école pilotes.

## Matériels et méthode

### 1.1 Description de la cour d'école

La cour d'école étudiée est située au 70 avenue Daumesnil dans le 12<sup>e</sup> arrondissement de Paris. Des travaux ont été réalisés dans la cour à l'été 2018 et ont consisté à remplacer le revêtement en asphalté par un revêtement drainant et réfléchissant, ajouter de la terre végétale au pied des arbres existants et planter deux nouveaux arbres. La façade du bâtiment situé au Nord entièrement vitrée a été équipée de protections solaires. La Figure 38 donne une vue aérienne du site avant et après travaux.

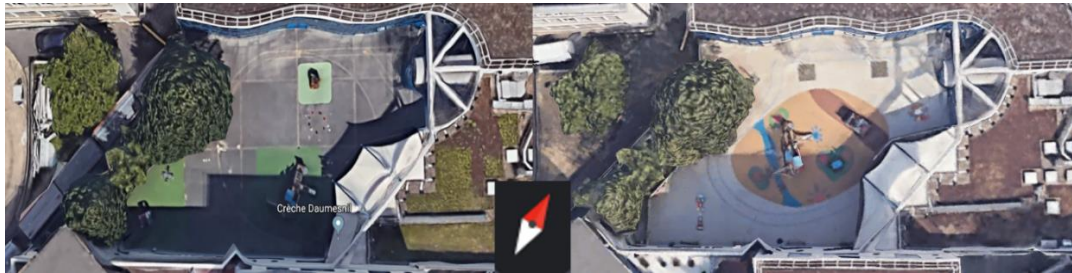


Figure 38 : Vue aérienne de la cour Daumesnil avant (gauche) et après rénovation (droite)

L'albédo du revêtement avant et après travaux a été mesuré selon la méthode STM : l'asphalté noir et le sol amortissant vert des espaces de jeux ont un albédo de 0,11, tandis que le nouveau revêtement beige a un albédo de 0,3.

### 1.2 Stations microclimatiques

Afin d'évaluer l'impact de la transformation, des mesures ont été effectuées en été avant (juin 2018) et après (juin 2019) travaux, durant des journées chaudes et radiatives, c'est-à-dire de classe de stabilité de Pasquill A ou A-B (Pasquill, 1961) : vent faible et ciel dégagé (couverture  $\leq 3$  octas), températures maximales et minimales supérieures à 25°C et à 16°C, respectivement.

**Tableau 8 : Récapitulatif des sondes équipant la station microclimatique mobile et leur incertitude.**

	<i>Paramètre</i>	<i>Hauteur</i>	<i>Incertitude</i>
<i>Globe Noir</i>	$T_g$	1,5 m	1°C
<i>Anémomètre à fil chaud</i>	$v_a$	1,5 m	0.3m/s
<i>Thermohygromètre sous abri</i>	$T_{air}$	1,5 m	0,5°C
	$RH$		2.5%

L'instrumentation de la station de mesure mobile utilisée (Delta Ohm HD32.1) est récapitulée au Tableau 8. Les mesures sont effectuées à 1,5 m de hauteur toutes les 15 secondes. La Figure 39 montre les différents points de mesure au sein de la cour. Les points sont choisis de sorte à être représentatifs des différents environnements de la cour : plein soleil, ombre, proximité de végétation. En revanche, ils ne permettent pas de caractériser l'impact de la plantation des deux arbres dont la position n'était pas connue au moment de définir les points de mesure. Chaque point est caractérisé pendant 10 à 20 minutes afin de permettre au globe noir de se stabiliser, selon qu'il y ait ou non un changement de conditions d'ensoleillement (ombragé ou ensoleillé). L'intégralité des mesures est effectuée entre 13h45 et 15h. les



condition d'ensoleillement des points 4 et 5 ayant changé d'une année à l'autre, (M4 et M5 à l'ombre en 2018 et au soleil en 2019), nous les avons retirés de l'analyse.

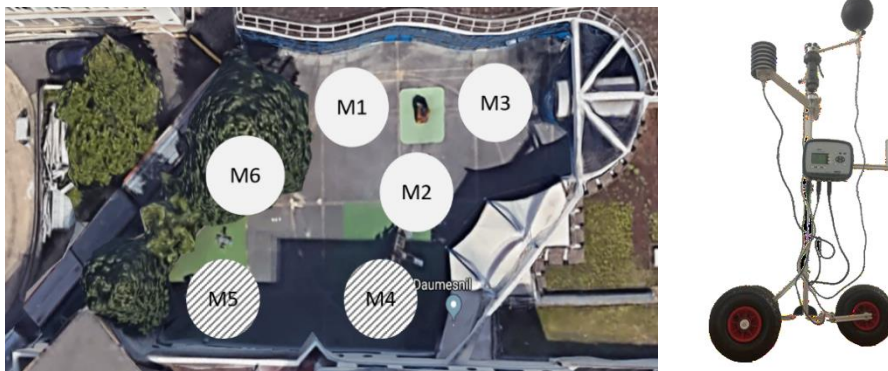


Figure 39 : Points de mesures dans la cour (gauche) et photo de la station mobile (droite).

Ces mesures sont utilisées pour calculer un indicateur de stress thermique biométéorologique, l'UTCI ( Universal Thermal Climate Index) afin de quantifier le stress thermique ressenti par un usager (adulte) de la cour (Błazejczyk *et al.*, 2010).

### 1.3 Méthode d'analyse

Il est établi qu'une correction temporelle est nécessaire pour des données obtenues au cours de traversées mobiles réalisées sur plusieurs heures afin de prendre en compte l'évolution des paramètres mesurés au cours de la période de mesure (Leconte *et al.*, 2015; Tsin *et al.*, 2016). De même, les mesures microclimatiques ayant lieu à une année d'intervalle, il est nécessaire de tenir compte des variations synoptiques entre ces deux traversées. L'appariement de ces mesures avec une station fixe et servant de témoin permettra de prendre en compte les variations temporelles à petites et grandes échelles.

Afin de quantifier l'impact de la transformation de la cour, on s'intéresse à l'indicateur  $\Delta T_{UTCI,i} = T_{UTCI,i}^{mobile} - T_{UTCI,i}^{ref}(T_{air,i}^{témoin}, RH_i^{témoin}, T_{mrt,ref}, v_{ref})$

Où  $\Delta T_{UTCI,i}$  indique en un point de mesure  $i$ , l'écart entre la température équivalente UTCI calculée en ce point ( $T_{UTCI,i}$ ) et une température équivalente UTCI de référence  $T_{UTCI,i}^{ref}$

La température équivalente UTCI de référence correspond à l'état de stress thermique d'un piéton situé dans une cour ombragée à l'abri des courants d'air. Cette dernière est calculée en utilisant la température de l'air et l'humidité relative mesurée à la station témoin. On impose  $T_{mrt,ref} = T_{air,i}^{témoin}$  en on fixe la vitesse de vent à  $0.5 \text{ m/s}$  à  $1,5 \text{ m}$  de hauteur.

Cela permet de s'affranchir des variations de conditions météorologiques entre les années ainsi que de l'évolution temporelle des paramètres au cours d'une même campagne de mesure.

Avec cet indicateur, on ne s'intéresse non pas à un niveau absolu de stress thermique – qui dépend nécessairement des conditions météorologiques synoptiques et pas seulement de la performance intrinsèque du site étudié – mais à l'écart de stress par rapport au niveau de référence défini. Cet écart est attribué a priori aux modifications du site d'étude. Nous proposons une nouvelle échelle inspirée de l'échelle de l'UTCI qui permette de rendre compte de l'ampleur du changement vis-à-vis de l'échelle UTCI. Ce dernier permet de mettre en évidence un écart faible (de  $0$  à  $3^\circ\text{C}$ ), modéré (de  $3$  à  $6^\circ$ ) qui peut ne pas impacter la classification de stress thermique. Un écart conséquent ( $6$  à  $9^\circ\text{C}$ ) ou important (supérieur à  $9^\circ\text{C}$ ) fait basculer la catégorie de stress thermique d'une ou de deux catégories.

La station météo témoin la plus proche dont nous disposons est située dans le 14<sup>e</sup> arrondissement de Paris, près du métro Alésia, à 4 km du site étudié. Les données y sont disponibles à la minute.

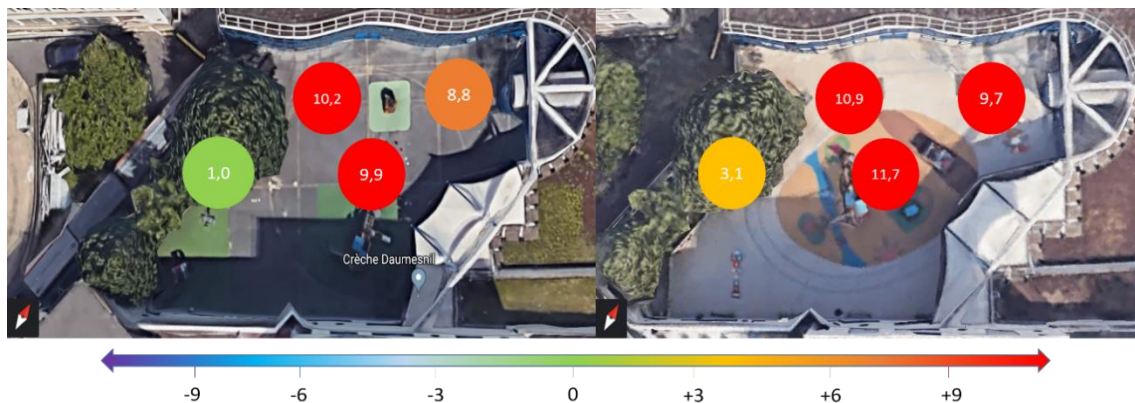
## Résultat et Discussion

Les mesures ont été réalisées le 20 juin 2018 avant et le 24 juin 2019 après travaux entre 13h45 et 15h. Les températures minimales et maximales enregistrées à la station météorologique du parc Montsouris ont été de 16,6 °C et 29,1 °C, respectivement le 20 juin 2018 pour une vitesse moyenne du vent de 2 m/s. Le 24 juin 2019, ces valeurs sont de 21°C et 34°C pour une vitesse moyenne du vent de 2,7 m/s.

Le Tableau 2 résume les observations de l'écart  $\Delta T_{UTCI}$  aux 6 points de mesure de la cour. La Figure 40 illustre la répartition spatiale des  $\Delta T_{UTCI}$  calculés au sein de la cour avant (gauche) et après (droite) travaux.

**Tableau 9 :  $\Delta T_{UTCI}$  relevés au sein de la cour avant (juin 2018) et après (juin 2019) travaux (en °C)**

	M1	M2	M3	M6
20 juin 2018	+10,2	+9,9	+8,8	+1
24 juin 2019	+10,9	+11,7	+9,7	+3,1
$\Delta T_{UTCI,2019} - \Delta T_{UTCI,2018}$	+0,7	+1.8	+0.9	+3



**Figure 40 : Cartographie du sur stress thermique au sein de la cour. Gauche : avant travaux ; droite : après travaux. En bas, code couleur des écarts UTCI.**

En plein soleil, l'écart des températures UTCI par rapport aux températures de référence est de l'ordre de la dizaine de degrés Celsius et présente un stress thermique absolu de niveau élevé. Il est maintenu voire augmenté pour le point M3 d'une année à l'autre (augmentation de l'ordre de 1°C). L'écart  $\Delta T_{UTCI}$  relevé sous l'arbre augmente de façon marginale de 2°C, faisant basculer ce point d'une catégorie de stress neutre à celle d'un stress modéré. Cette augmentation a lieu alors que l'ancien enrobé qui se trouvait sous l'arbre été remplacé par de la terre végétale. L'amplitude des variations de  $\Delta T_{UTCI}$  d'une année à l'autre aux points ensoleillés étant de l'ordre de 1°C, une étude de la propagation des incertitudes dues aux instruments de mesures et leurs répercussions sur l'UTCI permettrait de nuancer les observations.

Ces mesures tendent à indiquer que le bilan radiatif dégradé d'un piéton dans la cour compense les effets rafraîchissants souvent attendus du remplacement des revêtements par des

matériaux à albédo plus important. L'augmentation de  $T_{mrt}$  sous l'arbre a notamment amplifié une situation où l'écart  $\Delta T_{air}$  reste très peu marqué ( $\Delta T_{air}$  passe de  $+0,78^{\circ}\text{C}$  en 2018 à  $+1,66^{\circ}\text{C}$  en 2019). Une pluviométrie 15% plus faible en 2019 que 2018 ayant pu contribuer à un stress hydrique de la végétation peut aussi figurer parmi les facteurs de l'amplification de ce stress thermique.

L'observation des écarts de température moyenne radiante observée en chaque point par rapport à la température de référence montre une diminution de ces dernières en plein soleil, mais une augmentation de ces dernières sous l'arbre (Figure 41). Ces observations peuvent être corrélées avec l'augmentation d'albédo qui va rafraîchir les surfaces ensoleillées, mais contrebalancer l'évapotranspiration et l'ombrage sous l'arbre (Erell *et al.*, 2014). Toutefois cette diminution semble contrée par une augmentation du  $\Delta T_{air}$  de l'ordre de  $3^{\circ}\text{C}$  en plein soleil.

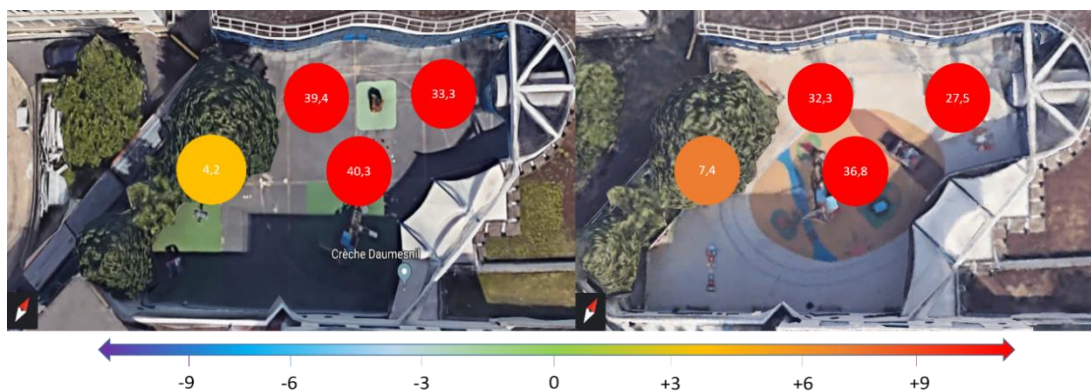


Figure 41 Cartographie de l'écart  $T_{mrt,i} - T_{air,ref}$  dans la cour Daumesnil

## Conclusion

L'impact de la transformation de la cour de l'école maternelle Daumesnil a été évaluée par deux campagnes de mesure mobile réalisées avant et après travaux consistant en la pose d'un revêtement réfléchissant et drainant, la plantation de deux nouveaux arbres et le remplacement des pieds d'arbres existants par de la terre végétale.

L'augmentation de l'albédo du revêtement de la cour permet une réduction de l'ordre de  $5^{\circ}\text{C}$  de l'écart entre la température radiante et la température ambiante, permettant ainsi de limiter l'échauffement de l'air ambiant. Toutefois, on observe l'inverse sous l'arbre. Deux facteurs ont pu contribuer à cette dégradation : une augmentation du rayonnement solaire réfléchi par le revêtement de la cour (albédo  $+0,2$ ) d'une part, et un printemps post-travaux plus sec d'autre part. Ces résultats rappellent également l'importance du stress hydrique sur la performance rafraîchissante de la végétation.

D'autres campagnes de mesures dans les années à venir pourraient permettre de départager les deux phénomènes pour le site en question, notamment à l'occasion d'un printemps plus humide. De plus, la désimperméabilisation du site étant récente, les végétaux déjà présents sur place n'ont possiblement pas eu le temps de développer leur réseau racinaire pour en bénéficier pleinement.

L'impact cumulé des stratégies de rafraîchissement, à savoir désimperméabilisation, végétalisation et augmentation d'albédo des surfaces n'est pas forcément corrélé à amélioration du stress thermique.

Etant donné que seulement deux campagnes de mesures mobiles ont été réalisées, la robustesse statistique des résultats présentés ne peut être démontrée. Par ailleurs, la station témoin utilisée ici est située à plusieurs kilomètres du site d'étude. L'étude d'un point non impacté par les travaux de réaménagement permettrait de tenir compte de la variabilité temporelle de ces mesures (Chanial et al, 2021).

Par la suite, lors de l'évaluation des 10 cours pilotes du projet FEDER UIA OASIS, nous combinerons l'utilisation des mesures mobiles à une paire de stations météo situées à moins de 500 mètres l'une de l'autre, ce qui permettra une analyse statistique fine en un point de la cour.

### **Remerciements**

Cette recherche a été financée dans le cadre du projet européen FEDER UIA 344-OASIS.

### **Bibliographie**

- ASTM E1918-16, 2016: Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field, *ASTM International*. West Conshohocken, PA, i(Reapproved 2015), 18–20
- Bador, M. et al, 2017: Future summer mega-heatwave and record-breaking temperatures in a warmer France climate, *Environmental Research Letters*, **12(7)**
- Błazejczyk, K. et al, 2010: Principles of the new universal thermal climate index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale, *Miscellanea Geographica*, **14**, 91–102
- Bowler, D. E. et al, 2010 : Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence, *Landscape and Urban Planning*. Elsevier B.V., **97(3)**, 147–155
- Erell, E. et al, 2014 : Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons', *Urban Climate*. Elsevier Ltd, **10(P2)**, 367–386
- Hendel, M., 2016 : *Pavement-Watering in Cities for Urban Heat Island Mitigation and Climate Change Adaptation*, Université Paris Diderot paris 7
- Lai, D. et al., 2019 : A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces, *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., **661**, 337–353
- Leconte, F. et al, 2015 : Estimation of spatial air temperature distribution at sub-mesoclimatic scale using the LCZ scheme and mobile measurements', *9th International Conference on Urban Climate & 12th Symposium on Urban Environment*, (July), 1–12
- Mairie de Paris, 2017 : *Stratégie de Résiliencede Paris*. Paris
- Mairie de Paris, 2018: *Plan Climat de Paris*. Paris
- Mohegh, A. et al., 2018 : Observational evidence of neighborhood scale reductions in air temperature associated with increases in roof albedo, *Climate*. MDPI AG, **6(4)**, 98
- Pasquill, F., 1961 : The estimation of the dispersion of windborne material, *The Meteorological Magazine*, **90(1063)**, 33–49
- Tsin, P. K. et al., 2016 : Microscale mobile monitoring of urban air temperature, *Urban Climate*. Elsevier B.V., **18**, 58–72
- M.Chanial, G.Karam, S.Parison, M.Hendel, et L.Royon, 2021 : Cartographie du stress thermique au sein d'une cours d'école parisienne : Couplage de mesures microclimatiques fixes et mobiles, *34ème colloque international annuel de l'AIC*

# SPATIALISATION DES TYPES DE BIOCLIMATS AU NIVEAU DE LA RÉGION DE FÈS-MEKNÈS (MAROC) À TRAVERS LES DONNÉES CHELSA ET PROJECTIONS FUTURES

Kessabi R. et Hanchane M.

*Département de géographie, Laboratoire Territoire, Patrimoine et Histoire. FLSH Dhar El Mahraz, USMBA Fès. r.kessabi@gmail.com (ridouane.kessabi@usmba.ac.ma)*

**Résumé :** La Région Fès-Meknès (Maroc) dispose d'un ensemble de ressources hydriques superficielles drainées par quatre grands bassins versants qui sont aujourd'hui menacés par le risque de réchauffement climatique d'origine anthropique. Ceci nous a amenés à s'interroger sur les bioclimats actuels, en se basant sur les indices d'Emberger et de De Martonne, et sur leur évolution future selon la classification de Köppen. Étant donnée la non-disponibilité des données pour l'ensemble du territoire de la région et sur plusieurs années, ceci nous a conduits à opter pour une utilisation des données CHELSA (Climatologies à haute résolution pour les surfaces terrestres) qui, non seulement elles résolvent le problème de la distribution inégale des stations météorologiques au sein des zones montagneuses de la région Fès-Meknès, mais elle fournissent des séries chronologiques mensuelles complètes pour les températures et les précipitations et sur une longue période (1979 à 2013). Les résultats obtenus à partir des données actuelles montrent la répartition spatiale de différents types de bioclimats, allant de l'aride au subhumide. Quant aux projections futures à l'horizon 2071-210, selon la classification de Köppen et d'après le scénario RCP8.5, on note l'extension des bioclimats arides avec l'éventuelle apparition d'un climat subdésertique et l'extinction probable du climat neigeux de haute montagne du Moyen Atlas. Cette évolution menacerait sérieusement la sécurité alimentaire et la pérennité des ressources hydriques de la région.

**Mots clés :** Types de climats ; Aridité ; Données CHELSA ; Région Fès-Meknès ; Projections futures.

**Summary:** The Fès-Meknès region (Morocco) has a set of surface water resources drained by four major watersheds that are now threatened by the risk of anthropogenic global warming. This led us to question the current bioclimates, based on the Emberger and the De Martonne indices, and their future evolution according to the Köppen classification. Given the unavailability of data for the entire region and over several years, this led us to opt for the use of CHELSA data (High-resolution climatologies for terrestrial land surfaces) which not only solve the problem of the unequal distribution of weather stations within the mountainous areas of the Fez-Meknes region, but it provides complete monthly time series for temperature and precipitation and over a long period (1979 to 2013). The results obtained from the current data show the spatial distribution of different types of bioclimates, ranging from arid to subhumide. As for future projections to the horizon 2071-2100, according to the Köppen classification and according to scenario RCP8.5, we note the extension of arid bioclimates with the possible appearance of a sub desertic climate and the probable extinction of the snowy high mountain climate of the Middle Atlas. This would seriously threaten food security and the sustainability of the region's water resources.

**Keywords:** Climate types; Aridity; CHELSA data; Fez-Meknes region; Future projections.

## Introduction

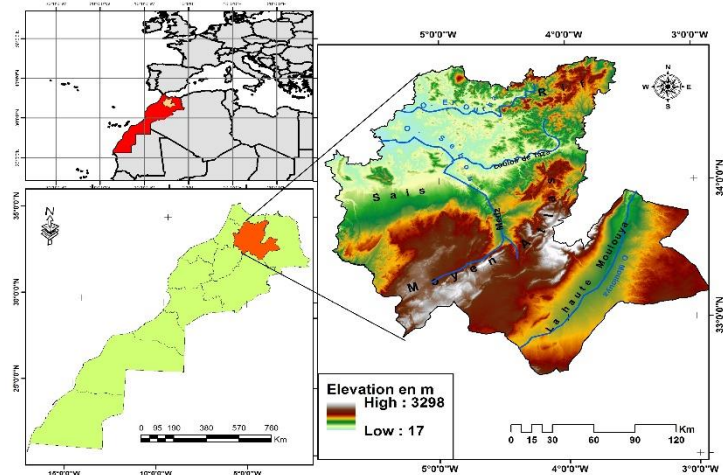
La Région Fès-Meknès (Maroc) s'étend sur une superficie de 40.075 Km<sup>2</sup>, soit 5,7 % du territoire national. Elle est composée de plaines et de chaînes montagneuses rifaines au Nord et Atlasique au Sud, de hautes collines à l'Est et au Sud-Est du Moyen Atlas et d'un domaine Mésetien des Hauts Plateaux situé à l'aval du château d'eau Atlasique. Elle dispose d'un ensemble de ressources hydriques superficielles drainées par quatre grands bassins versants. Aujourd'hui, ce potentiel hydrique est menacé par le risque de réchauffement climatique d'origine anthropique (Figure 1).

Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), pour construire une idée sur les normales climatiques d'un territoire il faut avoir des enregistrements de plus de 30 ans pour un ensemble de paramètres climatiques. Certes, la région dispose, depuis des décennies, d'un ensemble de séries climatiques qui nous donne une idée sur les climats des différentes zones de ce territoire. Mais la densité de ce réseau et sa détérioration, surtout en zone montagneuse, limite toute tentative de leur utilisation pour étudier le climat de la région.

Pour surmonter cette contrainte, nous avons opté pour l'utilisation des données CHELSA (Climatologies à haute résolution pour les surfaces terrestres) (Karger et al., 2017) qui correspondent à des données climatiques sur l'ensemble des terres émergées et interpolées par des méthodes plus avancées. Ces données ont prouvé leur utilité par différents chercheurs pour étudier le changement climatique (Osejo et al., 2019; Khaydarov & Gerlitz, 2019). Le but de cette étude est

d'analyser l'évolution actuelle et future des types de climats de la région en se basant sur les indices d'Emberger et de De Martonne. Les projections futures des climats de ce territoire sont basées sur le travail de Beck et *al.* (2018).

Figure N°1 : Situation géographique de la région de Fès-Meknès



## 1. Données et méthodologie

Les climats de la région de Fès-Meknès sont spatialisés à partir des données CHELSA qui ont été présentées en détail par (Karger et al., 2017; <https://chelsa-climate.org/>). Elles correspondent à des données de sortie des modèles d'une résolution réduite de 30 secondes d'arc, soit environ 1Km. L'algorithme d'estimation des températures est basé principalement sur une réduction statistique des températures atmosphériques. L'algorithme des précipitations incorpore des estimateurs orographiques ainsi que les champs de vent, l'exposition des vallées et des versants et la hauteur de la couche limite, avec une correction ultérieure du biais d'estimation. Les données résultantes (période 1979-2013) se composent de données mensuelles sur la température et les précipitations (Karger et al., 2017).

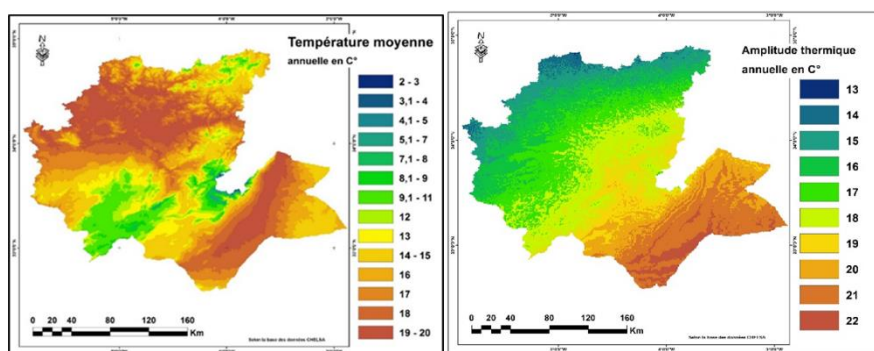
La méthodologie adoptée comprend deux étapes: (i) la première consiste à manipuler les données CHELSA via un Système d'Informations Géographiques (ArcGIS de ESRI) pour spatialiser les climats et l'aridité au sein de la région étudiée; (ii) la seconde traite l'utilisation des données fournies par Beck et al. (2018) pour spatialiser les projections futures des bioclimats d'après la classification de Köppen et selon le scénario RC8.5 des émissions de gaz à effet de serre. Les données extraites sont utilisées pour calculer deux indices climatiques, il s'agit de l'indice bioclimatique d'Emberger (Emberger, 1931; Gaussen, 1954; Daget, 1977) et l'indice d'aridité de De Martonne (De Martonne E., 1926; Mokhtari et al., 2013).

## 2. Résultats et discussion

### 2.1 Variabilité spatiale des températures et des précipitations moyennes annuelles

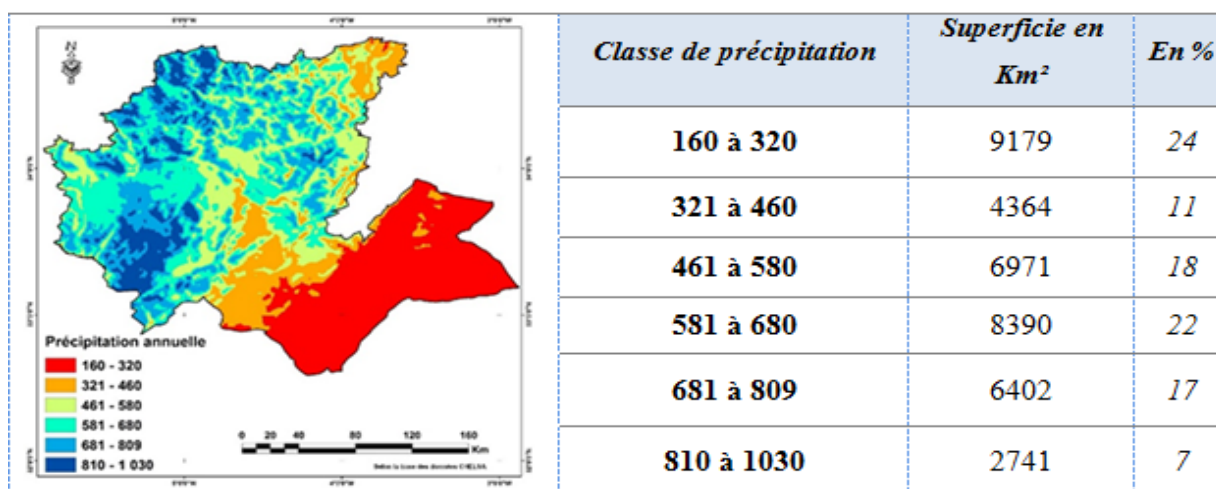
La température moyenne annuelle présente un grand éventail de variation allant de 2°C en zones de montagne, à 20 °C sur les plaines, collines et plateaux de la région (Fig. 2). L'amplitude thermique annuelle (Fig. 3) augmente avec la continentalité selon un gradient Nord-Ouest (13-18°C) à Sud-Est (19-22°C).

Figures 2 et 3 : Carte des températures moyennes annuelles (à gauche) et de l'amplitude thermique annuelle (à droite).



Le cumul pluviométrique moyen annuel (Fig. 4) est extrêmement variable dans l'espace. Il est fortement influencé par l'altitude et l'effet d'abri orographique. Les zones situées à l'abri des montagnes de l'Atlas et du Rif enregistrent des pluies inférieures à 300 mm. Les pluies peuvent dépasser la moyenne de 1000 mm en haute montagne. Sur les plaines et les plateaux, le cumul moyen annuel varie entre 450 et 680 mm. Les classes des précipitations illustrent une certaine vulnérabilité climatique: 35% du territoire, à l'abri des flux perturbés à cause de l'obstacle montagneux du Rif et du Moyen Atlas (haute Moulouya et le Nord-est de la région), reçoit moins de 460 mm/an. En revanche, 57% du territoire, centré essentiellement sur la partie ouest de la région du Moyen Atlas jusqu'au Rif en passant par le Saïs et les collines pré-rifaines, reçoit entre 461 mm et 809 mm/an. Seulement 7% du territoire reçoit plus de 810 mm, il s'agit des hautes montagnes de l'Atlas et du Rif occidental.

Figure 4 : Carte des précipitations moyennes annuelles de la région Fès-Meknès et étendue spatiale des classes pluviométriques.



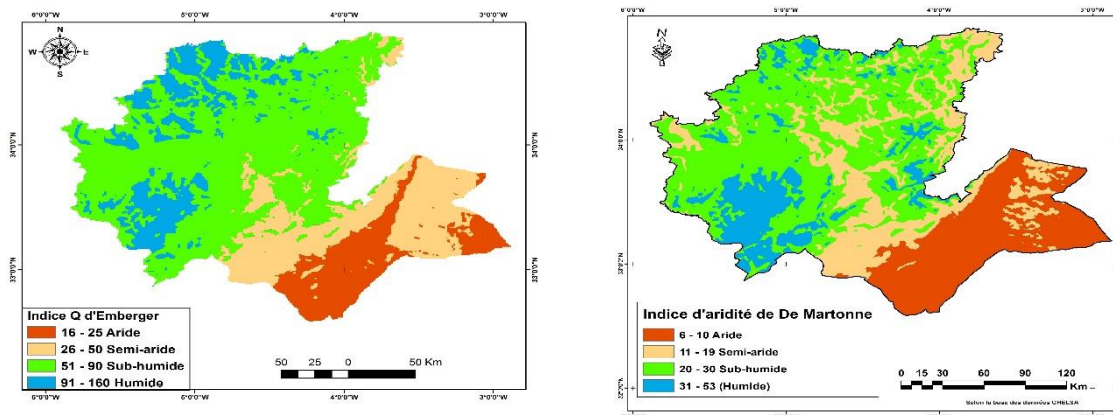
Il ressort de cette analyse spatiale une grande diversité bioclimatique qui va être décrite dans la section suivante selon les indices d'Emberger et de De Martonne.

## 2.2 Bioclimats actuels de la région selon les indices d'Emberger et de De Martonne

Les deux indices sont utilisés pour spatialiser les types de bioclimats actuels en utilisant quatre classes : aride, semi-aride, subhumide et humide (Fig. 4 et 5). La comparaison entre les deux indices, montre une certaine répartition similaire des bioclimats décrits par les deux indices. En revanche, certaines nuances sont à souligner : (i) le bioclimat aride est mieux représenté par l'indice de De certaines nuances sont à souligner : (i) l'indice de De Martonne représente mieux les bioclimats arides que le coefficient d'Emberger, notamment dans la Haute Moulouya (secteur sud-est) ; (ii) pour la classe semi-arides, l'indice de De Martonne visualise bien leur infiltration via les vallées

encaissées de Sebou-Mdaz, du couloir de Taza et de la pointe Nord-Est de la région. Ainsi, l'indice d'aridité de De Martonne, malgré sa simplicité de calcul, reflète mieux la réalité climatique et géographique de la région.

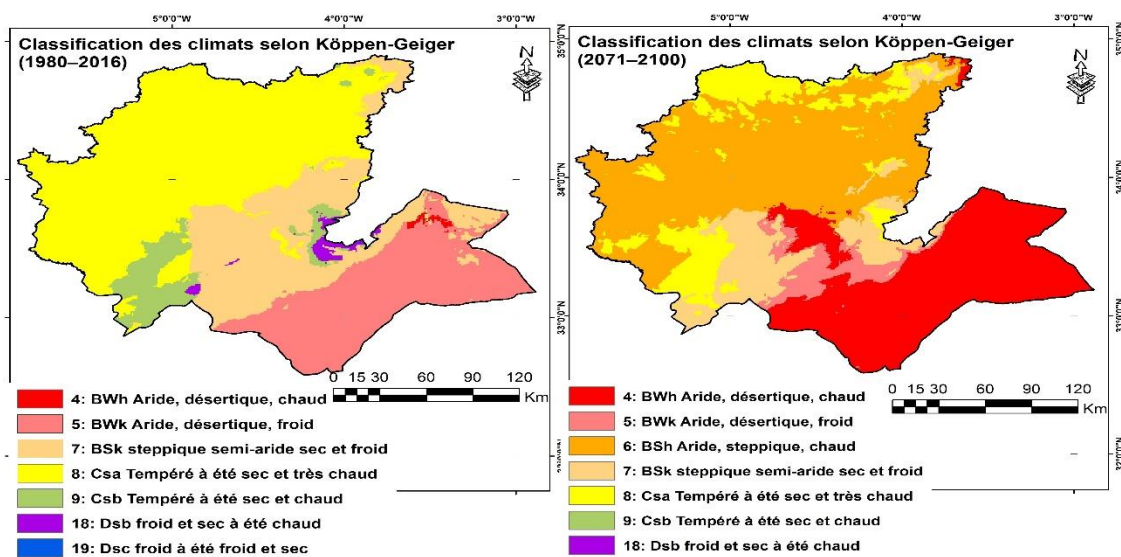
Figures 4 et 5 : Quotient d'Emberger à gauche et indice d'aridité de De Martonne à droite.



### 2.3 Evolution future des bioclimats de la région Fès-Meknès

Les perspectives des bioclimats de la région de Fès-Meknès sont présentées via les résultats obtenus à l'échelle globale par Beck et al. (2018) qui portent sur l'évolution des bioclimats selon la classification de Köppen-Geiger. L'étude a pris en compte deux dates de référence, la situation actuelle (période 1980-2016) et future (2071-2100) (Fig. 6 et 7).

Figure 6 et 7: Bioclimats actuels (à gauche) et évolution future pour la région de Fès-Meknès selon la classification de Köppen ( Source de données, Beck et al., 2018).



A partir des résultats des deux cartes ci-dessus, l'évolution des bioclimats de la région montre une tendance vers des bioclimats de plus en plus arides et chauds, avec apparition des bioclimats désertiques chauds et froids et leur extension par le Sud-Est. On note aussi l'extinction du climat neigeux de type D de haute montagne et son remplacement par un climat méditerranéen a été sec et chaud.

### Conclusion

La région de Fès Meknès dispose d'un espace géographique continental très étendu et de grande diversité topographique (montagnes, collines et plaines). La densité du réseau d'observations météorologique et climatique est insuffisante pour couvrir l'ensemble de la zone. Pour pallier à cette



contrainte, le but de la présente étude est d'effectuer une cartographie des types de bioclimats selon les indices d'Emberger et de De Martonne en utilisant la base de données CHELSA. Cette étude vise aussi à évaluer les types de bioclimats actuels et futurs en se basant sur la classification de Köppen issues de l'étude de Beck et al. (2018).

Les résultats obtenus montrent une grande variabilité spatiale des moyennes annuelles de la température et de précipitations, expliquant ainsi la grande diversité bioclimatique établie selon les indices d'Emberger et de De Martonne. Ce dernier indice reflète mieux cette diversité bioclimatique en comparaison avec l'indice d'Emberger.

L'évolution future des bioclimats (2071-2100) selon l'indice de Köppen indique l'extension des climats arides du sud vers le nord de la région et l'apparition nouvelle d'un climat désertique à été chaud au sud de la région et dans les vallées encaissées de Mdez qui sont à l'abri des flux perturbés d'ouest. On prévoit aussi la disparition d'un climat neigeux de haute montagne (type *D* selon Köppen) et son remplacement par un climat méditerranéen à été chaud et sec (type *Cs*).

Les résultats de cette analyse spatiale sur les climats et les niveaux d'aridité dans la région de Fès-Meknès, montrent que le climat de la région est dominé par des climats semi-arides sur 22% et aride 27% du territoire. Le climat subhumide couvre à lui entre 37% et 40% de la région. Le climat humide ne concerne que les sommets des hautes montagnes.

La comparaison des deux indices montre l'avantage de l'indice de de Martonne sur le Q d'Emberger, malgré les similitudes qui existe entre eux. L'ajoute de la variante température nous a permis de distinguer pas moins de 15 étages bioclimatiques.

Cette évolution appuie les résultats déjà obtenus par Born et al (2008) sur l'ensemble du Maroc en utilisant l'indice de Köppen. Cette situation future, avec le passage vers des conditions sèches voire même désertiques, demeure inquiétante pour le devenir des ressources hydriques qui commencent à se sentir déjà dans la région. En effet, ce processus d'aridification va être, sans doute, accélérée par une irrigation intensive au niveau du Moyen Atlas qui connaît actuellement un assèchement de ses lacs.

## Bibliographie

- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5, 1–12. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Born K., Christoph M., Fink A.H., Knippertz P., Paeth H., Speth P. (2008) Moroccan Climate in the Present and Future: Combined View from Observational Data and Regional Climate Scenarios. In: Zereini F., Hötzl H. (eds) Climatic Changes and Water Resources in the Middle East and North Africa. Environmental Science and Engineering (*Environmental Science*). Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-85047-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-540-85047-2_4).
- Born, K., Fink, A. H., & Paeth, H. (2008). Dry and wet periods in the northwestern Maghreb for present day and future climate conditions. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(5), 533–551. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0313>
- Daget, P. (1977). Le bioclimat méditerranéen : Caractères généraux, modes de caractérisation. *Vegetatio*, 34(1), 1–20. <https://doi.org/10.1007/BF00119883>
- De Martonne E., 1926 : Aréisme et indice d'aridité. *Comptes rendus Académie des Sciences*, 181, 1395-1398.
- Drriouech, F., Déqué, M., & Sánchez-Gómez, E. (2010). Weather regimes-Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. In *Global and Planetary Change*. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.03.004>
- Emberger L. (1931). Sur la formule climatique applicable en géographie botanique. *Compt. Rend. Séances Acad. Sci.* 191 : 389-390
- Emberger, L. (1955) Une classification biogéographique des climats. Recueil, *travaux de laboratoire géolo-zoologique*, Faculté des sciences. Service botanique. Montpellier, 7, 3-43.
- Filahi, S., Trambly, Y., Mouhir, L., & Diaconescu, E. P. (2017). Projected changes in temperature and precipitation indices in Morocco from high-resolution regional climate models. *International Journal of Climatology*, 37(14), 4846–4863. <https://doi.org/10.1002/joc.5127>

- Gausson H. (1954). Théorie et classification des climats et microclimats. *Actes VII Congr. Int. Bot.* Paris, pp. 125-130.
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhrner, J., Kawohl, T., Krefl, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, 4, 1–20. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- Khaydarov, M., & Gerlitz, L. (2019). Climate variability and change over Uzbekistan – an analysis based on high resolution CHELSA data. *Central Asian Journal of Water Research*, 5(2), 1–19. <https://doi.org/10.29258/cajwr/2019-r1.v5-2/1-19.eng>
- Mokhtari, N., Mrabet, R., Lebaillly, P., & Bock, L. (2013). Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation du Maroc. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.* (2014) 2 (1):50-66.
- Maria, B., & Udo, S. (2017). Why input matters: Selection of climate data sets for modelling the potential distribution of a treeline species in the Himalayan region. *Ecological Modelling*, 359, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.05.021>
- Osejo, B. B., Vargas, T. B., & Martinez, J. A. (2019). Spatial distribution of precipitation and evapotranspiration estimates from WorldClim and Chelsa datasets: Improving long-term water balance at the watershed-scale in the Urabá region of Colombia. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 14(2), 105–117. <https://doi.org/10.2495/SDP-V14-N2-105-117>
- Sauvage Ch. (1963). Le coefficient pluviothermique d'Emberger, son utilisation et la représentation géographique de ses variations au Maroc. *Ann. Ser. Phys. Globe Météo.* Inst. SC. Ch. 20 : 11.
- Taabni, M., & Jihad, M.-D. El. (2012). Eau et changement climatique au Maghreb : quelles stratégies d'adaptation ? *Cahiers d'Outre-Mer*, 65(260), 493–518. <https://doi.org/10.4000/com.6718>.

# L'EFFET DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA PRODUCTION AGRICOLE DANS LES ZONES SEMI-ARIDES ET LES POSSIBILITES D'ADAPTATION, LE CAS DE LA PROVINCE DE SETTAT

Khatrani Hamid\* et Sghir Said \*\*

\*-Étudiant chercheur au doctorat *Laboratoire de recherche en gestion territoriale, communication et - modélisation : faculté polydisciplinaire Khouribga - Université Sultan Moulay Slimane Beni Mellal - Maroc*  
[Hamid.khatrani23@gmail.com](mailto:Hamid.khatrani23@gmail.com)

\*\* - Professeur d'enseignement supérieur, faculté poly disciplinaire Khouribga, Université Sultan Moulay Slimane Beni Mellal- Maroc. [sghirs@yahoo.fr](mailto:sghirs@yahoo.fr)

## Résumé :

*La province de Settata est fortement tributaire de l'agriculture liée au climat dans le cadre d'un système de pâturage agricole dans les zones semi-arides des plaines et des plateaux atlantiques, et cette culture est évidente dans les principales céréales et le bétail, comme elle l'a vu au cours des dernières décennies, surtout depuis les années 80, le climat change et se traduit principalement par le changement des pluies. L'irrégularité des précipitations et les fréquentes saisons de sécheresse ont affecté la production agricole et la superficie cultivée. A travers notre étude d'une série statistique s'étendant entre 2000 et 2019 concernant les pluies et la production agricole, il est évident que la fréquence de 9 saisons humides par rapport à 10 saisons sèches pendant lesquelles les précipitations s'écartent de la moyenne entre -7,5% -47,8%, Alors que la production agricole a augmenté pendant la plupart des saisons humides, elle a dépassé 8 000 mille Qx, alors qu'elle a diminué pendant les saisons sèches de moins de 4 000 mille Qx, à l'exception de 5 saisons où la production ne correspond pas à la quantité de précipitations, y compris deux saisons 2013-14 et 2015-16 au cours desquelles la quantité de précipitations a augmenté à plus de 400 Mm, avec une diminution de la production, qui n'a pas dépassé 3000 mille Qx. Alors que la saison 2005-06, 2012-13 et 2014-15 a connu de faibles chutes ne dépassant pas 250 mm, avec une production significative dépassant 7 000 mille Qx. Où le facteur de régularité des précipitations en fonction des stades biologiques des plantes et de la satisfaction de leurs besoins en eau est plus efficace que la quantité de précipitations.*

*A cet égard, et conformément au plan national de réchauffement climatique, et à la lumière des politiques et stratégies visant l'adaptation et le développement des champs agricoles Bour. L'Etat a cherché à intervenir à travers certains programmes et projets agricoles dans le cadre du Plan Maroc Vert. Comptages de valorisation et d'intensification des plantations, développement de la chaîne de la viande rouge, soutien à une sélection de céréales et d'arbres fruitiers, remise en état des terres et préparation de hydro-agricole, En plus de certaines initiatives individuelles pour les agriculteurs liées au renouvellement et à la diversification de l'agriculture, et à l'adoption de certaines méthodes et techniques utilisées dans l'activité agricole, afin de s'adapter aux changements climatiques et de parvenir au développement agricole.*

*Les mots clés : changements climatiques, production agricole, les zones semi- arides, province de Settata, programmes d'adaptation.*

## Introduction :

Le système pluvial au Maroc, y compris la province de Settata, est caractérisé par un caractère méditerranéen, il s'agit principalement de pluies hivernales, concentrées entre octobre et mars. Lié aux fronts aériens et aux dépressions, sa source principale est le front polaire<sup>11</sup>. Alors que son climat est contrôlé par un ensemble de facteurs tels que la localisation accidentelle, les mécanismes de distribution et de mouvement des pressions atmosphériques, la proximité ou la distance de la mer, puis le facteur hauteur, et en vertu de l'appartenance du Maroc à la zone subtropicale de transition, son climat est caractérisé par de violentes fluctuations des pluies de saison en saison et d'année en année, et se caractérise par un manque de chronologie, en termes de quantité et de qualité, surtout depuis les années 80, lorsque les saisons sèches sont devenues plus fréquentes que les saisons des pluies. Cette fluctuation pluvieuse affecte l'agriculture et la production agricole, en particulier dans une région semi-aride comme la région de Settata, où le taux de précipitations ne dépasse pas 350 mm. Cette fluctuation oscille entre les saisons humides et pluvieuses avec une bonne production et les saisons sèches avec une production médiocre, car la province de Settata repose principalement sur la culture Bour, qui représente 98% et se reflète principalement dans la culture des principales céréales, qui constituent plus de 70% des récoltes. L'agriculture est présente dans la province depuis des siècles, vivant dans un pari constant, avec un climat oscillant entre don et

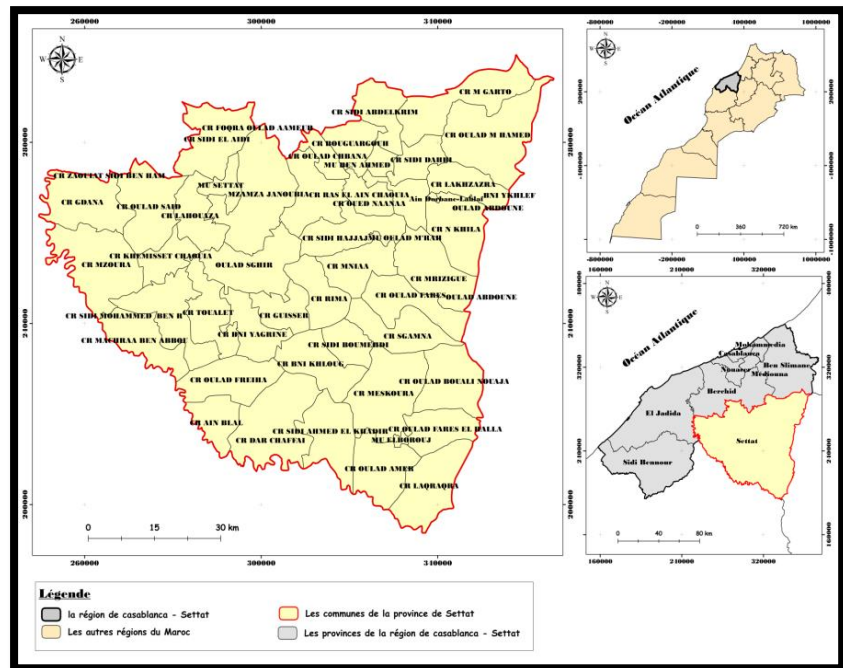
<sup>11</sup> - El Gharbaoui A.1987.les climats. In. la grande encyclopédie du Maroc : vol.3, Géographie physique, p19

rareté. Et cette fluctuation constitue encore à ce jour la caractéristique marquante de cette agriculture, malgré les progrès techniques et le développement quantitatif. Cela a un impact négatif sur les conditions économiques et sociales des habitants, en particulier des paysans, car il constitue 58% de la population travaillant dans le secteur agricole de la province<sup>12</sup>. Dans ce contexte, l'Etat est intervenu, à travers ses autorités compétentes, pour gérer et développer le secteur agricole à travers un ensemble de projets et programmes afin d'adapter et d'atténuer les effets de ces changements climatiques sur la production agricole.

## 1- Présentation du domaine d'études

Figure1. 1 Localisation de la province de Settat

Naturellement, la province de Settat entre dans les plateaux et les plaines atlantiques, dont une partie appartient aux plateaux de la Haute Chaouia semi-aride constituée de surfaces plates moyennes et ondulées de plateaux, et d'une partie des plaines humides appartenant à la Basse Chaouia, les altitudes varient dans la province entre 450 et 700 m. Il est délimité au nord par les plateaux Bin Sulaiman, au nord-ouest par la plaine de Berrechid, au sud par l'amas d'Al-Rahmna et à l'est par les plateaux d'Ouardigha.



Administrativement, il appartient à la région de Casablanca-Settat, entre les latitudes 33 ° 00; 22 ° .38 N et 7,37, 08,77 W sur une superficie de 7200 km<sup>2</sup>, répartis entre 41 communautés rurales et 5 groupes urbains, avec une population de 628371 personnes en 2017, avec une densité de 88 habitants / km<sup>2</sup>, la population rurale est de 54%. Son emplacement stratégique et sa proximité avec les villes les plus importantes jouent un rôle important dans la prospérité et le développement de son économie, notamment en ce qui concerne les services logistiques. Il se caractérise par des agriculteurs dont le modèle d'amarrage est moyennement adapté, car l'activité agricole dépend principalement de la culture de céréales et de l'élevage du bétail, en s'appuyant sur une auto-irrigation sporadique.

## 2- Caractéristiques du système agricole de la province de Settat :

### 2-1- Répartition des terres arables :

La superficie arable de Settat constitue 55% (382.165 hectares), dont 98.6 sont irrigués et 2.7 irrigués, et la superficie des parcours est de 20% (121549 hectares), les forêts sont de 7% (39.404 hectares) et les terres de repos sont de 5 % (33032 hectares), les terres non arables représentent 12% (70082 hectares) et les arbres fruitiers 1% (8010 hectares) de la superficie totale estimée à 607 086 hectares. Le système de propriété privée domine avec un pourcentage de 70,40%, et ce système est dominé par l'exploitation directe, qui représente 78,6% (523 370 hectares) du total des

<sup>12</sup> -Monographie agricole, Centre de travaux agricoles de Settat

terres. La structure de l'immobilier se caractérise également par une fragmentation, avec des exploits mineurs ne dépassant pas 5 hectares (70%).

## 2-2-Types de productions agricoles :

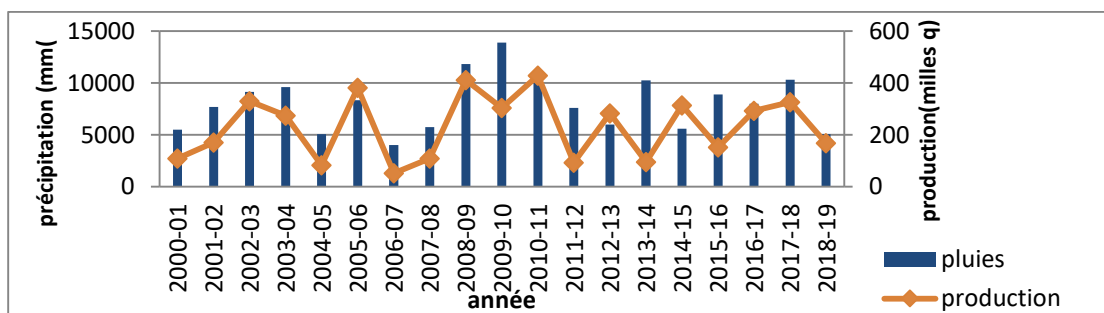
La culture des céréales domine la superficie arable de 73% (317000 hectares), avec une production de 2542,31 mille quintaux, et la culture de l'orge domine de 48,5% en raison de son adaptation au climat et au sol et au choix de l'agriculteur de cultiver elle, alors que les autres cultures représentent des proportions faibles et inégales comme le coton de 7%. Avec une production de 105,49 mille quintaux, les lentilles occupent 61,64% de cette superficie, et le bétail représente 4% et les arbres fruitiers 2%, produisant environ 180,54 mille quintaux, dont les oliviers constituent 97%. Alors que la superficie des cultures maraîchères et industrielles représente moins de 2%. La province de Settat possède également un important troupeau d'ovins et des animaux de trait, comptant environ 1 810 000 têtes.<sup>13</sup>

## 3- L'effet du changement climatique sur la production agricole :

### 3-1- L'effet de la variabilité des pluies sur la production des principales céréales :

Les précipitations sont le principal facteur climatique contrôlant la croissance des cultures tout au long de la saison agricole, ces précipitations sont caractérisées par une forte variabilité qui conduit à des perturbations de la production, car l'instabilité et les fluctuations étaient connues pendant la période comprise entre -2000 et 2019 ( figure2), L'évolution annuelle des précipitations étant connue, il y a eu 9 saisons humides contre 10 saisons sèches au cours desquelles les précipitations s'écartaient de la moyenne dont certaines étaient caractérisées par une forte sécheresse. Cette période a connu 7 saisons, avec un taux de 37%, correspondant à des précipitations et une production élevée, telles que les saisons (2002-03, 04-2003, 2008-09, 2009-10, 2010-11, 2016-17 et 2017- 18)La production ayant atteint son maximum pendant la saison 2010-11, environ 10 728,9 milleQx, avec un rendement de 23,7 Qx/ ha, cette saison a connu des pluies importantes et régulières qui ont atteint 436 mm. Il y avait aussi 7 saisons au cours desquelles il y avait une corrélation entre la faiblesse des précipitations et la baisse de la production, comme les Saisons( 2000-01, 2001-02, 2004-05, 2006-07, 2008-09, 2011 - 12 et 2018-19). La production était connue pour être inférieure à 3 000 milleQx avec un rendement inférieur à 12 Qx /ha. La quantité de précipitations dépasse 250 mm .

Figure2. La relation entre la variabilité des précipitations et la production céréalière



Source: Direction régionale de l'agriculture et de la météorologie, Settat.2018-Adapté

Ainsi, il devient évident comment la quantité de précipitations est liée à la production, car elle s'effondre aux niveaux les plus bas pendant les saisons sèches, alors qu'elle augmente pendant les saisons humides, mais cela dépend aussi de la façon dont ces quantités de pluie sont réparties, et de l'étendue. à laquelle les besoins en eau des cultures sont satisfaits au cours de ses étapes

<sup>13</sup>-Haut-commissariat au plan, Direction régionale de l'agriculture, Settat

biologiques. Il y a eu 5 saisons avec un pourcentage de 26% d'inadéquation entre la quantité de précipitations et la production, comme 2005-06, 2012-13 et 2014-15, lorsque la production a augmenté à plus de 7.000 mille Qx contre un double de la quantité de précipitations qui ne dépasse pas 300 mm, car les précipitations se sont réparties régulièrement, surtout pendant le stade de maturité et de fructification. En revanche, les saisons 2013-14 et 2015-16 ont enregistré des baisses importantes, comprises entre 410 et 356 mm, avec une baisse de la production, qui a atteint entre 2367 et 3801 mille Qx

Cela s'explique par un ensemble de facteurs liés à la réduction de la superficie due au grand nombre de pluies et à l'inondation des terres agricoles avec de l'eau, ainsi qu'à la pourriture des graines avant maturité, ou à l'étouffement du lit en raison d'un excès d'eau, humidité ou séchage pendant la période de germination et de maturité.

### 3-1-1- L'effet du système de variabilité pluviométrique aux stades biologiques sur la production agricole :

La relation entre la quantité de précipitations et la production reste essentiellement dépendante du système de distribution de ces pluies et de la mesure dans laquelle cette distribution est compatible avec la satisfaction des besoins en eau des cultures au cours de leurs stades biologiques. Ceci est démontré par l'étude de la variabilité des précipitations au cours de ces étapes, lorsque le stade de maturité (janvier et février) est témoin d'un changement de pluie sévère avec un coefficient de variation supérieur à 77%, et une tendance à une diminution des précipitations est de - 0,41 mm par an. Vient ensuite la phase de fructification (mars, avril, mai), où le coefficient de variation atteint 67,8%, avec une tendance à diminuer pour atteindre -0,23 par an, tandis que la phase de germination a connu le coefficient de variation 47,9% et également connu une légère diminution des précipitations de -0,15 mmpar an.

Tableau 1. La variabilité des précipitations au cours des étapes biologiques de la station Settata en fonction du coefficient de variation%

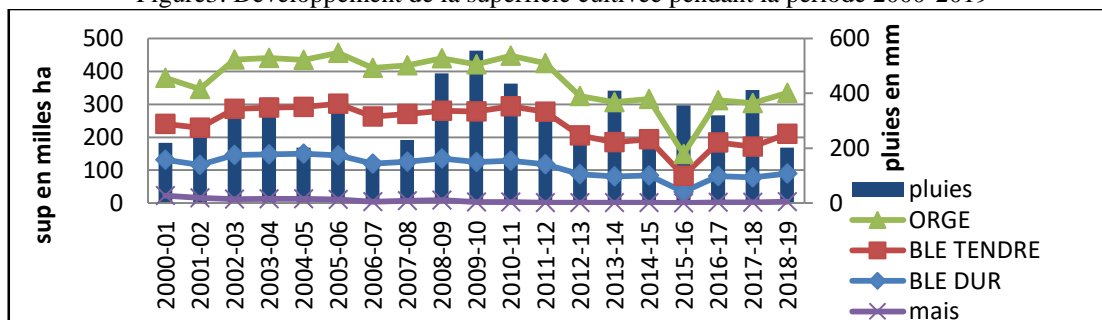
station	variabilité des précipitations au cours du cycle agricole Coefficient de variation%	Variabilité de la pluie au cours des étapes du cycle agricole%		
		Stade de germination	Stade de maturité	Stade de fructification
Settata	36,46	47,89	77,97	67,68

Source: La station météorologique régionale Settata.2018 - Adapté

### 3-2- La superficie plantée est affectée par le changement de pluie :

On remarque à partir de la figure 4 que la superficie cultivée fluctue annuellement en fonction des précipitations, puisqu'elle a atteint pendant certaines saisons, comme la saison 2003-04, à 456 mille hectares dont 147,6 mille hectares de blé dur, 142,3 mille hectares de blé tendre et 151,3 milliers d'hectares de blé tendre, d'orge et 14,7 milliers d'hectares de maïs, au cours de cette période, des précipitations importantes ont été signalées, atteignant 384,5 mm.

Figure3: Développement de la superficie cultivée pendant la période 2000-2019



Source: Direction régionale de l'agriculture et de la météorologie, Settata.2018- Adapté

Alors qu'une baisse était connue pendant les saisons 2001-02 et entre 2012 et 2019, et qu'elle a atteint son taux le plus bas pendant la saison 2015-16 à 149,1 milliers d'hectares, alors qu'elle diminuait d'environ 306,9 milliers d'hectares par rapport à la saison précédente, lorsqu'un faible taux de précipitations de 202 mm était connu. Ainsi, il devient évident qu'il existe une relation étroite entre le taux de précipitation et la surface cultivée. Lorsqu'il tombe au début de la saison agricole, en particulier en octobre, il est indiqué pour l'agriculteur de préparer la terre et de mener à bien le processus de culture et d'augmenter la superficie cultivée.

### **3-3- Evolution de l'élevage:**

L'élevage bovin, en particulier le pastoralisme, est lié à la nature du climat qui caractérise la saison agricole et à la mesure dans laquelle la nourriture est disponible ou non dans les revenus des agriculteurs pour le bétail. Comme elle a connu un développement au cours d'une série de périodes, la saison 2007-08 a enregistré un total de 1,479,4 millions de têtes, et la saison 2009-10 a enregistré 1,304,7 millions de têtes, les ovins représentant 90%, les bovins 7% et caprins 3%. Lorsqu'il y avait une saison très humide, la quantité de précipitations atteignait 555,5 mm et le surplus de pluie atteignait 61%. Contribuer à la durabilité de la production animale en fournissant des pâturages, Alors que le nombre de têtes a diminué pendant la saison 2011-2012 à 176,6 milliers de têtes avec un changement en pourcentage de 86% par rapport à la saison précédente, où les précipitations ont été enregistrées à 303 mm, le nombre de têtes de bétail a augmenté pendant la saison 2014-13 à 1,230 millions têtes, ainsi que pendant la saison 2015 -16 à 1,459 millions de têtes, Avec une pénurie de surface cultivée qui ne dépasse pas 200 mille hectares au profit de Jachères qui ont contribué au développement de l'élevage.

Tableau 2. Le développement de l'élevage au cours de la période entre 2007-08 et 2015-16

<b>type</b>	<b>2007-2008</b>	<b>2009-2010</b>	<b>2011-2012</b>	<b>2013-2014</b>	<b>2015-2016</b>
<b>bovins</b>	139000	91500	17115	138820	178200
<b>ovins</b>	1300400	1175400	134320	1070065	1250400
<b>caprins</b>	40000	37800	25209	21572	30600
<b>totale</b>	<b>1479400</b>	<b>1304700</b>	<b>176644</b>	<b>1230457</b>	<b>1459200</b>
<b>pluies</b>	230,2	555,7	303,8	410	356,04

Haut-commissariat au plan, Direction régionale de l'agriculture - Settat, Bulletins statistiques 2009-2011-2015

### **4- Stratégies d'adaptation pour atténuer le changement climatique:**

Dans le cadre de la mise en œuvre des recommandations du Comité International d'Etude du Changement Climatique (GIEC), et en vertu du Maroc, signataire de l'Accord de Kyoto, il a élaboré un «Plan National de Lutte contre le Réchauffement Climatique en 2009. " Il comprend diverses mesures sectorielles dans divers domaines pour s'adapter aux changements climatiques, parmi lesquelles figurent celles prises dans le secteur agricole. Au niveau de la province de Settat. Des stratégies de développement agricole dans la région ont été formulées à travers les projets du Plan Maghreb vert, avec ses premier et deuxième piliers, dans le cadre du programme du plan agricole régional. Il consiste à valoriser les céréales et les arbres fruitiers, à développer la viande rouge, à augmenter la productivité et à développer les produits locaux. Parmi ces projets:

- Projet de collecte de céréales autour d'une unité de stockage et de transfert, Il a été lancé en 2011 avec un investissement de 82 millions de dirhams au profit d'environ 750 agriculteurs ;
- Projet de collecte de céréales autour d'une unité de stockage: La Coopérative Agricole Marocaine de la Chaouia a été lancée en 2013 avec un volume d'investissement de 133,7 millions de dirhams distribués à 500 bénéficiaires ;
- Les deux projets de développement de la filière viande rouge, la variété Sardi dans l'ouest et l'est de Beni Meskine , Il a été lancé en 2010 et 2014 avec un investissement de 26 millions de dirhams, au profit d'environ 1000 agriculteurs ;

- Les deux projets d'élevage et de renforcement des bovins en lactation intéressent la circonscription de Settât et Ben Ahmed, Il a été lancé en 2010 avec un volume d'investissement de 23 millions de dirhams, dont environ 3000 agriculteurs ont bénéficié.
- Le projet d'intensification de la production céréalière par la technique du semis direct, Il a été lancé en 2012 sur une superficie d'environ 2000 hectares au profit de 242 agriculteurs.
- Un projet de développement de l'élevage et de la valorisation du lait de caprins, qui a été lancé en 2017 avec un volume d'investissement de 3 millions dirhams, dont 120 agriculteurs ont bénéficié.
- Le projet d'intensification de la culture de l'ail qui a été lancé en 2017 avec un solde financier de 14,5 millions de dirhams sur une superficie de 150 hectares répartis entre 150 bénéficiaires.
- Un projet horizontal de préparation hydro- agricole pour la réutilisation des eaux usées dans la commune Sidi El-Aidi, qui a été lancé en 2012 avec un volume financier de 25 millions de dirhams, dont bénéficieront 414 agriculteurs....

### **Conclusion :**

Le changement climatique est l'un des plus grands défis affectant la production agricole dans la province, en raison de la forte dépendance aux terres agricoles liée au climat, en particulier la culture de céréales et avec une plus grande proportion d'orge, ainsi que la dépendance à l'égard du bétail ovins en premier place, puis les bovins et les caprins, et la double proportion de terres est connue, propice à l'agriculture, en contrepartie de l'extension des terres pastorales et forestières, ce qui a contribué au développement de l'activité pastorale. La multiplicité des exploitations et la domination des petites exploitations entravent l'utilisation optimale des terres et une bonne production. Cette agriculture continue de souffrir du changement climatique, en particulier les fluctuations des pluies, car la production agricole, les surfaces cultivées et l'élevage pendant les saisons sèches, et le manque de précipitations et son irrégularité, diminuent de son impact, compte tenu de la faiblesse d'autres ressources naturelles qui contribuent à la production agricole, comme les sols et les ressources en eau. Face à ces défis, l'Etat a pris des mesures pour développer le secteur agricole dans ce domaine semi-aride, et pour adapter et atténuer l'impact de ces changements climatiques. Cependant, ces mesures et interventions techniques restent limitées et insuffisantes. Par conséquent, des stratégies et des mesures plus réalisables doivent être développées.

### **La bibliographie**

- Cordier, Jean, Antoine Erhel, Alain Pindard, et Frédéric Courleux.2008 « La gestion des risques »In Annales de géographie.115-125.Armand Colin.
- DEBRACH, J. et BIDAULT, G., 1956 : " Précipitations atmosphériques au Maroc 1925-1949 : fréquences et intensités des précipitations ", Annal. Servi. Physique. Globale. et Météore., Institut Scientifique Chérifien, **T.16**, pp. 77-116.
- El gharbaoui A.1987.les climats. In. la grande encyclopédie du Maroc : **vol.3**, Géographie physique, p19
- karrouk M S, 2012 le changement climatique et ses impacts au Maroc : Complexité du nouveau climat et défis de la prédiction du cycle de l'eau. Environnement et changement climatique au Maroc ; Diagnostic et Perspectives Publie par : Konrad- Adenauer- stiftunge.**v.1ère** édition 2012.
- Rebotier,J.2014. Adaptation aux changement environnementaux et territoires. Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest,**37** PP,5-12
- Rapport de l'organisation météorologique mondial,2014. « Le climat mondial en 2014: chaleur extrême et inondations ».
- Administrations et intérêts**
- Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau et de l'Environnement, Département de l'Environnement, 2009: « Plan national de lutte contre le réchauffement climatique » Rabat.
- Direction régionale de l'agriculture – Settât
- Direction de la météorologie – Settât
- Haut-commissariat au plan, Direction régionale de l'agriculture— Settât



# IMPACT DE L'EVOLUTION PLUVIOMETRIQUE SUR LES ECOULEMENTS DE SURFACE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OTI AU TOGO

Dambre Koungbanane<sup>(1&2)</sup>, Henri S. TotinVodounon<sup>(3&4)</sup> et MinkilabeDjangbedja<sup>(2)</sup>

1. Centre d'Excellence Africain sur les Changements Climatiques, la Biodiversité et Agriculture Durable (CEA-CCBAD), Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire; dambrekoungbanane@gmail.com ;
2. Laboratoire de Recherches Biogéographiques et d'Etudes Environnementales, Département de Géographie, Université de Lomé, Togo, BP 1515, Lomé, Togo, paulinminkilabe@yahoo.fr;
3. Laboratoire de Climatologie & Ethnoclimatologie Tropicales, Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Université de Parakou, Bénin ; BP 123, Parakou, Bénin, sourouhenri@yahoo.fr;
4. Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi, 03BP 1122, Cotonou, Bénin.

## Résumé

En Afrique de l'Ouest et au Togo en particulier, de nombreuses études sur la variabilité pluviométrique ont montré une tendance à la baisse des pluies à partir de la fin des années 1960 et une légère reprise des précipitations à la fin des années 1990. Ainsi, les changements climatiques observés au cours de ces dernières années induisent des impacts importants sur les écoulements de surface du bassin versant de l'Oti. Cette étude vise à analyser les relations pluie/débit et le régime hydrologique du bassin versant de l'Oti à l'exutoire de Mango. Les données de précipitations journalières de neuf stations sur la période 1961-2017 et des débits journaliers de l'Oti à Mango (1961-2017) seront utilisées pour analyser la variabilité hydroclimatique et son impact sur le bassin versant de l'Oti. Les résultats obtenus montrent que la période sèche des années 70 jusqu'à la fin des années 90 est suivie d'un retour à la pluviométrie proche des années 1960, à partir de la décennie 2000. Le régime hydrologique du bassin versant de l'Oti dépend de la dynamique des régimes pluviométriques, du couvert végétal et du substratum géologique. La hausse des débits succède à l'augmentation des précipitations montrant une forte corrélation entre pluie/débit dans le bassin versant.

**Mots clés :** Oti, Evolution pluviométrique, régime hydrologique, Ecoulement de surface

## Abstract

In West Africa and Togo in particular, many studies on rainfall variability have shown a declining trend in rainfall from the late 1960s and a slight recovery in rainfall in the late 1990s. Thus, the climate changes observed over the last few years have had significant impacts on surface runoff in the Oti catchment area. This study aims at analysing the rain/runoff relations and the hydrological regime of the Oti catchment basin at the Mango outlet. Daily rainfall data from nine stations over the period 1961-2017 and daily flow data from the Oti to Mango (1961-2017) will be used to analyse the hydroclimatic variability and its impact on the Oti catchment area. The results obtained show that the dry period from the 1970s to the end of the 1990s is followed by a return to the rainfall close to the 1960s, starting in the 2000s. The hydrological regime of the Oti catchment area depends on the dynamics of the rainfall patterns, the vegetation cover and the geological substratum. The increase in flows follows the increase in rainfall showing a strong correlation between rainfall and flow in the catchment area.

**Keywords :** Oti, Rainfall evolution, Hydrological regime, Surface runoff

## Introduction

La variabilité climatique actuelle se manifeste par de longues périodes de sécheresse, les séquences sèches, humides, les pluies tardives et précoces avec pour conséquences des effets négatifs sur le cycle hydrologique, l'environnement et les activités socio-économiques (Mahé *et al.*, 2013 ; Badaméli, 2017). Cette variabilité climatique se traduit par une modification du régime et du rythme des précipitations, affectant ainsi directement l'importance et la synchronisation de l'écoulement (Zakari *et al.*, 2015 et Kodja, 2018). Depuis 1970 jusqu'à la fin des années 1980, l'Afrique de l'Ouest a connu une forte diminution de sa pluviosité et des écoulements de ses fleuves avec des variabilités spatiales et temporelles différentes (Paturel *et al.* 1997 ; Servat *et al.* 1998).

Ainsi, la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest dont le Togo (Blivi, 2013) n'est plus à démontrer. Dans le bassin versant de l'Oti, l'analyse des séries de pluies et débits met en évidence une grande variabilité spatio-temporelle et la non-linéarité des relations pluie-débit.

Le changement de régime hydrologique n'est pas proportionnel à celui de la pluie, il est issu d'une modification des coefficients de ruissellement. Cette variabilité entraîne des modifications des régimes hydrologiques, aussi bien dans les répartitions saisonnières de flux que pour l'estimation de valeurs caractéristiques.

L'objectif de étude est d'analyser la relation pluie/débit et le régime hydrologique du bassin versant de l'Oti à l'exutoire de Mango.

## 1. Présentation du secteur d'étude

Le bassin versant de l'Oti est situé dans le bassin du fleuve volta et draine une partie des pays transfrontaliers (Burkina-Faso, Bénin, Togo et Ghana). Au Togo, il couvre entièrement les Régions des Savanes et de la Kara, le 1/3 de la Région Centrale, à peine 1/5 de la Région des Plateaux et une petite portion de la Région Maritime sur une superficie de 26 700 km<sup>2</sup> soit environ 47,3 % de la superficie du territoire national et 4,3 % de la superficie du bassin de la Volta qui fait 400 000 km<sup>2</sup>. La partie du bassin située dans la Région des Savanes est intéressée par cette étude et est située entre 11°22' et 10°00'N et -0°3' et 0°50'E (Fig.1).

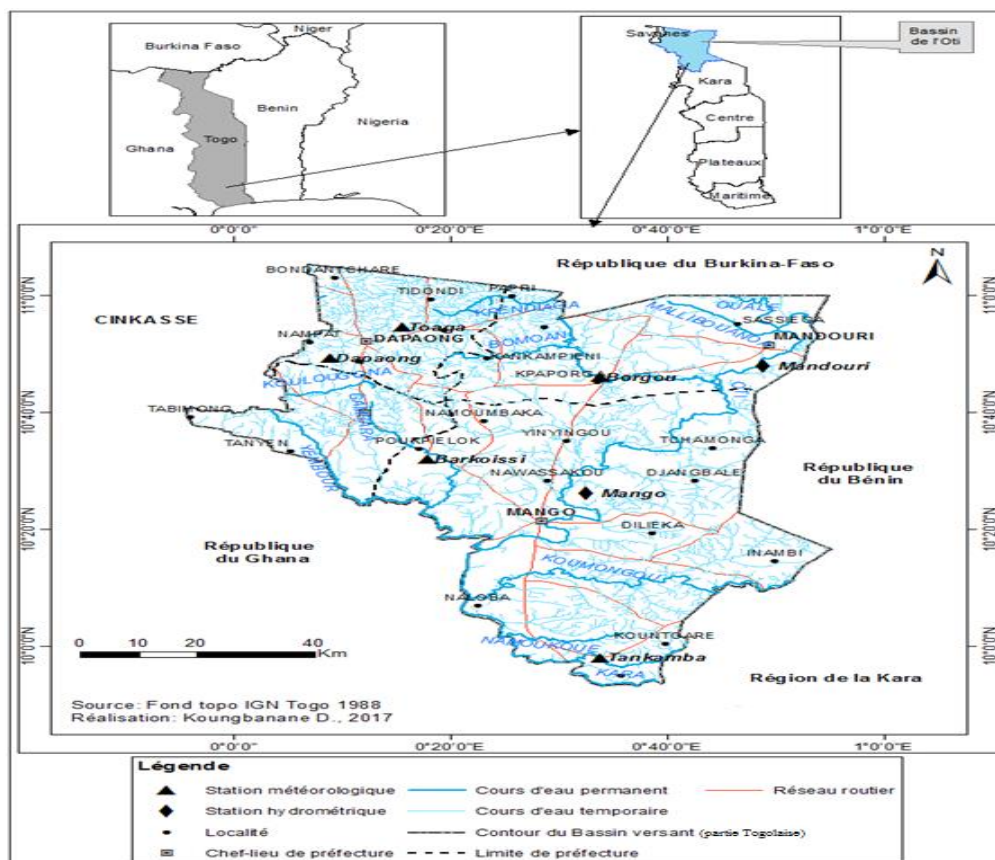


Figure 1. Localisation géographique du bassin versant de l'Oti au Togo

## 2. Données et méthodes

### 2.1. Données

Les données utilisées concernent les précipitations journalières de neuf (09) stations dans le bassin versant de l'Oti. Il s'agit des stations de Dapaong, Toaga, Mango, Mandouri, Borgou, Barkoissi, Kanté, Tankpamba et Guérrin-Kouka. Les données couvrent la période 1961-2017 et sont extraites de la base de données de la Direction Générale de la Météorologie Nationale à Lomé (Togo). Les données de débits journaliers de l'Oti à Mango (1961-2017) sont obtenues à la Direction de Ressources en Eau, au service de l'hydrologie à Lomé (Togo).

### 2.2. Méthodes

### 2.2.1. Analyse de la variabilité des pluies journalières

Pour analyser la variabilité journalière des pluies couvrant la période 1961-2017, une interpolation linéaire a été faite et a permis d'avoir le champ moyen de pluie dans le bassin versant de l'Oti.

### 2.2.2. Dépendance statistique entre pluie et écoulement dans le bassin versant

Pour mieux prédire les crues dans le temps et dans l'espace, la relation pluie/débit a été utilisée pour mesurer la dépendance qui existe entre les précipitations et les écoulements de surface dans le bassin versant de l'Oti. Il permet d'obtenir le coefficient de détermination ( $R=r^2$ ). Elle est déterminée par la formule suivante :

$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sigma(x)\sigma(y)}$$
; où N est effectif total d'individus ;  $x_i$  et  $y_i$  : les valeurs des séries ;  $\bar{X}$  et  $\bar{Y}$  : moyennes des variables ;  $\sigma(x)$  et  $\sigma(y)$  : les écarts types.

## 3. Résultats et discussion

### 3.1. Variabilité journalière des précipitations dans le bassin versant de l'Oti au Togo

La figure 2 présente la variabilité journalière moyenne des précipitations dans le bassin versant de l'Oti au Togo de 1961-2017.

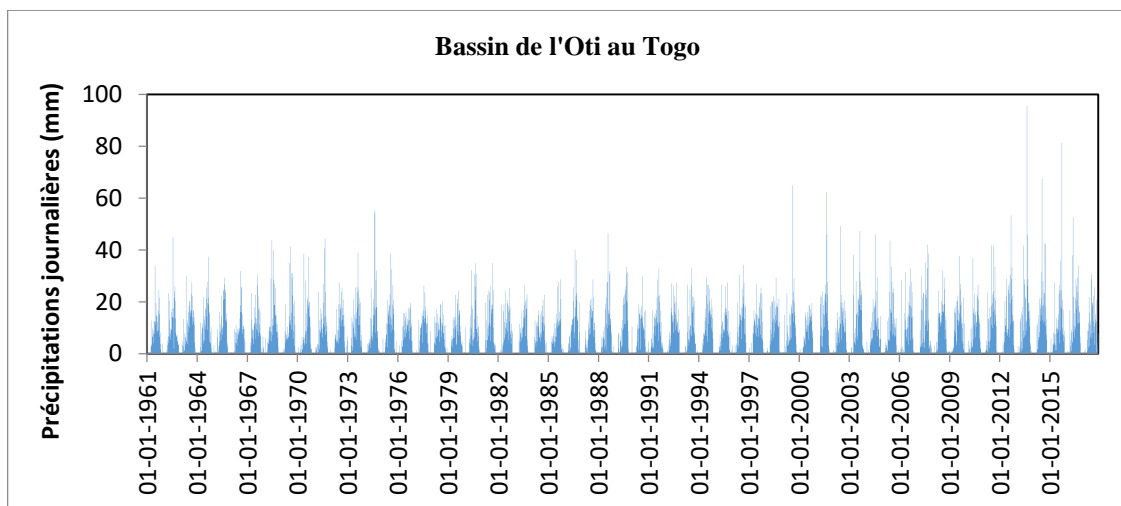


Figure 2 : Variabilité des précipitations journalières moyennes du bassin versant de l'Oti de 1961 à 2017

L'analyse de l'évolution interannuelle des maxima journaliers de précipitation dans le bassin versant montre une variabilité du maximum annuel journalier des lames d'eau précipitées de 1961-2017 (figure 2). Le maximum journalier de précipitation a connu une hausse de 1961-1970 avec une moyenne de 2,95, suivie de la baisse pendant la période 1971-1999 avec une moyenne journalière de 2,80 mm. Par contre, le maximum journalier annuel des lames d'eau précipitées a connu une légère augmentation au cours de 2000-2017 pour une moyenne de 3,04 mm. Cette situation résulte de l'amélioration des conditions pluviométriques en Afrique.

### 3.2. Analyse de la relation pluie/débit au pas de temps mensuel et journalier dans le bassin versant

La figure 3 montre la relation pluie-débit au pas de temps mensuel.

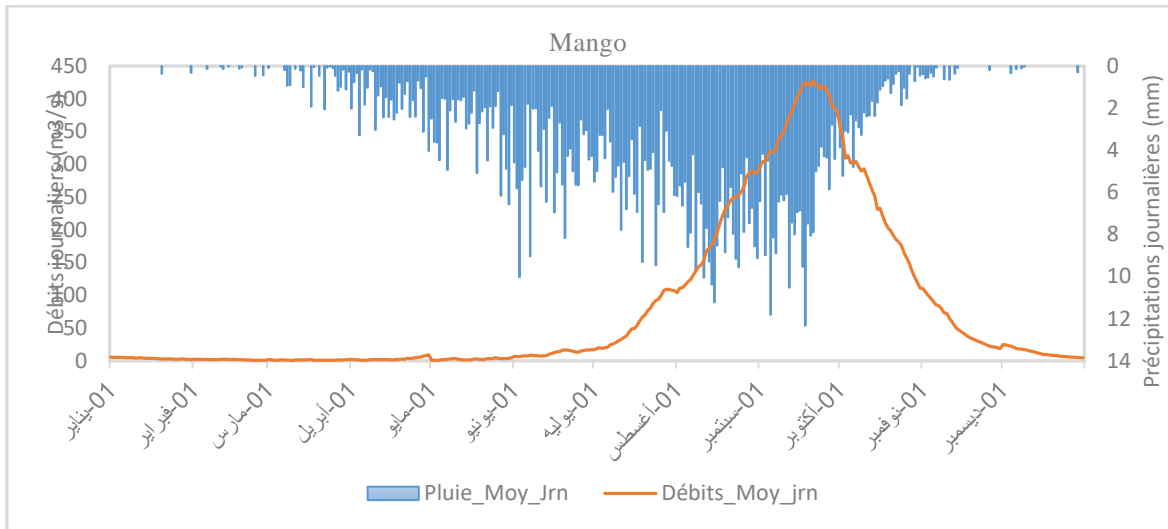


Figure 3 : Relation pluie débit au pas de temps mensuel à Mango et à Mandouri

De l'examen de ces figures, il ressort qu'il y a un décalage d'un mois de forte pluie. La comparaison des dates de pluie moyenne journalière maximale et les débits journaliers maximums observés révèle un décalage, autrement dit les pluies journalières maximales sont observées dans les mois d'août (142,2 mm), alors que les débits journaliers maximums sont enregistrés dans le mois de septembre (651,33 m<sup>3</sup>/s). Ce décalage est dû à un certain nombre de facteurs tels que l'humidité du sol, la végétation, la taille du bassin versant, la structure topographique qui ont une influence sur la précipitation.

### 3.2. Analyse de la relation pluie/débit au pas de temps journalier dans le bassin versant

La figure 4 illustre la relation pluie-débit au pas de temps quotidien dans le bassin versant de l'Oti au Togo.

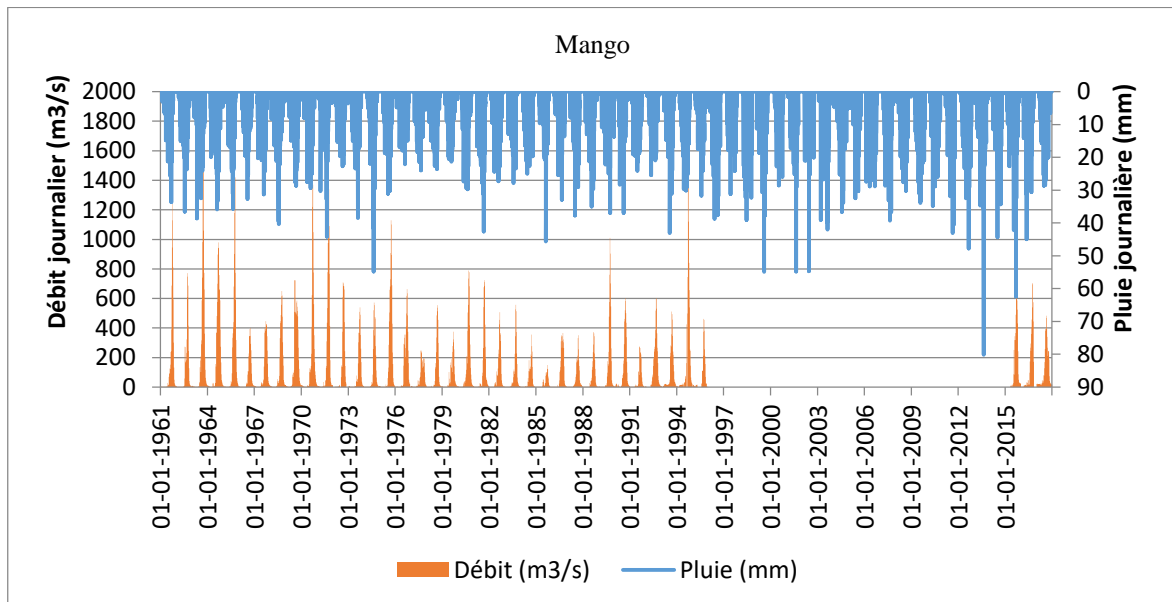


Figure 4 : Relation pluie débit au pas de temps journalier à Mango

Il ressort de l'analyse de la figure 4 que la hausse des débits succède à l'augmentation des précipitations dans le bassin. Plus les pluies sont abondantes, plus les écoulements de surface vont augmenter. Les plus forts débits sont enregistrés avec un décalage de fortes pluies.

## Conclusion

L'analyse de la variabilité hydroclimatique du bassin versant de l'Oti au Togo (1961-2017) montre une variation journalière de précipitations marquée par une hausse de 1961-1970, suivie de la baisse pendant la période 1971-1999 et une légère augmentation au cours de 2000-2017. Dans le même sens, les débits journaliers ont subi la même tendance sauf que la hausse pluviométrique de 2000-2017 n'a pas eu d'effet d'augmenter les débits. La relation pluie/débit au pas de temps mensuel montre un décalage d'un mois de fortes pluies. Ainsi, la relation pluie-débit permet de prédire les débits de crue dans le bassin versant de l'Oti au Togo.

## Références bibliographiques

- Badaméli P. A., 2017. Changements climatiques au Togo et leurs impacts sur les activités agricoles. Thèse de Doctorat unique de Géographie, Université de Lomé, Togo, 236 p.
- Blivi A., 2013. Retour d'informations sur les données et observatoires hydro-climatiques, parties de l'étude sur les inondations en Afrique de l'Ouest et de la communication nationale sur les changements climatiques au Togo. Actes du *30ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Cotonou (Bénin), pp 14-22.
- Kodja D. J., 2018. Indicateurs des événements hydroclimatiques extrêmes dans le bassin-versant de l'Oueme à l'exutoire de Bonou en Afrique de l'ouest. Université de Montpellier, Thèse de Doctorat, 287p.
- Mahe G., Lienou, Descroix L., Bamba F., Paturel J. E., Laraque A., Meddi M., Habaieb H., Adeaga O., Dieulin C., Chahnez Kotti F., Khomsi K., 2013. The rivers of Africa: witness of climate change and human impact on the environment . <https://doi.org/10.1002/hyp.9813>.
- Paturel J. E., Servat E., Lubès-Niel H. et Delattre M. O., 1997. Variabilité climatique et analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 325(10), 779-782.
- Servat E., Paturel J.E., Kouamé B., Travaglio M., Ouédraogo B. J-F., Lubès-Neil H., Fritsh J-M., Masson J-M. et Marieu B., 1998. Identification, characterisation and consequences of a hydrological variability in West and Central Africa. *Variability of Water Resources in Africa in the 20th Century*, International Conference Proceeding Abidjan, IAHS Publication, 252, pp 323-337.
- Zakari S., Tente B. A. H., Toko I. I., Yabi I., Afouda F., N'bessa B., 2015. Variabilité hydropluviométrique et dynamique de l'occupation des terres dans le bassin de la Sota à l'exutoire de Coubéri au Bénin (Afrique de l'Ouest). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, ISSN 2028-9324, Vol. 13 No. 2 Oct. 2015, pp. 235-250.

# MESURE ET DÉTECTION DES ÎLOTS DE CHALEUR ET DE FRAÎCHEUR EN MILIEU TEMPÉRÉ SEMI-CONTINENTAL : L'EXEMPLE DU TERRITOIRE DE METZ MÉTROPOLE

Lebaut S., Hassani N. et Drogue G.

Université de Lorraine, LOTERR, F-57000 Metz, France ([nassima.hassani@univ-lorraine.fr](mailto:nassima.hassani@univ-lorraine.fr))

**Résumé :** L'étude porte sur les méthodes de mesure utilisées pour l'observation et la caractérisation quantitative des champs de température de l'aire urbaine de Metz Métropole, dans le nord-est de la France. La première est la télédétection spatiale permettant de caractériser les températures de surface de jour afin de spatialiser les zones de fort dégagement de chaleur et a contrario, celles se caractérisant par une certaine fraîcheur. La deuxième méthode consiste à effectuer des mesures de la température de l'air à partir d'un réseau de 28 stations météorologiques fixées à 3 m du sol, permettant des mesures en continu. Ce réseau est complété par des mesures mobiles par transects urbains effectuées à vélo afin d'appréhender plus finement la variabilité spatiale de la température de l'air. Enfin, la quatrième méthode correspond à des mesures aéroportées par drone permettant de mesurer les températures de surface à échelle fine. Les résultats multi-échelles obtenus dans le cadre de ce travail apportent des données utiles à la décision. Elles pourront servir en outre de support pour rendre concrète l'adaptation au changement climatique pour le grand public et l'accompagner au changement en matière de comportement et de pratique des lieux en période de forte chaleur.

**Mots clés :** changement climatique ; îlot de chaleur ; transects mobiles ; température de surface ; température de l'air ; Metz Métropole.

**Abstract:** The study focuses on the measurement methods used for the observation and quantitative characterization of the urban heat island in the Metz metropolitan urban area in northeastern France. The first is spatial remote sensing to characterize daytime land surface temperatures in order to spatialize areas of high heat release and conversely, those characterized by a certain coolness. The second method consists in carrying out measurements of the air temperature from a network of 28 meteorological stations fixed at 3 m from the ground, allowing continuous measurements. This network is completed by the method of mobile measurements by urban transects carried out by bicycle in order to apprehend more finely the spatial variability of the air temperature. Finally, the fourth method is airborne measurements by drone to measure surface temperatures at fine scale. The results obtained are useful for decision-making. They can be used for instance as a support to make concrete the adaptation to climate change for the general public and to accompany it to the change in behavior and practice of the places in period of strong heat.

**Keywords:** climate change; heat island; mobile transects; surface temperature; air temperature; Metz Métropole.

## Introduction

Le contraste thermique opposant les centres-villes sensiblement plus chauds que leur périphérie moins dense et *a fortiori*, que le milieu rural environnant -phénomène connu sous le nom d'îlot de Chaleur Urbain (ICU)-, entraîne un rafraîchissement nocturne plus tardif et plus lent des zones urbaines (Oke, 1987). Cela crée, par temps chaud, un inconfort thermique important pour les citoyens, particulièrement les personnes vulnérables à la chaleur intense, ce qui en fait un enjeu fort de santé publique exigeant de s'interroger sur les stratégies de développement local à adopter en vue de compenser ses effets. Or, ces actions passent avant tout par une meilleure compréhension de l'ICU et des facteurs influençant son apparition et son intensité.

Il existe plusieurs méthodes et outils permettant de mesurer et quantifier l'ICU dans ses différentes formes et d'identifier les variables influençant son comportement. Les thermographies des températures de surface (Ts), dérivées des mesures dans l'infrarouge par télédétection spatiale ou aéroportée, constituent la principale source d'information pour étudier l'ICU de surface au niveau du sol (ICUs). Pour ce qui est de l'ICU de la canopée urbaine, les relevés thermiques *in situ*, par réseau fixe, ou par transect mobile constituent l'outil privilégié. Le développement ci-dessous présente les travaux d'observation et de qualification des champs de température de l'agglomération de Metz dans le cadre des travaux de thèse menés en collaboration étroite avec la métropole (Direction Générale Adjointe Urbanisme Durable), illustrés par quelques résultats. Les choix des méthodes d'observation s'inspirent des expérimentations et retours d'expérience de météorologues et géographes climatologues qui ont caractérisé les températures urbaines dans d'autres villes moyennes françaises (Cantat, 2014 ;

Leconte, 2014 ; Foissard, 2015 ; Richard *et al.*, 2017). Précisons qu'au sein de l'ICUs comme de l'ICU de canopée, il existe localement des milieux dont la température est plus basse par rapport au reste du milieu (on parle alors d'îlot de fraîcheur).

## **1. Méthodes de mesure et de détection des îlots de chaleur et de fraîcheur**

### **1.1. Études des températures de surface**

#### *1.1.1. Par télédétection spatiale*

Les images thermiques de surface (Ts) sont un très bon descripteur de l'énergie émise par les surfaces urbaines. Elles sont obtenues par une conversion numérique du rayonnement infrarouge émis par ces surfaces qui est enregistré par des capteurs embarqués sur des plateformes satellites ou aéroportées.

La télédétection satellite est l'unique méthode offrant la possibilité de quantifier les Ts à large échelle et d'établir un descriptif spatio-temporel de l'ICUs. Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi d'exploiter les images dans l'infrarouge des satellites *Landsat* qui ont l'avantage de couvrir l'intégralité de l'agglomération messine avec une résolution spatiale de 100 m (Hassani *et al.*, 2020). Les Ts de la figure 3 ont été obtenues par application de la méthode *single-channel* de Sobrino *et al.* (2004) qui permet d'éliminer les effets atmosphériques se produisant entre la surface de la Terre et les capteurs satellitaires (Wicki et Parlow, 2017).

#### *1.1.2. Par télédétection aéroportée (drone civil)*

La télédétection par drone est en plein essor en climatologie urbaine. Cette télédétection de proximité (faible distance caméra-cible) offre l'avantage d'une grande flexibilité par rapport à la télédétection satellite. Son échelle spatiale (prise d'image à basse altitude, environ 50m) est de l'ordre de 100 à 300 m<sup>2</sup>, ce qui en fait donc un outil particulièrement adapté aux échelles fines.

Dans le cadre de nos travaux, une caméra infrarouge miniaturisée a été embarquée à bord d'un drone civil quadricoptère afin d'obtenir des thermographies lors de journées radiatives avec un vent faible au niveau de certains sites faisant l'objet d'une rénovation urbaine. Les premiers résultats ont fait l'objet d'une publication (Drogue *et al.*, 2020). Cependant, les missions prévues en 2020 ont dû être annulées à cause de la crise sanitaire et sont reportées en 2021.

### **1.2. Études des températures de l'air**

Outre les méthodes de mesure relatives aux températures de surface, d'autres méthodes de mesures visent plus spécifiquement l'ICU de la couche de canopée urbaine. Il s'agit en premier lieu des mesures *in situ* de la température de l'air à partir desquelles sont mises en évidence les ambiances thermiques en milieu urbain à la base du diagnostic de l'ICU.

#### *1.2.1. Réseau de mesure fixe*

Le réseau de stations météorologiques est la méthode la plus souvent utilisée (Renard *et al.*, 2019). Cette méthode permet d'observer le phénomène de l'ICU dans la durée en étudiant sa variation spatio-temporelle. En France ou ailleurs, de nombreux protocoles de recherches incluent des réseaux de mesures destinés à étudier ce phénomène (Dubreuil *et al.*, 2021). C'est dans ce contexte que le territoire de la métropole de Metz a été maillé durant l'été 2019 d'un réseau d'observation destiné à assurer un *monitoring* en continu de la température de l'air et de l'humidité relative pour mesurer l'ICU d'été.

Le Réseau de Mesures Thermo-Hygro-métriques de l'agglomération de Metz (REMTHAM ; Figure 1) est constitué de 21 stations météorologiques légères (abri et sondes connectées de type *HOBO*) (Hassani et Drogue, 2021). Ce réseau a été renforcé durant l'été 2020 par 5 points de mesures supplémentaires dont 4 sondes *HOBO* et une station météorologique complète *Vantage Pro 2 Plus*, auxquelles il faut ajouter deux stations gérées par Météo France et ATMO Grand Est.

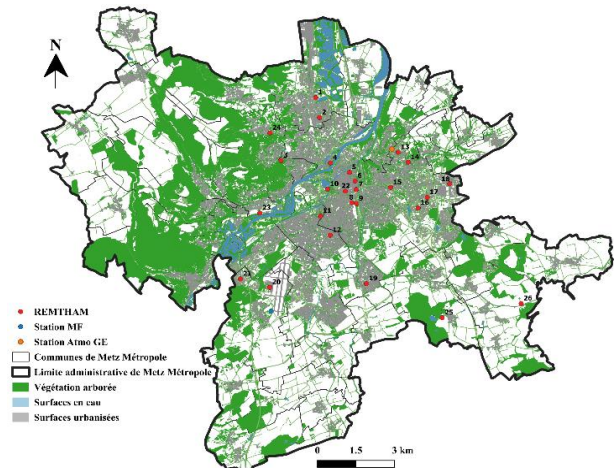


Figure 1 : Carte de répartition des stations météorologiques dans l'agglomération messine, en 2019 et 2020.

### 1.2.2. Mesures mobiles

Le recours à des mesures mobiles permet de pallier les « déserts » météorologiques et de mesurer, lors de journées très favorables, l'influence locale des parcs, des plans d'eau, des jardins et de la typologie des rues sur l'ICU, en suivant des itinéraires traversant la ville jusqu'à la périphérie.

Durant la vague de chaleur d'août 2020, plusieurs campagnes de mesure ont été menées au sein de la métropole de Metz en suivant différents transects urbains à l'aide d'un vélo équipé d'une mini-station météorologique de type *Kestrel 5500* et d'un GPS Garmin 600 destiné à tracer les mesures. Ces deux appareils sont fixés sur un mat à une hauteur de 1,70m au-dessus du sol, lui-même installé au niveau de la roue arrière du vélo. Ils ont été synchronisés afin d'effectuer une mesure toutes les 5 secondes.

Toutefois, les données météorologiques visées ne sont pas relevées de façon synchrone sur les différents points de mesure puisqu'un seul vélo équipé a été utilisé dans notre étude. Or, la température locale de l'air peut varier de quelques degrés entre le début et la fin du trajet dont la durée moyenne est d'environ 60 à 90 minutes, ce qui engendre une variabilité temporelle des températures qui ne peut pas être négligée. Pour pallier ce problème, une correction temporelle a alors été appliquée *a posteriori* en s'appuyant sur les données de référence collectées au début et à la fin des transects. L'objectif de cette manipulation est de traiter les données de chaque point comme si elles avaient été enregistrées au même moment, afin de pouvoir établir une comparaison entre elles (Hassani *et al.*, 2019).

Par ailleurs, le vélo roulait à des vitesses modérées (15-20 km/h) pour que les données enregistrées par la station météorologique soient représentatives de chaque point enregistré par le GPS. En revanche, la chaleur artificielle générée par le trafic routier peut avoir pour effet d'augmenter les températures relevées et ainsi fausser les résultats, particulièrement lorsque le vélo est à l'arrêt ou roule à une vitesse faible (Leconte, 2014). Afin de minimiser cet effet, les données microclimatiques enregistrées durant les moments où le vélo était à l'arrêt ou circulait à une vitesse trop faible n'ont pas été prises en compte.

## 3. Résultats et discussion

### 3.1. Thermographie de surface Landsat

La figure 3 illustre la variation spatiale de l'intensité des Ts diurnes à Metz Métropole, le 09/08/2020. Il en ressort un contraste thermique assez net entre les surfaces bâties et les sols



nus d'un côté, et les surfaces boisées et humides de l'autre. Les résultats montrent que la distribution des Ts est corrélée avec l'occupation du sol au sein de l'agglomération messine. Les taches rouges en périphérie de la zone urbaine correspondent à des zones d'activités où d'importants dégagements de chaleur sont constatés pendant la journée en raison de la présence de grandes surfaces artificielles (hangars métalliques, parkings, routes, etc.) à faible réflectivité solaire, faible inertie thermique et forte diffusivité thermique.

A *contrario*, les surfaces des zones boisées sont systématiquement plus fraîches que leur environnement. Les espaces abritant des masses d'eau importantes comme la vallée de la Moselle, la commune de Woippy et le sud-ouest de la métropole se signalent également par des Ts relativement basses.

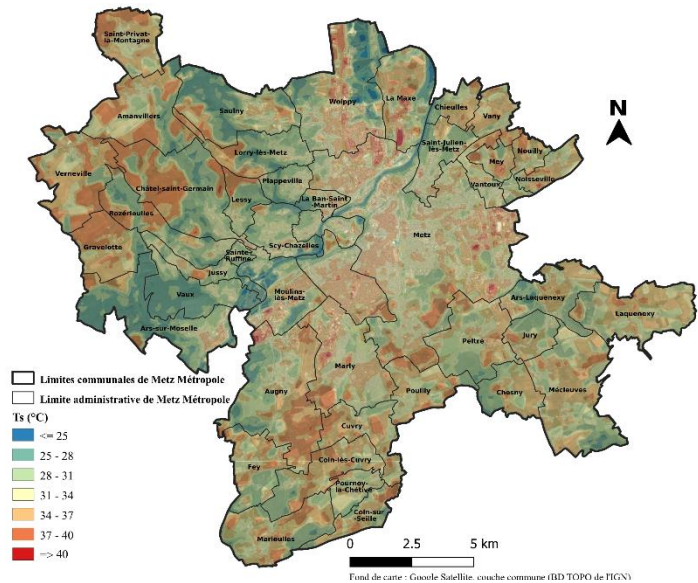


Figure 2 : Thermographie de surface Landsat de Metz Métropole (09/08/2020).

### 3.2. Variabilité spatiale de l'ICU à Metz Métropole durant l'été 2020

Les données de l'ICU relevées par le réseau REMTHAM durant l'été 2020 (7 juillet au 31 août) ont fait l'objet d'une modélisation statistique mettant en relation des descripteurs physiques de l'ICU avec celui-ci. Au nombre de cinq (fraction de surfaces bâties, fraction de surfaces imperméables, fraction de végétation haute et basse et fraction de surfaces en eau), ils ont été extraits de la BD TOPO 2016 (IGN) à l'aide d'outils d'analyse spatiale du logiciel ArcGis 10.1® selon plusieurs rayons autour de chaque station (200 m, 300 m, 400m, 500m et 900m) dans le but de définir statistiquement l'environnement des stations météorologiques (Foissard, 2015). Un modèle de régression locale de type *stepwise* produit avec le logiciel MATLAB a établi la meilleure relation entre le jeu de prédicteurs et les valeurs d'ICU moyen calculées comme la différence de la température relevée aux stations urbaines avec celle de la station de référence rurale de Mécleuves (écarts horaires des températures de l'air entre le coucher et le lever du soleil, soit 1014 données sur la période d'étude) :

$$\Delta T_{u-r} = T^{\circ}_{air \text{ station urbaine}} - T^{\circ}_{air \text{ Mécleuves}}$$

L'équation optimale obtenue a pour coefficient de détermination  $R^2=0,85$  et un RMSE de  $0,4^{\circ}\text{C}$ . Les prédicteurs les mieux corrélés avec l'ICU sont ceux extraits dans un rayon de 500m autour des stations ce qui peut s'interpréter comme la distance maximale de corrélation entre l'ICU calculé en un point de l'espace et les prédicteurs. Ces premiers résultats sont prometteurs mais comme au stade actuel de nos travaux les prédicteurs ne sont pas disponibles sur l'ensemble du territoire de la métropole de Metz une cartographie par krigeage ordinaire des valeurs d'ICU ( $\Delta T_{u-r}$  moyen) a été réalisée.

Les deux cartes résultantes (été 2020 vs. vague de chaleur du 7 au 13 août 2020) montrent une organisation spatiale de l'ICU remarquablement similaire entre les deux séquences (figure 4). Ces cartes mettent en évidence un îlot de chaleur intense dans le centre-ville de Metz relativement aux espaces suburbains et ruraux. Des petits îlots de chaleur apparaissent également dans les zones d'activités à l'est, au nord et au sud-ouest, tandis que des poches de fraîcheur se distinguent au niveau des espaces les plus végétalisés (communes de Lorry-lès

Metz, Le Ban-Saint-Martin, Chesny et Mécleuves). Cependant, pour certaines parties de l'agglomération (partie nord-est et sud), les valeurs interpolées ne reflètent pas l'intensité réelle de l'ICU à cause de la présence insuffisante de points de mesure. À terme, l'ICU sera spatialisé par régression locale, ce qui permettra une comparaison des champs de température.

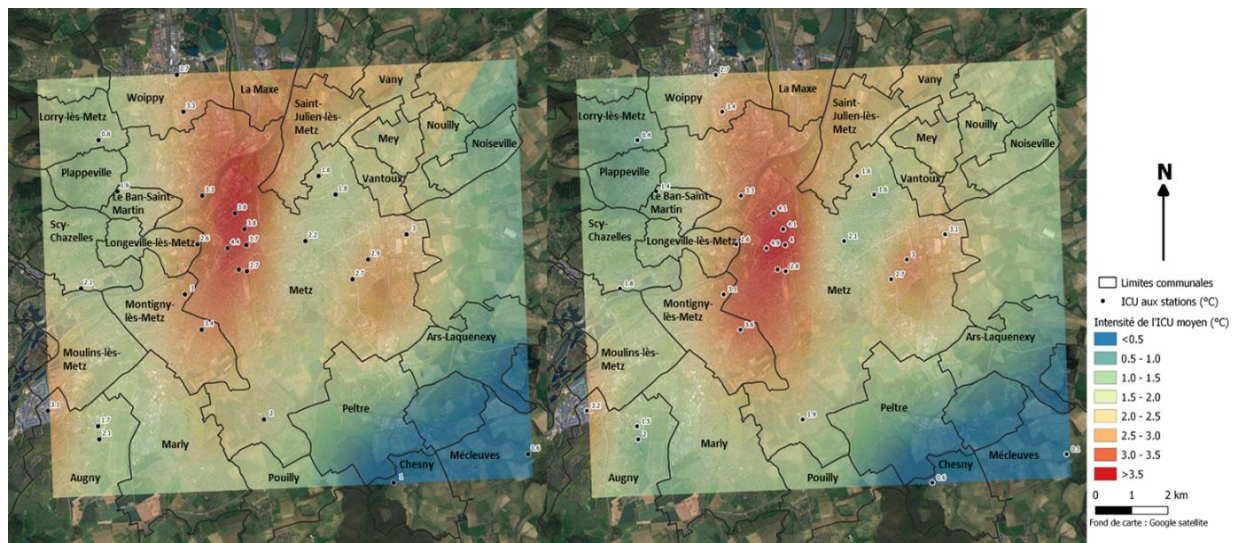


Figure 3 : Répartition des valeurs spatiales de la moyenne de l'ICU nocturne durant l'été 2020 (7 juillet - 31 août) à gauche et durant la période caniculaire 2020 (7 août - 13 août) à droite.

### 3.2. Résultats des mesures mobiles par transects

Les transects sont réalisés la nuit des 8, 10 et 11 août 2020, lors d'une vague de chaleur où les températures maximales enregistrées ont été supérieures à 36°C, pour des températures minimales supérieures à 20°C. Le type de temps est favorable à la mise en place d'un ICU intense : beau temps chaud et ensoleillé, vent faible sous conditions anticycloniques.

Les résultats des campagnes mobiles effectuées après le coucher de soleil (21h30) indiquent que les espaces les plus frais correspondent aux espaces ruraux et aux espaces urbains végétalisés (principalement le long du parcours C-D, incluant les rues arborées, parcs et jardins dont le jardin Jean Marie Pelt et ceux de Belletanche), tandis que les espaces les plus chauds coïncident avec les espaces urbains denses et les axes routiers importants. Ces résultats seront ultérieurement analysés de manière plus approfondie en s'appuyant sur les classes *Local Climate Zones* (Stewart et Oke, 2012).

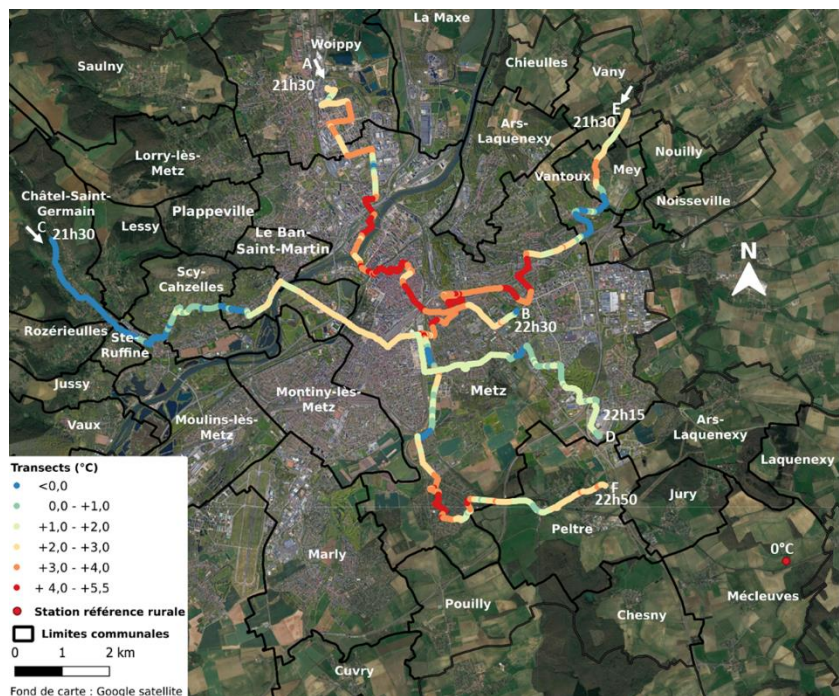


Figure 4 : Écart de température « instantanés » avec la station rurale de Mécleuves le long des transects urbains réalisés la nuit des 8 (A-B), 10 (C-D) et 11 (E-F) août 2020.

## Conclusion

Les travaux menés sur les températures de l'agglomération messine enregistrées pendant la saison chaude de l'année 2020 font ressortir des contrastes thermiques importants entre le tissu urbain du centre-ville, les espaces périurbains moins denses et les espaces végétalisés. Ce sont les caractéristiques physiques des surfaces (pouvoir réfléchissant, diffusivité thermique et capacité à stocker la chaleur), tout autant que le degré de densité du bâti, qui expliquent la configuration spatiale des champs thermiques. De manière générale, leur structure dépend aussi bien de la situation au sein de l'aire urbaine et de l'éloignement vis-à-vis du centre-ville, que du type d'aménagement de chaque quartier, s'exprimant par une morphologie urbaine spécifique et la présence ou non de surfaces végétales.

Au-delà des données mesurées, nos travaux mettent en évidence l'avantage de s'appuyer sur une pluralité de méthodes de mesure et d'outils de diagnostic dans le but d'obtenir une compréhension à la fois globale et précise du climat urbain et des facteurs influençant l'organisation spatiale des températures urbaines. Ces approches de par leur caractère multi-scalaire et multi-temporel, présentent une grande complémentarité entre elles (étude diachronique de l'évolution des températures de surface, monitoring des températures de l'air, étude de l'ICU à l'échelle de l'aire urbaine, du quartier ou de la rue).

## Bibliographie

- Cantat O., 2014 : L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps, *Norois*, 191 | 2004/2.
- Drogue G., Hassani N., Manceau L., Paruke L., 2020 : Acquisition d'images thermiques infrarouges par drone pour la caractérisation de l'ICU de surface à échelle fine : étude pilote dans une ZAE du territoire de Metz Métropole (le plateau de Frescaty). Actes du XXXIIIème Colloque de l'AIC, Rennes, France, 235-240.
- Dubreuil V., Foissard X., Nabucet J., Thomas A., Quénoil H., 2020 : Fréquence et intensité des îlots de chaleur à rennes : bilan de 16 années d'observations (2004-2019). *Climatologie*, 17, 6.
- Foissard X., 2015 : L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise. Thèse de doctorat de géographie de l'Université Rennes 2.
- Hassani N., Sghir S., Lebaut S., Drogue G., 2019 : Campagne de mesures mobiles pour caractériser l'ICU d'été de la ville de Casablanca (Maroc) : premiers résultats. Acte du Colloque Les ressources naturelles au Maroc : politiques de gestion et enjeux de développement, Casablanca, Maroc.
- Hassani N., Drogue G., 2020 : Mesure et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain dans l'aire urbaine de Metz Métropole : premiers résultats de la campagne de mesure 2019. *Climatologie*, 17, 8.
- Leconte F., 2014 : Caractérisation des îlots de chaleur urbains par zonage climatique et mesures mobiles : Cas de Nancy. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, Nancy, France, 274 p.
- Oke T., 1987 : *Boundary Layer Climate*. Routledge, seconde édition.
- Renard F., Alonso L., 2019 : Complémentarité de différentes sources d'acquisition de la température en milieu urbain : cartes mentales, mesures participatives et données satellites. Actes du XXXIIème Colloque de l'AIC, Thessaloniki, Grèce, 427-432.
- Richard Y., Pohl B., Pergaud J., Zito S., Rega M., Thévenin T., Emery J., Vairet T., Dudek J., Thévenin D., CodetHache O., Dodet M-F., 2017 : Évaluation des effets thermiques des leviers d'action visant à réduire l'îlot de chaleur urbain : l'exemple de Dijon. Actes du XXXème Colloque de l'AIC, Sfax, Tunisie, 213-217.
- Sobrino J. A., Jiménez-Muñoz J. C., Paolini L. 2004 : Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434-440.
- Stewart I., Oke T., 2012 : Local Climate Zones for urban temperature studies. *Bulletin of American Meteorology Society*, 93:1879-1900.
- Wicki A., Parlow E., 2017 : Multiple Regression Analysis for Unmixing of Surface Temperature Data in an Urban Environment. *Remote Sensing*, 9 (7): 684.

# JOINT STUDY OF SPATIAL VARIABILITY OF TEMPERATURES AND WIND MACHINE PERFORMANCE IN THE QUINCY VINEYARD TO IMPROVE FIGHT AGAINST SPRING FROST EVENTS

Le cap C. (1,2,3), Carlier J. (2), Quenol H. (3), Heitz D. (2), et Buisson E. (1)

(1) *Weather Measures*, 22 Allée Alan Turing, F-63000 Clermont-Ferrand, France

(2) INRAE, UR OPAALE, 17 Avenue de Cucillé, F-35044, Rennes, France

(3) CNRS, UMR 6554 LETG, Université Rennes 2, Place du Recteur Henri Le Moal, F-35043, Rennes, France

clara.le-cap@inrae.fr – johan.carlier@inrae.fr – herve.quenol@univ-rennes2.fr – dominique.heitz@inrae.fr – emmanuel.buisson@weather-measures.com

**Résumé :** Les gelées printanières survenant après le débourrement des bourgeons sont particulièrement dévastatrices et conduisent pour les vignerons à une perte économique importante. Les tours antigel sont un des moyens existants permettant de lutter contre ces gelées. Cependant, l'efficacité d'un parc de tours dépend de leur positionnement, déterminé par les performances de la tour et de la variabilité spatiale de la température durant ces événements gélifs. L'objectif de cette étude est de caractériser les performances des tours antigel et la variabilité de la température, permettant ainsi de proposer une méthodologie pour un positionnement a priori des tours antigel dans le vignoble de Quincy. Afin de faire face à cet enjeu, la CUMA du vignoble de Quincy s'est associée avec différents partenaires afin de former le projet SICTAG (« Système Innovant d'aide à la décision Connecté et gestion efficiente en temps réel des Tours Antigel du Centre-Val de Loire »).

**Mots-clés:** gel ; tour antigel ; vignoble de Quincy ; variabilité spatiale de la température

**Abstract:** Spring frosts occurring after budburst constitute a significant risk for winegrowers and can lead to severe yield losses. Wind machines can contribute to protecting vineyards against these frost events. However, the efficiency of wind machine parks depends on the locations of wind machines concerning their performance and spatial variability of temperature during these frost events. This study aims to characterize wind machine performance and spatial variability of temperature, and propose a methodology for an a priori positioning wind machines on the vineyard of Quincy. To face this stake, the CUMA of Quincy vineyard came up with several partners in the SICTAG project ("Innovant System of Connected decision support and efficient real-time management of wind machine of the Centre Val de Loire").

**Keywords:** frost; wind machine; vineyard of Quincy; temperatures spatial variability

## Introduction

Frosts can be distinguished as advective frost, which appears at any time of the day and is characterized by strong cold winds. On the other hand, radiative frost is described by clear skies and weak or no wind, leading the radiation of the soil to vanish into the sky at night time. Consequently, this radiative loss produces a thermal inversion meaning the highest altitudes get the highest temperatures. Although no adequate solution exists to fight the advective frost, many solutions appeared to fight radiative frost occurrences. Some are passive solutions like soil management while others are active solutions like wind machines (WM) on which this paper focuses (Kalma et al., 1992).

A wind machine is commonly composed of a 10m-mast and a 2-blade-hub blowing fan at its peak. The wind machine turns on itself for 4-5min. The use of the wind machine is conditioned by the state of the atmosphere (Kalma et al., 1992; Snyder and Melo-Abreu, 2005). Indeed, it is remarkably efficient with a thermal inversion of about 1.5°C and 2°C between 1.5m and 15m high (Kalma et al., 1992) and for a weak wind. The blowing fan sweeps the crop by blending quickly warm air above with the cold air (of few degrees below 0) near the ground. Hence the thermal stratification is suppressed. The air temperature is slightly positive and homogeneous and the frost injury is momentarily avoided. Multiple wind machines can also work together to fight the frost by covering a more expanded area and using a synergy effect to enhance efficiency (Snyder and Melo-Abreu, 2005). Some previous studies showed the positive effect of wind machine use in an orchard by leading field measurements and also tries characterizing the airflow pattern. While there is no need to start wind machines long in advance to observe a benefit (Ribeiro et al., 2006), the thermal effect can be felt until an average of 100m also depending on the natural drift (Beyá-Marshall et al., 2019; Ribeiro et al., 2006). Indeed, the natural drift tends to extend the range of the current in the wind direction and shorten it

perpendicularly and oppositely (Beyá-Marshall et al., 2019; Ribeiro et al., 2006). Both studies noted the capacity of wind machines to increase the temperature in height and distance and observed slight differences in the magnitude of this gain depending on the inversion strength (Beyá-Marshall et al., 2019; Ribeiro et al., 2006). The utility of wind machines is then conditioned by a climatological assessment where minimum temperature and inversion strength are cornerstones (Doesken and McKee, 1988). At the vineyard scale, one can observe a spatial variability of the temperature, depending on the meteorological situation and the topography of the crop, thus influencing the efficiency of wind machines. In the Quincy vineyard, nearly 60 wind machines are disseminated offering protection against spring frost for 85% of the crop. However, their efficiency is acceptable but not noteworthy enough. Hence wine-growers gathered different kinds of partners such as industrials, and scientific researchers in the SICTAG<sup>14</sup> project to investigate how the wind machine warms the crops and the most efficient way to use it.

The present study aims to describe the temperature spatial variability during radiative frost across the Quincy vineyard and to characterize the wind machine temperature effect and jet stream through field measurements analysis. It is a preliminary part of the wind machine location improvement across the Quincy vineyard. In section 2 we present an overview of the site and methods. The results are shown and analyzed in section 3. Finally, we draw some conclusions and perspectives in section 4.

## **Site and Methods**

The study was conducted in the Quincy vineyard located in the Centre Loire region, in the middle of France covering a delimited zone of 700Ha. The soil type is sandy, gravelly soil settled in old alluvial earthworks, perched on riparian limestone hillsides. Vine stocks are planted with a spacing of 1m to 1.15m between plants and 1.5m between rows. The vineyard of Quincy is relatively flat. Indeed, its slope varies between 0° and 6° with a majority of values between 0° and 3°.

### **Spatial variability of temperature**

Each plot of the vineyard includes a temperature sensor from the “Weenat” company. The number of sensors is 38 and are spread in the whole vineyard to measure hourly temperature day after day. The entirety of the sensors is in use since December 2019. The locations of these sensors are shown below in figure 1, represented by red dots.

The study focuses on three different scales, as it is tried to establish a connection between them. Different kinds of data are available at several scales:

- Synoptic data corresponds to meteorologic data at a large scale such as low-pressure and high-pressure areas. Also, meteorologic regional variables are considered.
- Topographic data described by Digital Elevation Model (DEM) contains geographic data like elevation, slope, or exposure. DEM used in this study is 5m accurate.
- Lastly, micro-scale data represent the temperature across the vineyard of Quincy. By retrieving the hourly temperatures of the Weenat remote sensors, the daily minimum temperature can be extracted, which is defined as the minimum temperature measurement between 6 pm the day before and 6 pm the same day. The dry temperature is considered in this study due to the lack of trust in the wet temperature.

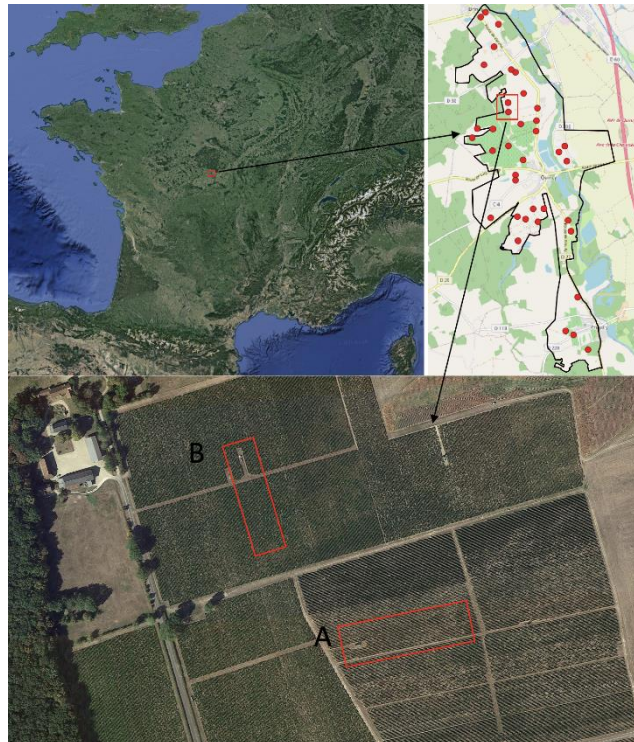
---

<sup>14</sup>Innovant System of Connected decision support and efficient real-time management of wind machine of the Centre Val de Loire

At different scales, Hierarchical Clustering (HC) is used to group individuals according to observed variables (temperatures, topographic data, meteorologic data) to visualize similar days and plots (Bonnefoy, 2013; Madelin et al., 2005).

### Wind machine performance

The field measurements were conducted on two different wind machines, in a flat zone of the vineyard where the slope is quasi-inexistent. The first experiment conducted onsite A (called experiment A) in figure 1 used a Mecagri wind machine. The double-blade span is 5.4m meters moving at 590rpm and the mast is 10.5 meters high. The hub is tilted with an angle of approximately  $7^\circ$  to the ground. The wind machine turns on itself for 4min30s. The second experiment (experiment B) was conducted on site B using an Orchard Rite wind machine providing a double-bladed fan of 6.04m diameter with a mast of 10.7m high and the same rotation specifications as the Mecagri wind machine. For both experiments, the air temperature was measured using T-type thermocouples. Wind speed and direction were measured using sonic anemometers (LCJ, Vertou, France). Data were collected using two CR310 data loggers for experiment A and one CR1000X data logger for experiment B (Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA). The measuring frequency was 2Hz during experiment A and 4Hz during experiment B.



**Figure 1 : Location of the Quincy vineyard in France. The border of the vineyard is delimited by black lines. Weenattemperature sensors are represented by red dots. Finally, field experiments were conducted in one single plot, at two different locations and using two different wind machines.**

## Results

### *Spatial variability of temperatures*

During March and April 2020, the vineyard faced several frost events. The statistical study focuses on this period, divided into three distinct cycles: from 24/03 to 29/03 First frost event; from 29/03 to 31/03 No frost; from 31/03 to 05/04 2nd frost event. In Table 1, groups are presented following their meteorological characteristics. Besides, average tendencies of anticyclones (H) and depressions (L) positions are detailed. With this quick analysis, we can

conclude what type of frost one could face depending on anticyclones and depressions positions and on the meteorological variables observed by regional captors.

	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4
Group's characteristics	Clear sky, low humidity, weak wind, high pressure	Cloudy sky, very low humidity, strong wind, low pressure	Cloudy sky, very low wind, high humidity, low pressures	Cloudy sky, very strong wind, very high humidity, very high pressure
Type of frost	Radiative frost	Advection frost	Weak radiative frost	No frost
Mean minimal temperature	-1.86°C	-1.56°C	-0.86°C	3.36°C
Position of H and L	H in Eastern Europe. L in Scandinavia	Depression near France	Mishmash	H in the North. L in Eastern Europe

**Table 5 Characteristics of meteorological situations observed on each group of the classification**

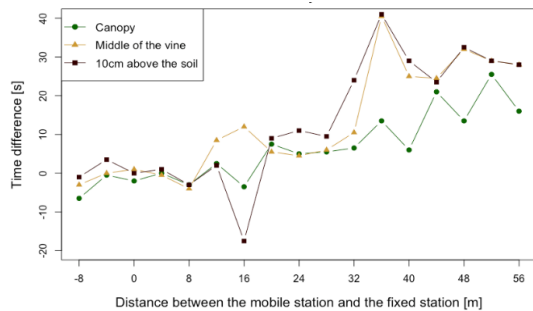
Through those results, it has been observed that different kinds of frost occurred in the vineyard during the studied period. However, wind machines are only efficient in fighting radiative frost. Hence, a clustering method following the minimum temperatures was applied on days from the previously established radiative frost cluster. Moreover, several classifications were applied to topographic data. Matching classes from minimal temperatures and topographic parameters clusters enabled determining prevailing topographic parameters in the spatial variability of temperatures. It appears that topographic parameters governing temperature variability are mainly altitude and slope. Indeed, during radiative frost, high altitudes lead to high temperatures (83,33% of the highest minimum temperature class from the temperature cluster are part of the low altitude class from the topographic cluster). In contrast, low altitudes provide low temperatures (50% of the lowest minimum temperature class). This statement is in line with the fact that radiative frost occurs mainly at low altitudes because of a catabatic effect leading the cold to flow down the slope of the fields. Besides, high rates of slope do not enhance any extreme behavior of the temperature. Indeed, the lowest slope class leads to the highest and lowest temperatures observed (60% for low temperatures and 66,67% percent for high temperatures) due to a catabatic effect coercing the air to flow by the highest slopes. Hence, neither high nor low temperatures are ever measured on such plots. Therefore, while the slope has a role to play, altitude remains the primary topographic parameter to take into account to explain temperature spreading.

### **Wind machine performance**

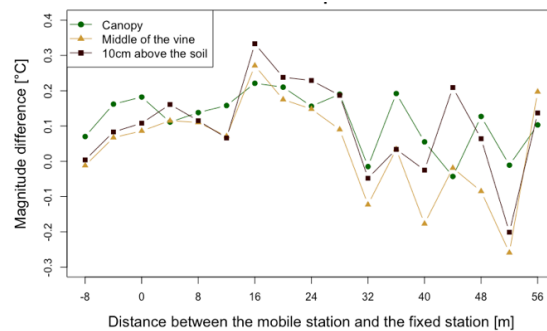
By leading some field measurements, it has been possible to verify the benefit of wind machines on crops. Field measurements were carried out during winter 2020. Even if experiments were not conducted at night time during a frost occurrence, some wind machine effects had been caught.

The first experiment (experiment A) allows characterizing the impact of a WM on its environment by evaluating the covered area and the level of intensity. Two masts (1.5m high) were placed in front of the Mecagri WM. One stayed at 40m, the other one was mobile and

moved every 4m at each revolution of the WM, covering distances from 12m to 96m from the WM. For each mast, the air temperature was measured at 0.1m, 0.5m, and 1.5m high, while wind speed and direction were measured at 1.5m high.



**Figure 2 : Evolution of the time difference between the mobile and fixed stations for the 3 maximum temperatures measured, according to the relative position of the mobile and fixed station (fixed station at 40m from the WM)**



**Figure 3 : Evolution of the magnitude difference between the mobile and fixed stations for the 3 maximum temperatures measured, according to the relative position of the mobile and fixed station (fixed station at 40m from the WM)**

Figure 2 shows that the longer the distance was from the WM, the longer the delay was to measure a temperature spike and catch the flow of the wind machine. This result suggests a spiral shape of the jet due to the rotation of the WM. In figure 3, one can see that the first half portion of the line increases while the second part decreases. It seems that until 24m backward the fixed station, the heat gain was slightly higher, whereas from 24m to 56m backward, the wind machine effect decreased. One can assume that the wind machine did not deserve the plots equally.

The second experiment (experiment B) was conducted when temperatures did not drop below 4°C. It was similar to the previous one, aiming to characterize the impact of a wind machine on its environment but on higher altitudes. A 10m high mast was moved in front of the Orchard Rite WM, measuring wind and temperatures at 100, 80, 60, and 30m from it. The air temperature was measured at 0.1m, 0.5m, 1.5m, 2m, 3.40m, 4.90m, 6.30m, 7.70m, 9.10m, 9.85m, 10.5m high. Wind speed and direction were measured at 2m, 5m, 7m, and 10m high. This experiment allowed figuring out that the mixing of air is strongly dependent on the height in the mixing layer and the distance from the wind machine, thus, chaining to a difference in the heat provided. Indeed, the stream did not reach or roughly a 100m distance, questioning the real reach of the stream depending on the climatic situation. Thus, in the following, results focus on the vertical wind profile of the wind machine stream for distances up to 80m.

Figure 4 shows that the maximum speeds were reached by the highest anemometers near the wind machine, whereas far from the WM it tended to the contrary. It indicates that the shape of the stream was complex. The tilt angle of the blades must have influenced the shape and range of the stream, influencing the effect of the wind machine depending on the distance. Figure 5 shows that in the WM vicinity, the airflow was not homogeneous regarding the altitude, with a velocity difference of 3 m/s, the highest heights catching the maximum values. In contrast, far from the WM, the four anemometers on the mast nearly similar values with a velocity difference of less than 1m/s. These preliminary results provide a first view of a WM spatial impact.



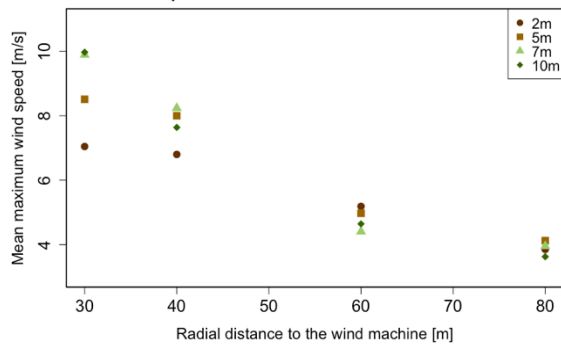


Figure 4 :: Mean maximum wind speed following the radial distance for a WM revolution period.

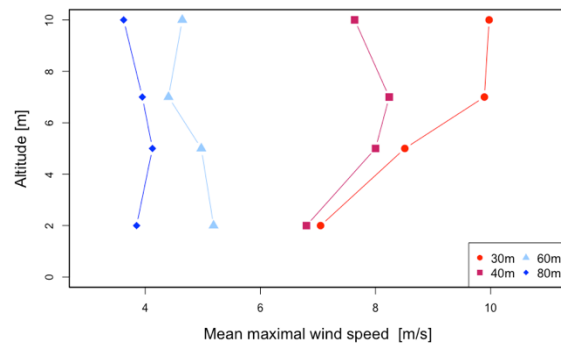


Figure 5 :: Vertical profile of the mean maximum wind speed

## Discussion and Conclusion

This paper aimed to characterize the spatial variability of temperatures during radiative frost across the Quincy vineyard and to analyze field measurements to characterize the wind machine on its temperature effect and its jet stream through high-frequency measurements. The temperature variability is highly correlated with altitude and slope, highlighting colder plots than the average where wind machine use should be considered with great attention. The wind machine provided a thermal gain even if not use in optimal thermal stratification conditions. Further investigations shall be conducted regarding whether or not burner use during wind machine operation provides extra efficiency. Besides, newly acquired data during last frost occurrences shall strengthen the behavior of temperature variability respecting the climatologic situation and topographic parameters.

## References

- Beyá-Marshall, V., Herrera, J., Santibáñez, F., Fichet, T., 2019. Microclimate modification under the effect of stationary and portable wind machines. *Agric. For. Meteorol.* **269–270**, 351–363
- Bonnefoy, C., 2013: *Observation et modélisation spatiale de la température dans les terroirs viticoles du Val de Loire dans le contexte du changement climatique*, Université Rennes 2, 305p.
- Doesken, N.J., McKee, T.B., 1988. A climatological assessment of the utility of wind machine for freeze protection in mountain valleys. *J. Appl. Meteorol.* **28**, 194-205
- Kalma, J.D., Laughlin, G.P., Caprio, J.M., Hamer, P.J.C., 1992. *The Bioclimatology of Frost: Its Occurrence, Impact and Protection*, *Advances in Bioclimatology*. G. Stanhill, 139p.
- Madelin, M., 2005: *L' aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne. Modélisation spatiale à une échelle fine des écoulements de l' air et des températures minimales*, Université Paris-Diderot - Paris VII, 307p.
- Ribeiro, A.C., De Melo-Abreu, J.P., Snyder, R.L., 2006: Apple orchard frost protection with wind machine operation. *Agric. For. Meteorol.* **141**, 71–81
- Snyder, R.L., Melo-Abreu, J.P. de, 2005: *Frost protection: fundamentals, practice and economics*, *Environment and natural resources series*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 240.

# CARACTERISATION DE LA SECHERESSES METEOROLOGIQUE - CAS DU BASSIN DE LA MOYENNE MOULOUYA

Lghabi Nezha, Lamaamri Mohamed, Ghazi Abdelkhalek et El Mamri Halima

*Laboratoire : Territoire, environnement et développement, Département de Géographie,*

*Univ. Ibn Tofail, F.L.S. H., Kénitra -Maroc.*

*Adresse : Fès, Maroc- Email : nouzalgh@gmail.com, lamaamri.mohamed@gmail.com, Aghhazi@hotmail.com, halimaelmamri@gmail.com*

## **résumé**

*Le bassin de la Moyenne Moulouya, objet de cette étude, située au Nord-Est du Maroc, est un écosystème fragilisé par les épisodes de sécheresses consécutives depuis les années 70.*

*Ce travail porte sur l'étude de la sécheresse météorologique de 1980 à 2017. Les séries pluviométriques de cette période ont été jugées continues par les tests d'homogénéisation. Les classes de sécheresse ont été évaluées, pour des intervalles de temps de 9, 6 et 3 mois selon l'indice de précipitation standardisée de Mckee (SPI). Les résultats montrent que les sécheresses sévères qui ont touché la région sont survenues entre 1980 et 1993.*

**Mots clés :** *sécheresse, indice standardisé des précipitations (SPI), Moyenne Moulouya.*

## **Introduction**

A travers le globe, les changements climatiques et leurs répercussions, sur l'environnement naturel et socioéconomiques, sont désormais une priorité des scientifiques, chercheurs et décideurs politiques.

La sècheresse, sa fréquence et son intensité sont directement liés à ces changements climatiques. Il s'agit de l'un des phénomènes extrêmes les plus complexes, les plus nocifs et les moins compris, ayant des impacts néfastes énormes allant de la pénurie d'eau au pertes économiques et par conséquent la modification des conditions de vie des populations touchées.

Etant un pays méditerranéen, le Maroc fait partie des payse menacés par les changements climatiques en général et la sécheresse en particulier. En effet, le Maroc connaît une diminution des précipitations quasi-générale sur l'ensemble du territoire marocain ainsi qu'un réchauffement significatif.

Sous climat aride à semi-aride, le bassin de la Moyenne Moulouya fait partie des zones marocaines les plus vulnérables à la sécheresse. En effet, la situation pluviométrique a été caractérisée par un déficit généralisé ayant intéressé l'ensemble du bassin. Ce dernier n'a jamais fait l'objet d'une étude approfondie. Dans ce travail on se propose de faire une étude visant à détailler la dynamique de la sécheresse.

En effet, la sécheresse est un phénomène qui a des impacts néfastes sur l'environnement naturel et socio-économique, ce qui nécessite une analyse de sa dynamique, son intensité, son extension et sa durée (Santos et al, 2011 ; Oliveira-Júnior et al, 2012). L'évaluation et le suivi des effets de la sécheresse sont donc d'une importance cruciale (Thenkabail et al, 2004), et constituent la base de planification de la gestion des ressources en eau en général et de la gestion de la sècheresse en particulier.

Par conséquent, cette étude s'est fixée les objectifs suivants :1) Analyser la dynamique spatio-temporelle des sécheresses météorologiques saisonnières dans la zone d'étude a l'aide de l'indice ; SPI 2) Evaluer les classes de sécheresse pour des intervalles de temps de 9, 6 et 3 mois selon l'indice de précipitation standardisée de Mckee (Mckee et al,1993) (SPI).

## **1. Matériels et méthodes**

### **Zone d'étude**

La présente étude porte sur le bassin de la Moyenne Moulouya, situé au Centre Est du Maroc (fig.1) entre les latitudes 32°50'/33°50' Nord et la longitude 4° Ouest. Il occupe une superficie

de 14355 km<sup>2</sup>, avec une altitude variant de 534 m à 3321 m (Jbel Bounacer). Cette zone est limitée par les Hauts Plateaux à l'Est, le Moyen Atlas plissé à l'Ouest, le Haut Atlas au Sud, et le seuil de Bouyacoubat au Nord.

Elle est caractérisée par un climat aride à semi-aride a été très chaud et hiver froid et sec avec des précipitations faibles et irrégulières, qui ne dépassent guère les 200 mm par an. Les températures sont élevées en été et basse en hiver, avec un écart thermique supérieure à 20 °C. Le mois le plus froid est janvier, avec la température la plus basse d'environ -9.6 °C, enregistrée à la station d'Outat El Haj, tandis que le mois le plus chaud est juillet, avec un maximum de 45 °C enregistré à la même station.

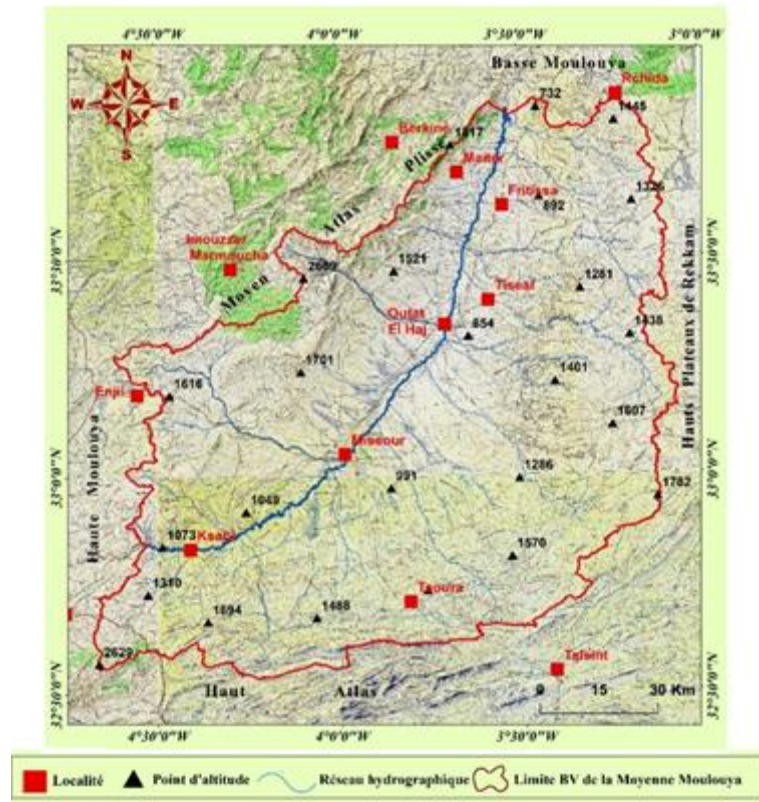


Figure 42: Situation géographique du bassin versant de la Moyenne Moulouya

#### Source des données et prétraitement

Afin d'atteindre l'objectif général de ce travail, on s'est appuyées sur les données pluviométriques relevées au niveau de trois stations météorologiques représentatives du bassin d'étude (Missour (amont du bassin), Outat El Haj (Centre du bassin) et Tendit (Aval du bassin)). Ces données nous ont été transmises par l'Agence du bassin Hydraulique de la Moulouya, il s'agit de données fiables, sans lacune et qui s'étalent sur une longue période de 37 ans (1981-2017).

L'ensemble de données sur les précipitations ont fait l'objet d'un test d'homogénéisation à l'aide du logiciel *Chronostate* (Lubès-Niel, 1998) qui effectue les tests de normalité, les tests de variabilité (Lubès-Niel, 1994) et les tests de rupture (test Buishand (Buishand, 1984).

#### Indice de sécheresse : Indice de précipitation standardisé (SPI)

Le SPI est l'indice de sécheresse le plus utilisé, d'abord en raison de ses bonnes caractéristiques d'identification et de prédiction des transitions de classe de sécheresse (Moreira et al, 2008 ;

Paulo et Pereira, 2008 ; Tabari et al, 2012) puis en raison de son adaptabilité à différentes échelles de temps et conditions climatiques.

L'indice de précipitation standardisé (SPI) a été développé par McKee (McKee et al, 1993, 1995) pour quantifier le déficit de précipitations pour plusieurs pas de temps (1, 3, 6, 12, 24, 36, 48 mois).

Il permet de surveiller les approvisionnements en eau à court terme, qui sont importants pour la production agricole, et les ressources en eau à long terme, telles que l'approvisionnement en eau souterraine, le débit de vapeur et les niveaux des réservoirs.

Le SPI est calculé par la formule suivante :  $SPI = (p_i - p_m) / \sigma$

Où  $P_i$  : Précipitation de l'année  $i$  ;  $P_m$  : Précipitation moyenne ;  $\sigma$  : Déviation standard ou écart type.

Dans ce travail nous avons procédé au calcul du SPI à l'aide du logiciel RStudio, et ce, pour différentes échelles de temps : 3 mois (printemps, hiver et automne), 6 mois (semestre hivernal) et 9 mois (période agricole).

### *Analyse de la fréquence de la sécheresse*

En vue de caractériser le niveau de sévérité des sécheresses vécues dans la région, nous nous sommes appuyés sur les classes de sévérité de la sécheresse SPI représentées dans le tableau suivant :

Classes	Seuil selon SPI
Extrêmement humide	Plus de 2,0
Très humide	1,5 à 1,99
Modérément humide	1,0 à 1,49
Proche de la normale	-0,99 à 0,99
Modérément sèche	-1,0 à -1,49
Sévèrement sèche	-1,5 à -1,99
Extrêmement sèche	Moins de -2,0

**Tableau 10 : classes de sévérité de la sécheresse de l'indice SPI**

## **3. Résultats**

### **2.1. Fréquence de la sécheresse de la période agricole**

La sécheresse de la période agricole s'étale sur neuf mois de septembre au mois de mai, couvrant ainsi trois saisons successives (automne, hiver et printemps).

Les résultats de SPI montrent que la région est passée par de longues périodes de sécheresse qui allait jusqu'à 10ans, comme c'était le cas pour la station de Tendit (1983 à 1993). Après 2010, les sécheresses de la période agricole étaient moins longues (1ans pour la station de Tendit et 4ans pour la station de Missouri), la région a donc connu une alternance entre les années humides et les années sèches durant cette période. La fréquence de la sécheresse de la période agricole est de 20 fois pour la station de Missouri, dix-sept fois pour la station de Tendit et d'Outat El Haj.

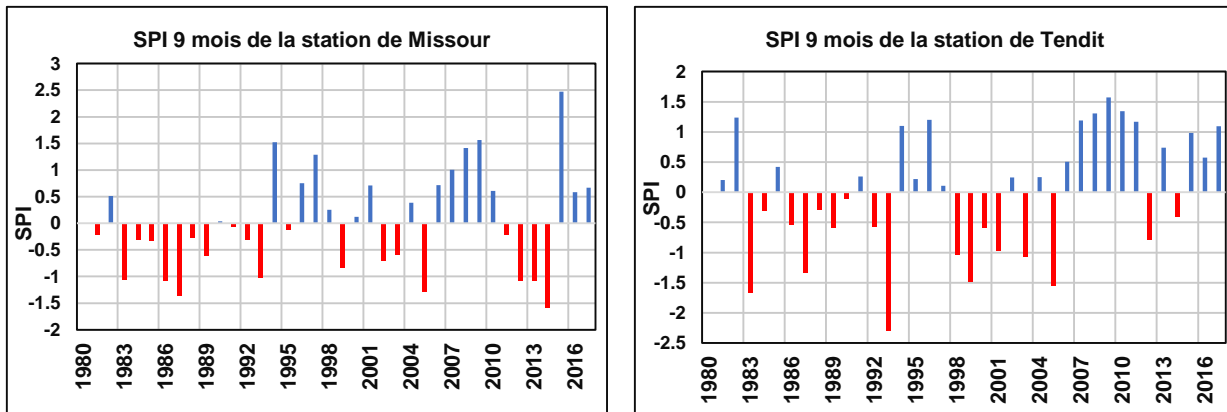


Figure 43: Evolution de l'SPI agricole (1980-2017) au niveau des stations Missour et Tendit

## 2.2. La Sécheresse semestrielle d'hiver

Le semestre hivernal s'étale sur six mois de septembre au mois de février et concerne les deux saisons consécutives d'automne et d'hiver. D'après les résultats obtenus, la sécheresse du semestre hivernal concerne vingt semestres de la station de Tendit, dix-neuf semestres de la station de Missour et dix-huit semestres de la station d'Outat El Haj.

Ces périodes de sécheresses ont été consécutives de vingt-cinq ans (1981-2005) pour les trois stations étudiées, sauf les années 1994 (les 3 stations), 2001 (Tendit et Outat El Haj) et 2002 (Outat El Haj) qui étaient fortement excédentaires. La période humide au niveau des deux stations de Missour et Outat El Haj s'étalait sur quatre ans (2006-2010), et sur dix ans pour la station de Tendit (2007-2017) en exception de l'année 2012 qui était particulièrement déficitaire.

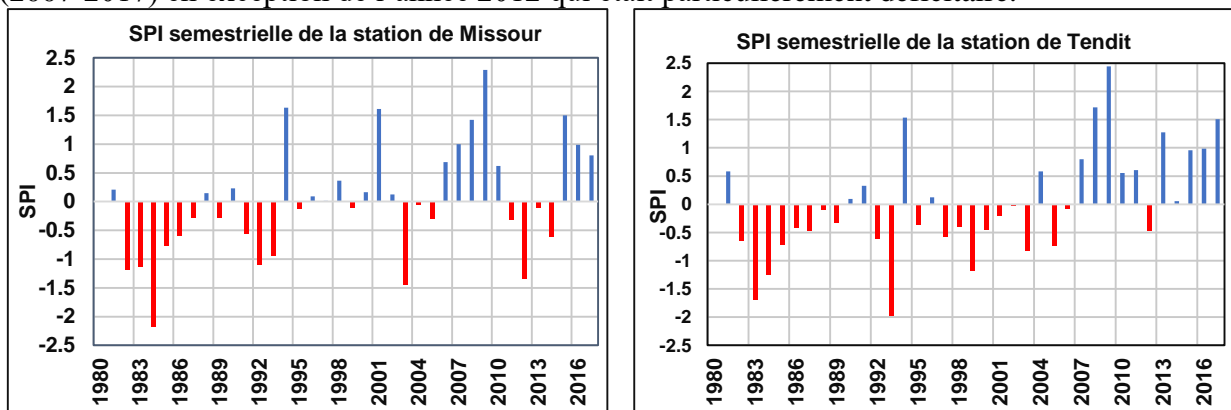


Figure 44: Evolution du SPI semestrielle (hiver) au niveau des stations de Missour et de Tendit au cours de la période (1980-2017)

## 2.3. La Sécheresse saisonnière d'hiver

L'analyse des résultats du SPI de l'hiver montre, que la sécheresse de la saison d'hiver est survenue 18 fois à Missour et à Outat El Haj, et 19 fois à la station de Tendit.

La sécheresse hivernale a eu une apparition consécutive durant dix ans (1983-1993) et cinq ans (2010-2016) au niveau de la station de Missour, durant cinq ans (1990-1995) et quatre ans (2010-2013) pour la station d'Outat El Haj, et durant neuf ans (1998 -2005) et quatre ans (2011-2014) pour la station de Tendit.

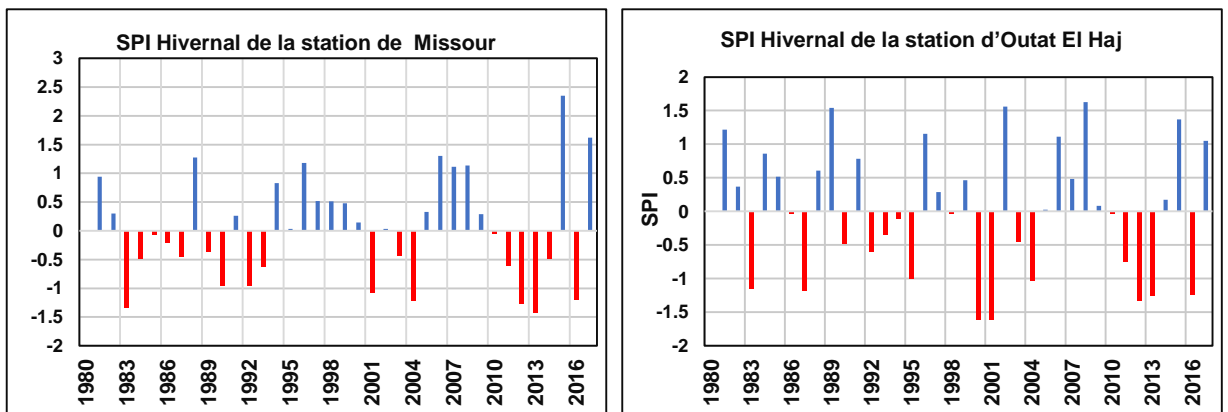


Figure 45: Evolution du SPI saisonnier d'hiver au niveau des stations de Missour et d'Outat El Haj au cours de la période (1980-2017)

#### 2.4. La Sécheresse saisonnière d'automne

Pour la fréquence, les résultats de calcul du SPI montrent que la sécheresse saisonnière de l'automne est survenue vingt fois à Outat El Haj et Missour et dix-huit fois à Tendit. Ces sécheresses ont été consécutives durant huit ans (1980-1987) et quatre ans (1995-1998) à Outat el Haj, durant huit ans (1981-1998) et cinq ans (1992-1998) à Tendit et durant sept ans (1980-1987) et trois ans (1990-1992) à Missour.

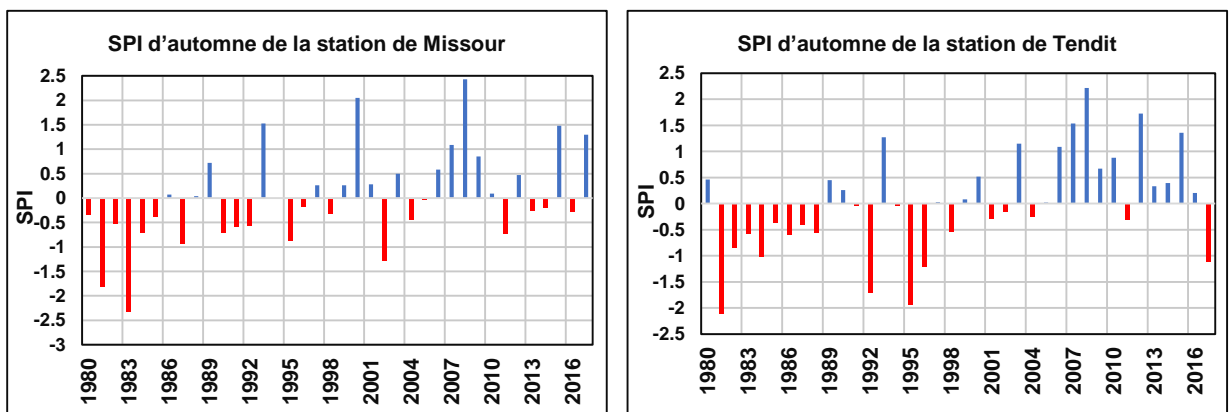


Figure 46 : Evolution du SPI saisonnier d'automne au niveau des stations de Missour et de Tendit au cours de la période (1980-2017)

#### 2.5. La Sécheresse saisonnière du printemps

Le calcul du SPI trois mois du printemps (mars à mai) a montré que la fréquence de la sécheresse du printemps a eu lieu quinze fois à Missour, vingt et un fois à Tendit et dix-neuf fois à Outat El Haj. Ces sécheresses ont eu une apparition consécutive durant quatre ans (1986-1989 ; 1999-2002) à Missour, durant huit ans (1986-1993), cinq ans (1998-2005) et trois ans (2012-2014) à Tendit et durant neuf ans (1986-1994) excepté 1990, quatre ans (1998 -2001) et trois ans (2012-2014) à Outat El Haj.

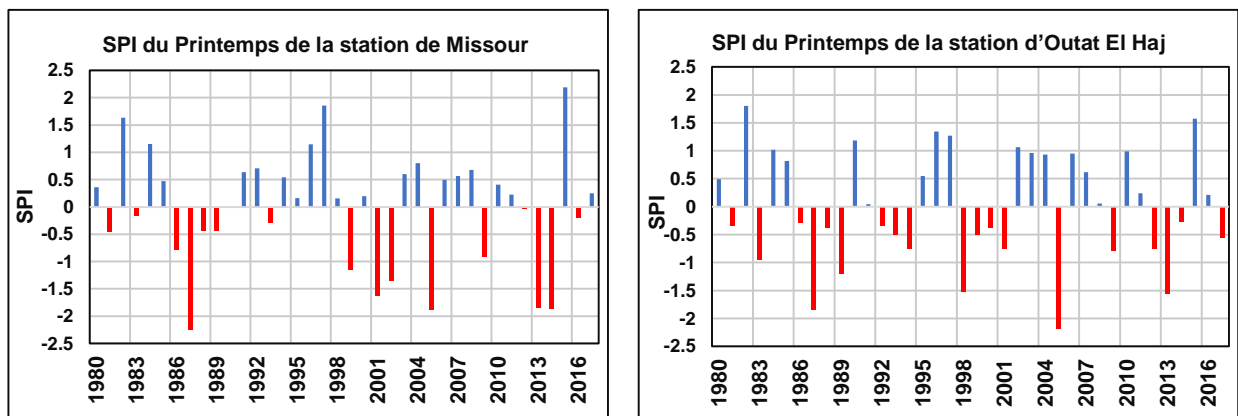


Figure 47 : Evolution du SPI saisonnière du printemps au niveau des stations de Missour et d'Outat El Haj au cours de la période (1980-2017)

## 2.6. SEVERITE DE LA SECHERESSE

Le tableau ci-après montre la sévérité des sécheresses étudiées durant la période (1980-2017) :

Tableau 11: Récapitulatif de la sévérité de la sècheresse de la saison de printemps (S : sèche, N : normale, H : humide)

Station	SPI 9			SPI 6			SPI 3 Hiver			SPI 3 Automne			SPI 3 Printemps		
	S	N	H	S	N	H	S	N	H	S	N	H	S	N	H
Missour	40,53	43,24	16,21	40,54	40,54	18,92	40,54	40,54	18,92	39,47	44,73	15,78	31,57	55,26	13,15
Outat El haj	37,83	45,94	16,21	37,84	40,54	21,61	37,84	40,54	21,61	34,21	55,26	10,52	44,73	36,84	18,42
Tendit	40,54	35,13	24,42	37,84	45,94	16,22	37,84	45,94	16,22	36,85	44,73	18,42	31,57	52,63	15,78

## 3. DISCUSSION

Chaque type de sécheresses étudiées joue un rôle très important au niveau de la région d'étude. En effet, les périodes de sécheresse agricole prolongées ont eu un impact négatif sur la productivité des sols de la région ainsi que sur les réserves en eau. Cette situation a conduit à l'exode rurale et à la sédentarisation des nomades en périphérie des communes faute de non disponibilité de couverture végétale au niveau des parcours.

Les sécheresses semestrielles hivernales survenaient durant la période s'étalant entre le semis et l'épiaison des espèces automnales, affectant ainsi la production des cultures Bour et les parcours steppiques, en plus des ressources en eau.

Les Sècheresses saisonnières d'automne et d'hiver entravent respectivement la germination des graines et le développement des plantules particulièrement des herbacées qui vont constituer une offre fourragère supplémentaire pour le cheptel dans les zones de parcours. La sécheresse du printemps favorise la sénescence rapide des herbacées avant même d'atteindre la fin du stade de maturation. Ces conditions freinent, au bout du compte, la multiplication végétale et la production des graines qui devaient normalement assurer le stock dans le sol pour les prochaines saisons humides.

## 4. Conclusion

Au terme de ce travail, nous retenons que le bassin de la Moyenne Moulouya a été affecté par plusieurs années consécutives de sècheresse durant la période 1980-2017, ce qui suggère la présence de l'impact des changements climatiques au niveau de cette zone. Les résultats de calcul de l'SPI sur différentes échelles de temps ont permis de distinguer les années de sécheresse et les années

humides au niveau des stations météorologiques de la zone d'étude ainsi que leur fréquence qui diffère selon l'échelle de temps (sécheresse agricole, sécheresse semestrielle et sécheresse saisonnière)

## 5. Reference

- Oliveira-Júnior, J.F., Lyra, G.B., Gois, G., Brito, T.T., Moura, N.S., 2012 : Análise de homogeneidade de séries pluviométricas para determinação do índice de seca IPP no estado de Alagoas, *Flor, Amb.* 19, 101–112.
- Santos, J.F., Portela, M.M., 2011 : Regional frequency analysis of droughts in Portugal, *Water Resour, Manag*, 3537–3558.
- Thenkabail, P.S., Gamage, N., Smakhtin, V.U., 2004 : The Use of Remote Sensing Data for Drought Assessment and Monitoring in Southwest Asia.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993 : The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eighth Conf, Appl, Climatol.* 1, 17–22.
- Lubès-Niel H., Masson J.M., Servat E., Paturol J.E., Kouame B., Boyer J.F., 1994 : Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques, étude bibliographique, *ICCARE Rapport*, 3, ORSTOM, Montpellier
- Buishand T.A. (1984), *Journal of Hydrology* 58 51–69.
- Moreira, E.E., Coelho, C.A., Paulo, A.A., Pereira, L.S., Mexia, J.T., 2008 : SPI-based drought category prediction using log-linear models, *J. Hydrol*, 354 (1–4), 116–130.
- Paulo, A.A., Pereira, L.S., 2008 : Stochastic prediction of drought class transitions, *Water Resour. Manage*, 22, 1277–1296
- Tabari, H., Abghari, H., Hosseinzadeh Talaei, P., 2012 : Temporal trends and spatial characteristics of drought and rainfall in arid and semiarid regions of Iran. *Hydrol, Process*, 26, 3351–3361
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1995 : Drought monitoring with multiple time scales, *In: 9th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Boston*, pp. 233–236



# L'INTÉGRATION DES ENJEUX D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES PROCESSUS DE PLANIFICATION ET D'AMÉNAGEMENT TERRITORIALE AU NIVEAU DE LA VILLE DE CASABLANCA (MAROC)

Lotfi N.<sup>(1)</sup>, Bouaichea<sup>(1)</sup>, Chair M.<sup>(1)</sup> et Karrouk M-S.<sup>(1)</sup>

*(1) Laboratoire des Changements Environnementaux et Aménagements Territoriales (LCEAT), FLSH Ben M'Sick, Université Hassan II-Casablanca, Maroc, nidal.lotfi86@gmail.com & ClimDev.Maroc@gmail.com*

**Résumé :** Afin de contribuer aux efforts globaux de lutte contre les effets du changement climatique, le Maroc a adopté une nouvelle politique locale basée sur des outils de prévention, d'adaptabilité et de résilience dans le but d'assurer une gestion efficace et durable de son territoire et réduire ses émissions de Gaz à Effet de Serre. Il existe plusieurs attitudes possibles pour faire face aux impacts du changement climatique. Cela est lié principalement aux vulnérabilités spécifiques à chaque territoire et à sa capacité d'adaptation. Ainsi, plusieurs typologies d'actions d'adaptation sont définies en fonction du degré de spontanéité et du type d'acteurs impliqués. L'objectif principal de ce projet sera d'approfondir les modalités d'intégration des enjeux d'adaptation au changement climatique dans les processus de planification et d'aménagement territorial au niveau de la ville de Casablanca, il s'agit plus précisément de comprendre : Comment la dimension changement climatique est prise en compte dans le processus d'aménagement et de planification ? Comment le territoire Casablancais se saisit-il d'un enjeu global pour le traduire au travers de politiques publiques grâce aux outils de planification ? Quelles seront les conséquences de l'intégration de l'adaptation au CC sur les façons de faire et de penser l'aménagement du territoire ? Les résultats obtenus révèlent qu'il conviendrait de repenser la façon d'élaborer les documents de planification stratégique afin que l'accumulation des mesures d'adaptation au changement climatique puisse trouver une application plus concrète.

**Mots clés :** Changement Climatique Adaptation, Planification, Aménagement territoriale, Casablanca, Maroc

**Summary :** In order to contribute to the global efforts to fight against the effects of climate change, Morocco has adopted a new local policy based on tools of prevention, adaptability and resilience in order to ensure effective and sustainable management of its territory and reduce its greenhouse gas emissions. There are several possible attitudes to deal with the impacts of climate change. This is mainly linked to the specific vulnerabilities of each territory and its adaptive capacity. Thus, several typologies of adaptation actions are defined according to the degree of spontaneity and the type of actors involved. The main objective of this project will be to deepen the methods of integrating the challenges of adaptation to climate change into the planning and territorial development processes in Casablanca city, more precisely, it is about understanding: How is the climate change dimension taken into account in the development and planning process? How does the territory of Casablanca take up a global issue to translate it through public policies thanks to planning tools? What will be the consequences of the integration of adaptation to CC on the ways of doing and thinking about planning of the territory? The results obtained show that the way in which strategic planning documents are drawn up should be rethought so that the accumulation of adaptation measures to climate change can find a more concrete application.

**Key words:** Climate Change Adaptation, Planning, Territorial development, Casablanca, Morocco

## Introduction

Aujourd'hui, le changement climatique représente un défi majeur auquel est confrontée l'humanité. En effet, les effets destructeurs du CC et les coûts connexes qui impactent le développement d'un pays ne seront pas empêchés en se basant simplement sur quelques mesures d'atténuation des GES. La gestion des risques de catastrophes et l'adaptation au CC peuvent atténuer l'exposition et la vulnérabilité aux phénomènes météorologiques et climatiques, et donc réduire la probabilité d'une catastrophe, tout en renforçant la résilience face aux risques qu'ils sont impossibles d'éliminer. (GIEC, 2012).

La Région de Casablanca a subi les conséquences du CC, elle a toujours été confrontée à de multiples risques naturels. Les mutations qu'elle connaît actuellement (urbanisation, littoralisation, concentration des activités et de la population) amplifient sa vulnérabilité à ces risques et aggravent leurs impacts. La conception d'une nouvelle stratégie de planification plausible et opérationnelle pour faire face aux effets du CC doit être une priorité pour les gestionnaires du territoire Casablancais afin de renforcer sa résilience (Hountondji et al, 2011).

L'objectif principal de ce projet sera d'approfondir les modalités d'intégration des enjeux d'adaptation au changement climatique dans les processus de planification et d'aménagement territorial au niveau de la ville de Casablanca, il s'agit plus précisément de comprendre :

- Comment la dimension changement climatique est prise en compte dans le processus d'aménagement et de planification ?
- Comment le territoire Casablancais se saisit d'un enjeu global pour le traduire au travers de politiques publiques grâce aux outils de planification ?
- Quelles seront les conséquences de l'intégration de l'adaptation au CC sur les façons de faire et de penser l'aménagement du territoire ?

## 1. Données et méthodes employée

### 1.1. Présentation de la zone d'étude

Casablanca est la capitale économique du Maroc. Elle est située sur la côte atlantique, au nord-ouest de l'Afrique. 33° 57' latitude Nord et 7° 67' longitude Ouest. Son littoral s'étend sur plus de 50km. Le secteur d'étude est limité au Nord, par l'océan atlantique, à l'Est, par les plateaux de Benslimane et au Sud et à l'Ouest, par les riches et fertiles plaines de la Chaouia. (fig.1). la ville de Casablanca est soumise à un climat semi-aride (supérieur à hiver chaud selon Sebbar et al, 2012), caractérisé par un été chaud sec et un hiver frais très humide. Les précipitations sont irrégulières dans l'espace et dans le temps, elles varient entre 100 et 443mm/an. Les températures moyennes annuelles varient entre 10 et 28°C.

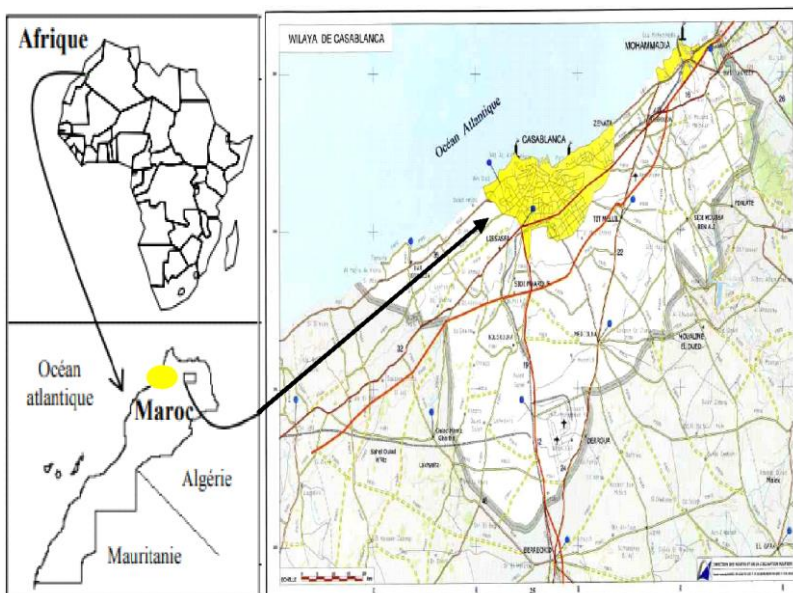


Figure 1. La situation géographique de la zone d'étude (Casablanca)

### 1.2. Source des données

La base de données utilisée dans ce présent travail provient des services d'Inspection régionale de Casablanca, Ministère de l'Aménagement du territoire national, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la politique de la ville. Et de la Direction Générale de la Météorologie (DGM). Elle se compose des données annuelles des températures maximales et minimales moyennes, et des cumuls pluviométriques pour l'étude des changements climatiques. Notre étude est fondée sur une analyse des cartes topographiques de la ville de Casablanca et des documents d'aménagements. Ces données sont disponibles sur plusieurs établissements.

### 1.3. Méthodologie de l'étude

La méthodologie adoptée, dans la présente étude, est pour l'objectif d'approfondir les modalités d'intégration des enjeux d'adaptation au changement climatique dans les processus de planification et d'aménagement territorial au niveau de la ville de Casablanca. Les approches proposées sont subdivisées en deux catégories :

- Premier approche concernant le rôle de la planification urbaine au niveau de la ville de Casablanca ;
- Deuxième approche liée à l'intégration de l'adaptation aux CC dans les politiques, les programmes et les travaux pertinents, nouveaux ou en cours, en particulier les processus et les stratégies de planification du développement, renforce la résilience du territoire face aux catastrophes naturelles ;

## 2. Résultats et discussion

### 2.1. L'adaptation et l'atténuation des effets du changement climatique selon GIEC

Contrairement à la prise de conscience du réchauffement climatique, la nécessité de s'adapter n'a été mise en exergue que bien des années plus tard. Effectivement, le GIEC a proposé en 2001 dans son troisième rapport une définition de l'adaptation : « L'adaptation aux changements climatiques indique l'ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des simulations climatiques présents ou futurs ou à leurs effets, afin d'atténuer les effets néfastes ou d'exploiter les opportunités bénéfiques (Fig. 2).

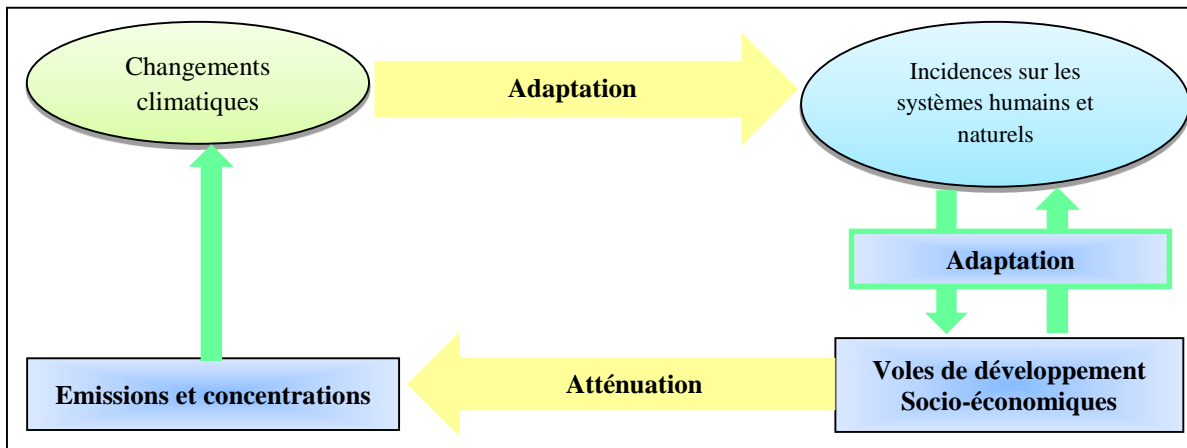


Figure 2. La place de l'adaptation et de l'atténuation dans les causes et les effets du CC (source : GIEC, 2007)

La lutte contre le changement climatique nécessite donc ces deux politiques. Cependant, dans cet article on ne va pas s'attarder sur la politique d'atténuation même si l'union de ces deux politiques entraîne des problématiques qui peuvent être différentes telles que l'échelle, la temporalité ou les acteurs impliqués. (Poulain, 2011). En effet, le contexte ne facilite pas les choses. Les acteurs territoriaux doivent faire face à une problématique globale à un niveau local dont les résultats ne seront pas visibles à court terme. De plus, des incertitudes subsistent sur l'ampleur du CC et les faibles retours de projets d'adaptation ne permettent pas d'intervenir en s'appuyant sur une expérience passée. (Poulain, 2011).

### 2.2. Coordination institutionnelle : Etude gestion intégrée du littorale

L'adaptation aux effets du CC constitue au Maroc l'espace d'intervention de plusieurs entités administratives. Sa gouvernance implique donc une multitude de départements ministériels et d'établissements publics, dont les compétences s'enchevêtrent et génèrent souvent des conflits d'intérêts, voire des gestions antagonistes.

À l'échelle nationale, la coordination interministérielle se met en place mais elle reste faible et concerne, au mieux, certains secteurs tels que l'environnement, l'eau, l'agriculture et l'aménagement du territoire. De nombreux documents de planification stratégique existent mais à ce jour, il n'existe pas de réelle politique nationale de lutte contre les effets du CC.

La gouvernance de la problématique du climat continue donc de se caractériser par la multiplicité des acteurs institutionnels. Généralement, la concertation entre les acteurs institutionnels fait défaut, ce qui ne permet pas de coordonner et de faire converger les différents politiques et programmes publics relatifs à la lutte contre les effets du CC. Les responsables des services déconcentrés de l'Etat mettent très souvent en avant cette verticalité dans la gestion des espaces déplorant que le CC continue à être traité de manière sectorielle par les différents départements ministériels en fonction d'intérêts et d'objectifs propres.

La situation est comparable au niveau local. De nombreux intervenants agissent de près ou de loin dans cette question mais avec peu ou pas de coordination entre eux. Les collectivités locales ne mettent pas les problèmes liés au climat ou à l'adaptation au premier rang de leurs préoccupations. Lorsqu'elles sont sensibilisées à l'importance de ces problèmes, elles n'ont ni les moyens financiers ni les outils nécessaires pour gérer et préserver efficacement les milieux naturels, les êtres humains ou les infrastructures contre les effets du CC.

### **2.3. *Rôle de la Planification urbaine à la ville de Casablanca***

Le Schéma Directeur d'Aménagement Urbain (SDAU) et les Plans d'Aménagement (PA) de la ville de Casablanca sont en effet des documents de planification de long terme (25 et 10 ans respectivement) et la plupart d'entre eux ont été développés en l'absence de cartographie délimitant précisément la population vulnérable ou les zones à risques liés au CC. (Direction de l'Urbanisme).

A ce niveau se manifeste le rôle des agences urbaines et des collectivités territoriales qui occupent une place centrale dans les politiques de planification urbaine et celles liées au CC, elles doivent non seulement se préparer pour intervenir lors de catastrophes, mais aussi agir en amont pour réduire les vulnérabilités existantes, les expositions survenues, et renforcer l'attractivité et la résilience de leur territoire. Ainsi que le conseil régional de la région Casablanca-Settat, qui est devenu de plus en plus impliqué dans la construction et la gestion du développement local à l'orée de la nouvelle loi organique 111-14. Il s'est dotée, à cet effet, d'un Plan de développement régional (PDR), mais qui ne prend pas suffisamment en compte la dimension CC. Pourtant, s'adapter à ses effets est aujourd'hui essentiel à la construction de tout développement. Il s'avère par conséquent indispensable pour la capitale économique du royaume d'évaluer de façon systématique les risques environnementaux et climatiques ainsi que leur degré de vulnérabilité afin de penser aux solutions visant l'intégration des mesures palliatives appropriées – en termes d'adaptation et d'atténuation – dans les plans de développement et dans le Schéma Régional d'Aménagement du Territoire (SRAT) qui est en cours d'élaboration .

Dans ce sens, le processus d'intégration des effets du CC dans les documents de planification doit proposer une nouvelle approche mettant l'accent sur l'adaptation, l'implication des acteurs locaux en particulier les collectivités territoriales et la connaissance. La prise en compte de l'impact du CC et des activités humaines sur l'amplification des phénomènes extrêmes et des coûts croissants de la protection conduisent à l'adoption d'une approche adaptative plus souple dans laquelle il s'agit d'intervenir non plus « après » mais « avant » la catastrophe (Fig. 3). Le but est d'introduire une réflexion sur la réorganisation des espaces et fixer comme objectif le long terme, de relocaliser les activités et les biens vulnérables ou la population soumis à des risques. Le processus d'intégration ne sera mis en place qu'avec une forte volonté d'accompagner les territoires dans leur recomposition spatiale, en développant les outils nécessaires, en renforçant la connaissance et en facilitant l'information et la mobilisation tous.

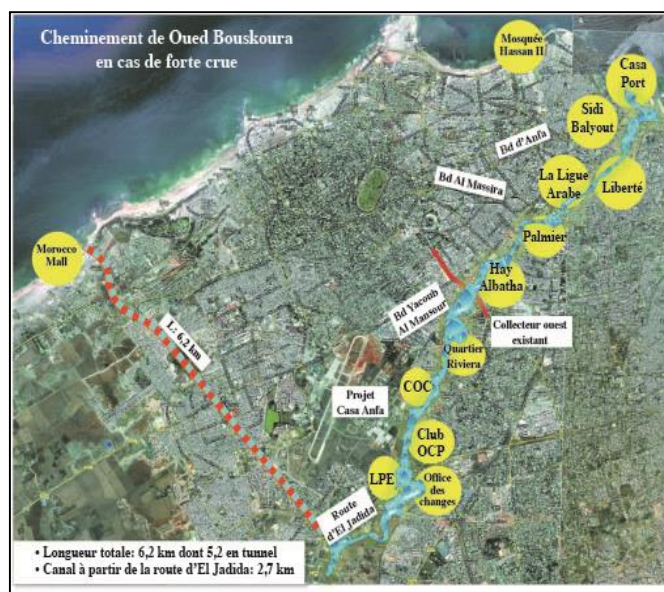


Figure 3. Cheminement d'Oued Bouskoura en cas de forte crue au niveau de Casablanca

#### 2.4. Une démarche d'adaptation efficiente

En effet, l'intégration de l'adaptation aux CC dans les politiques, les programmes et les travaux pertinents, nouveaux ou en cours, en particulier les processus et les stratégies de planification du développement, renforce la résilience du territoire face aux catastrophes naturelles. Il est devenu indispensable d'intégrer l'adaptation plutôt que de mettre en œuvre des mesures autonomes si nous voulons remédier de façon systématique et sur le long terme aux vulnérabilités dans différents domaines. Nous devons alors tendre vers une culture qui anticipe les risques naturels provoqués par les CC.

Il existe plusieurs attitudes possibles pour faire face aux impacts du changement climatique, Cela est lié principalement aux vulnérabilités spécifiques à chaque territoire et à sa capacité d'adaptation. Ainsi, plusieurs typologies d'actions d'adaptation sont définies en fonction du degré de spontanéité et du type d'acteurs impliqués.

A titre d'exemple on peut utiliser le CLIMATE PROOFING qui représente un Outil opérationnel pour la prise en compte du CC dans la planification stratégique. Les connaissances traditionnelles et les savoirs locaux sont indispensables pour élaborer une stratégie d'adaptation optimale, car :

- les évolutions et les effets concrets du CC ne peuvent être observés que sur place,
- les populations ressentent les changements et connaissent souvent des stratégies d'adaptation traditionnelles,
- ils aident à comprendre l'interaction entre le CC et les processus de développement, et à identifier les forces disponibles sur lesquelles pourra se fonder l'adaptation.

Les savoirs traditionnels du groupe cible interviennent surtout lorsque le CC aggrave des problèmes connus (p. ex. pénuries d'eau). Ils ont moins d'impact lorsque les gens sont confrontés à des phénomènes nouveaux qu'ils ne savent pas encore gérer (p. ex. sécheresses

dans les zones tropicales et subtropicales). Il revient en outre aux scientifiques et aux institutions publiques d'intégrer les expériences, les potentiels et les besoins d'adaptation locaux dans un cadre plus général, de faire des prévisions sur l'évolution du climat et de proposer des stratégies d'adaptation nouvelles et plus complètes.

Selon C Bollin ,2011 le Climate Proofing se compose de trois étapes, que tous les processus de planification doivent traverser et qui se résument de la manière suivante :

1. Évaluation des risques : des informations sur les incidences du CC, sur les groupes de populations concernés, leurs facteurs de sensibilité et les pertes et dommages potentiels, doivent être collectées et évaluées.
2. Possibilités d'action : les possibilités de prévenir les risques (adaptation) doivent être identifiées et discutées.
3. Priorisation : les possibilités d'action doivent être étudiées à l'aide de critères prédéfinis, les conséquences pour la conception du projet doivent en être tirées.

**Tableau 1. Idée sur les étapes du climat proofing ; données :(C Bollin ,2011)**

<b>1<sup>ère</sup> Etape : Evaluation des risques</b>	1- Identifier les effets du CC	A : Aléas élévation du niveau de la mer B : chances pluies abondantes dans les régions sèches
	2- Identifier des groupes de population et les biens concernés, tels l'infrastructure, l'agriculture	
	3- Identifier les raisons de la sensibilité de ces groupes et de ces biens p.ex. pauvreté constructions précaires manque d'information sur le climat	
<b>2<sup>ème</sup> Etape : Possibilités</b>	1- Identification des possibilités d'action pour	A. L'adaptation : P.ex. alerte précoce ; protection des ressources, utilisation de cultures résistantes à la sécheresse, consolidation des pentes.
		B : contribution à l'atténuation p.ex. préservation des puits de CO2 grâce à la gestion des aires protégées
<b>3<sup>ème</sup> Etape : Priorisation</b>	1- Evaluation des possibilités d'action selon : efficacité, faisabilité, durabilité, rentabilité, ect .et priorisation	
	2- Intégration dans la planification du projet p.ex. indicateurs	

## Conclusion

Les résultats obtenus révèlent qu'il conviendrait de repenser la façon d'élaborer les documents de planification stratégique afin que l'accumulation des mesures d'adaptation au changement climatique puisse trouver une application plus concrète. L'une des principales attentes est donc la définition opérationnelle des modalités de coordination des politiques publiques sur les espaces littoraux et des outils institutionnels d'arbitrage entre les différents objectifs de protection de ces espaces et de développement économique et social.

## Bibliographie

- C Bollin, « CLIMATE PROOFING » Outil pour la prise en compte du changement climatique et de ses incidences sur les projets et les programmes de la Welthungerhilfe avril 2011 ;
- GIEC 2012 : Rapport spécial sur la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique (SREX). *Résumé à l'intention des décideurs. Rapport des Groupes de travail I et II* du GIEC, 2012 ;
- Hountondji Y.C., DeLongueville F., Ozer P., 2011: Trends in extreme rainfall events in Benin (west Africa), 1960-2000. *Proceedings of the first international conference on energy, environment and climate change* 26-27 august 2011, Ho Chi Minh City, Vietnam. <http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/96112>.
- Pouland A., 2011 : L'intégration des enjeux d'adaptation au changement climatique dans les exercices de prospective territoriale. Ecole d'ingénieur polytechnique de l'université de Tours département Aménagement. Rapport sur le changement climatique et la gestion des risques pour la Conférence des Nations Unies sur le logement et le développement urbain durable (Habitat III) New York, May 2015.

# COMPORTEMENT THERMIQUE ET MICROCLIMATIQUE DE L'ARROSAGE D'UN REVÊTEMENT INNOVANT

Parison Sophie<sup>1</sup>, Chanial Maïlys<sup>\*1,2</sup>, Hendel Martin<sup>1,3</sup>, Royon Laurent<sup>1</sup>

\*auteur correspondant : mailys.chanial@gmail.com

(1) Université de Paris, LIED, UMR 8236, CNRS, F-75013, Paris, France

(2) Mairie de Paris, Direction de la Propreté et de l'Eau & de la Voirie et des Déplacements, Paris, France,

(3) Université Gustave Eiffel, ESIEE Paris, département SEN, F-93162, Noisy-le-Grand, France

**Résumé :** Suite à la canicule de 2003 et dans le contexte du changement climatique, la Ville de Paris a pris conscience de la nécessité de mettre en place des stratégies de rafraîchissement urbain. Plusieurs expérimentations ont été menées dont certains portants sur l'emploi de l'arrosage urbain. Le projet LIFE « Cool & Low Noise Asphalt » vise à tester l'efficacité de cette méthode sur des revêtements innovants afin de réduire le stress thermique des piétons. Par arrosage, des réductions statistiquement significatives de 0,8°C au maximum et de 0,4°C en moyenne sont observées pour la température de l'air. Cet impact s'élève à -1,9°C au maximum et à -0,4°C en moyenne pour la température équivalente-UTCI à 1,5 m de hauteur.

**Mots-clés:** îlot de chaleur urbain, revêtement frais, rafraîchissement évaporatif, comportement thermique de revêtements

**Abstract:** In the wake of the European heat-wave of 2003, along with the context of climate change, awareness rose within the City of Paris regarding urban cooling. Since then, several experiments have been carried out including pavement-watering. In this regard, the LIFE project "Cool & Low Noise Asphalt" tests the effect of watering innovative pavements as means to reducing pedestrians heat stress. Statistically significant air temperature reductions up to 0.8°C and 0.4°C on average are observed, in addition to reductions up to 1.9°C and 0.4°C on average for UTCI-equivalent temperature.

**Keywords:** urban heat island, cool pavement, evaporative cooling, pavement thermal behavior

## Introduction

Une des conséquences du changement climatique est l'augmentation de la fréquence, de la durée et de l'intensité des canicules à l'horizon 2050 (Lemonsuet *al.*, 2013). Pour limiter la chaleur en ville, différentes solutions sont étudiées, telles que la végétalisation ou l'emploi de matériaux urbains dits « frais » (Santamouris, 2013).

Dans ce contexte, la Ville de Paris s'intéresse notamment à l'arrosage des surfaces urbaines à l'eau non potable pour rafraîchir l'espace public. Des campagnes expérimentales réalisées dans la rue du Louvre (Paris, 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> arrondissements) ont montré que cette méthode permettait de réduire de 2° à 3°C environ la température ressentie par un piéton (Parison *et al.*, 2020 ; Hendelet *al.*, 2016). Depuis 2017, la Ville de Paris pilote un projet du programme LIFE de la Commission européenne intitulé « Cool & Low Noise Asphalt ». Un des objectifs de ce projet est l'étude des performances thermiques de trois revêtements de voirie innovants censés améliorer les effets de l'arrosage urbain en limitant le ruissellement d'eau dans le caniveau grâce à une macrostructure poreuse favorisant la rétention d'eau.

L'objet de cette étude est de caractériser les impacts rafraîchissants microclimatiques et thermiques de la méthode. Pour ce faire, des mesures récoltées par des stations météorologiques déployées sur site sont analysées de façon statistique afin d'isoler l'impact microclimatique (Parison *et al.*, 2020). Nous présenterons ici les résultats obtenus pour l'un des trois sites retenus pour le projet, la rue Lecourbe (Paris 15<sup>ème</sup> arrondissement), lors des étés 2019 et 2020.

## 1. Matériels et méthodes

### 1.1. Instrumentation et protocole d'arrosage

La zone d'étude considérée ici est située dans la rue Lecourbe dans le 15<sup>ème</sup> arrondissement de Paris, d'orientation E-NE – O-SO. Le site est subdivisé en 3 portions. La portion dite « innovante » est constituée d'un revêtement en asphalte présentant une faible porosité de surface par rapport à un revêtement dit traditionnel, grâce à la présence de billes de pouzzolane favorisant la rétention d'eau. La portion « traditionnelle » est dotée d'un revêtement asphalte

classique qui a été remis à neuf au démarrage du projet. La portion « témoin » conserve le revêtement d'origine qui n'a subi aucune modification au cours du projet. Chacune d'entre elles fait 200 m de longueur et environ 20 m de largeur.

Chaque portion est équipée d'une station météo qui mesure les paramètres nécessaires pour évaluer le stress thermique des piétons par l'UTCI (Błazejczyk *et al.*, 2013). Un thermo-fluxmètre est installé dans la chaussée à 5 cm de profondeur pour mesurer la température et le flux de chaleur. Un plan ainsi qu'un schéma des stations météo sont présentés sur la Figure 1.

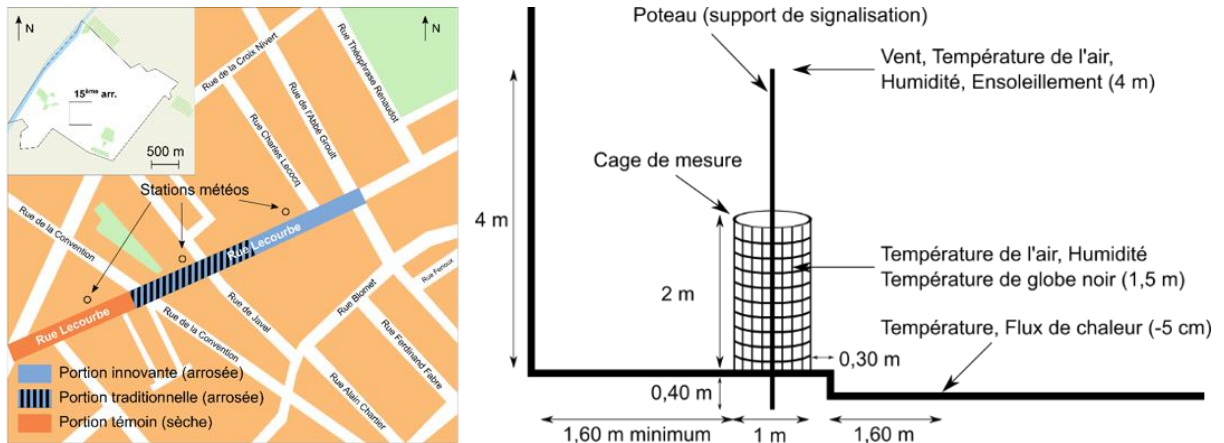


Figure 1 : Schéma du site rue Lecourbe (gauche) et d'une station météorologique (droite).

Les campagnes d'arrosage ont lieu en été, entre début juin et mi-septembre. Seules les zones traditionnelle et innovante sont arrosées, sous certaines conditions estivales anticycloniques ( $T_x \geq 25 \text{ °C}$  ;  $T_n \geq 16 \text{ °C}$  ;  $v_{\text{vent}} < 10 \text{ km/h}$  ; Couverture nuageuse  $< 3$  octas), appelées journées radiatives. L'arrosage est réalisé par les services de la Propreté de Paris entre 7h et 11h30 (UTC+2) à intervalle d'1h30, puis de 14h à 18h30 toutes les 30 min.

## 1.2. Analyse microclimatique

Afin d'isoler l'impact de l'arrosage, la méthode décrite par Parisonet *al.* (2020) est utilisée et décrite brièvement ci-après. Suivant cette méthode, on s'intéresse aux différences microclimatiques existantes entre la zone d'étude (c'est-à-dire la portion innovante ou traditionnelle) et la zone témoin, lors de journées radiatives faisant l'objet d'un arrosage (jours « arrosés ») ou non (jours de référence). On s'intéresse ainsi à l'évolution de cette différence entre journées arrosées et journées de référence.

On note  $M$  le paramètre météorologique considéré. À un instant  $t$  donné, la différence entre les stations d'étude et témoin moyennée sur  $n^{ref}$  journées radiatives de référence est notée  $\Delta M^{ref}$ . Cette même quantité moyennée sur  $n^{arr}$  jours avec arrosage est notée  $\Delta M^{arr}$ . Lors de journées avec arrosage, l'effet rafraîchissant vient s'ajouter à la mesure de la station d'étude. L'impact de l'arrosage de la zone d'étude, noté  $Arr^{étude}$ , est donc obtenu par l'équation suivante :

$$Arr^{étude} = \Delta M^{arr} - \Delta M^{ref} \quad (1)$$

Cette méthode permet de s'affranchir des différences de mesure préexistantes entre les stations. Afin d'évaluer la significativité statistique de  $Arr^{étude}$ , un modèle linéaire à effets fixes est employé avec un niveau de confiance de 95%.

Pour la présente analyse, nous n'étudierons que l'impact de l'arrosage en nous servant de données mesurées en 2019 et 2020, soit après installation des nouveaux revêtements. Pour aller plus loin, si nous souhaitons dégager l'impact du revêtement innovant, il est nécessaire de



compléter le jeu de données avec des mesures effectuées avant travaux (2018) afin de s'en servir comme témoin.

### 1.3. Analyse thermique

Un thermo-fluxmètre disposé à 5 cm de profondeur dans la chaussée des portions innovante et traditionnelle permet la mesure de la température et du flux de chaleur. Ces indicateurs ont pour but de caractériser le comportement thermique des matériaux. L'analyse de la température dans la chaussée permet par exemple de remonter à l'impact de l'arrosage dans le sol. De plus, l'arrosage se visualise directement sur la courbe de flux de chaleur, ce qui permet d'évaluer le temps de séchage approximatif des revêtements.

## 2. Résultats préliminaires et discussions

### 2.1. Effets microclimatiques de l'arrosage

Les résultats de l'analyse groupée des campagnes d'arrosage de 2019 et 2020, correspondant au total à 15 jours d'arrosage et 16 jours de référence, sont présentés sur la Figure 2. L'effet de l'arrosage y est représenté en bleu sur 24h, de 6h à 6h à J+1 (6h à 30h sur la figure), pour l'ensemble des observations disponibles. Cet effet est représenté pour la température de l'air (haut) et l'UTCI (bas) pour la zone innovante de la rue Lecourbe (gauche) et pour la zone traditionnelle (droite). La marge d'erreur à 95% est représentée en vert et les effets statistiquement significatifs (stat. sign.) excédant cette marge sont mis en exergue par des points rouges.

Le Tableau 1 récapitule la valeur maximum, moyenne et de la durée des effets statistiquement significatifs pour chaque zone et paramètre montrés sur la Figure 2.

**Tableau 1 : Valeurs maximales et moyennes et durée des effets statistiquement significatifs de l'arrosage à 1,5 m de hauteur pour la température de l'air et équivalente-UTCI, conjointement pour 2019 et 2020 ( $n^{arr}=15$ ,  $n^{ref}=16$  jours), rue Lecourbe.**

	PORTION INNOVANTE		PORTION TRADITIONNELLE	
	$T_{air}$	UTCI	$T_{air}$	UTCI
<i>EFFET MAXIMUM</i>	-0,8°C	-1,9°C	-1,0°C	-4,6°C
<i>EFFET MOYEN</i>	-0,4°C	-0,5°C	-0,4°C	-0,4°C
<i>DURÉE TOTALE</i>	6H00	4H26	2H53	6H24

L'impact de l'arrosage s'illustre par une réduction moyenne statistiquement significative de la température de l'air de 0,4°C, avec des effets stat. sign. durant environ 6h et 3h par jour sur les zones innovante et traditionnelle respectivement. L'UTCI est réduit en moyenne de 0,4° à 0,5°C pendant environ 4h30 par jour sur la zone traditionnelle. Ces résultats permettent de confirmer l'impact positif de l'arrosage sur la température de l'air et l'UTCI déjà observé en 2019 (Chanialet *al.*, 2020).

Enfin, en première analyse, une réduction maximale de la température équivalente-UTCI de 4,6°C est observée pour la zone traditionnelle. Ce résultat semble grand comparé aux réductions maximales habituellement obtenues par cette méthode, à savoir d'environ 3°C température équivalente-UTCI (Parisonet *al.*, 2020). Une analyse approfondie de chaque paramètre sera conduite afin

d'identifier la source de cette réduction qui pourrait être, par exemple, un ombrage nouveau, indépendant des travaux de rénovation ou de l'arrosage.

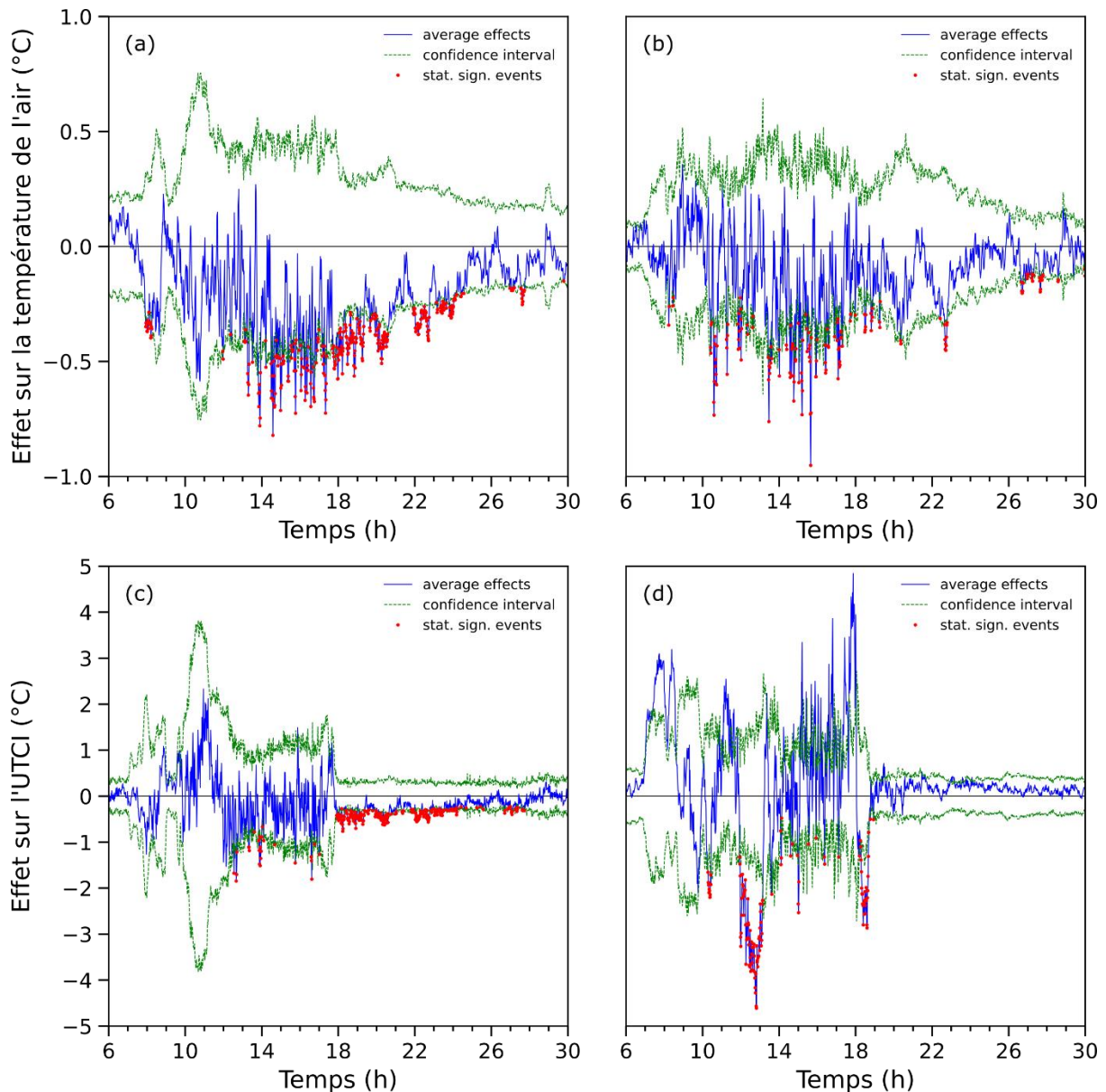
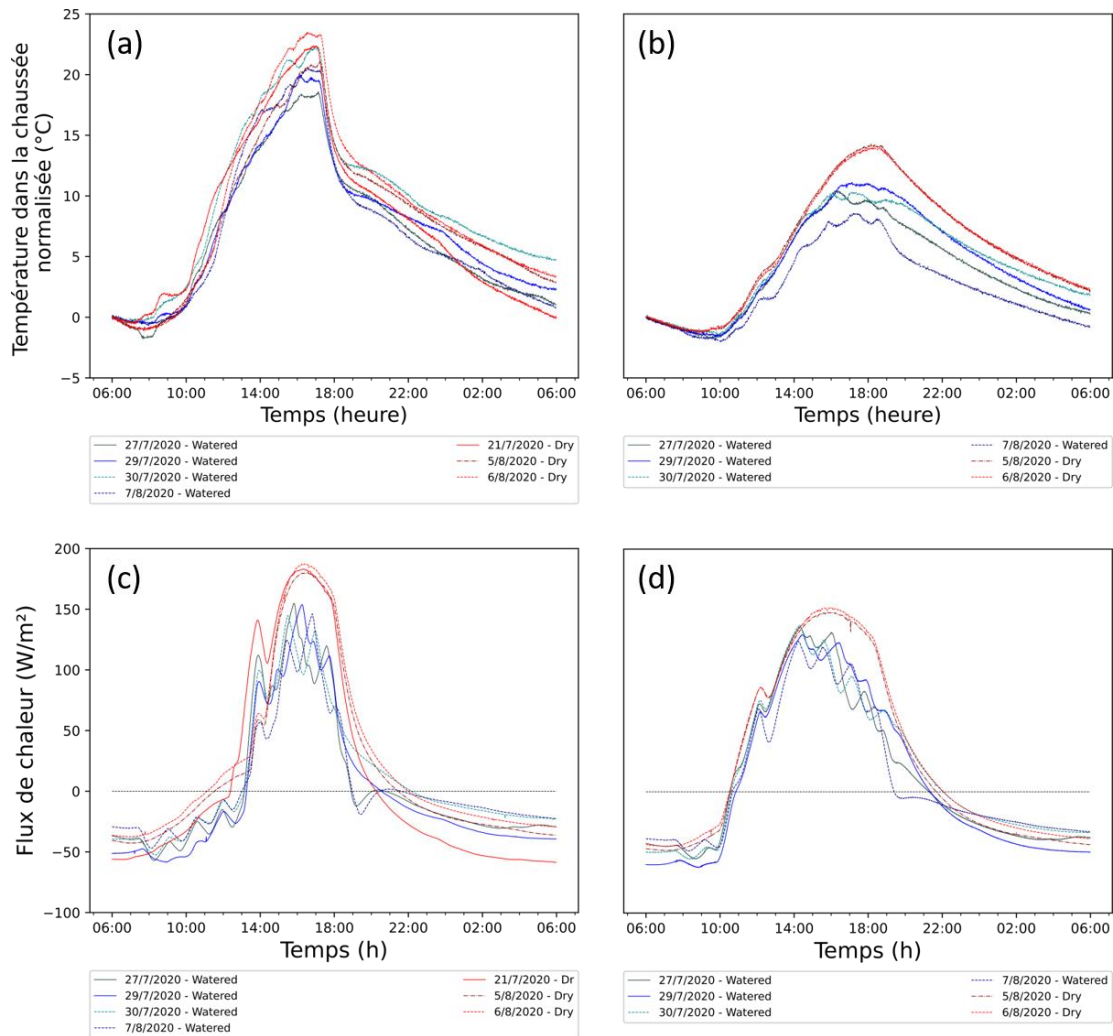


Figure 2 : Effet moyen de l'arrosage en 2019 et 2020 rue Lecourbe, sur la température de l'air (haut) et sur l'UTCI (bas), pour les zones innovantes (gauche) et traditionnelles (droite).

## 2.2. Effet thermique de l'arrosage

La Figure 3 (a) et (b) représente la température de la chaussée à 5 cm de profondeur pour différentes journées radiatives de référence (sans arrosage, en nuances de rouge) et arrosées (en nuances de bleu) de l'été 2020. Par souci d'interprétation, les températures sont normalisées à 0°C afin de mettre en évidence les différences d'amplitude pour chacune des journées représentées. Les amplitudes sont définies comme les différences entre les températures minimales et maximales pour une journée donnée.

Les flux de chaleur sont représentés sur la Figure 3 (c) et (d). Ces signaux permettent de repérer précisément les moments où la chaussée est arrosée puisque cela se manifeste par des pics distincts de chute brutale du flux. Il augmente à nouveau une fois que le revêtement est sec. Il est ainsi possible d'estimer le temps de séchage de la chaussée.



**Figure 3 : Température (figures a et b) et flux de chaleur (figures c et d) à 5 cm de profondeur dans la chaussée rue Lecourbe, pour la zone innovante (a et c) et traditionnelle (b et d). Plusieurs journées de référence et avec arrosage sont représentées.**

Le Tableau 2 indique le temps de séchage moyen de la chaussée calculé à partir de 4 jours d'arrosage sur une période de 13h30 à 17h. Les zones innovante et traditionnelle sont ensoleillées au même moment de la journée. On constate que la zone innovante a un temps de séchage comparable mais légèrement supérieur à celui de la zone traditionnelle.

**Tableau 2 : Temps de séchage entre 13h30 et 17h pour 4 jours d'arrosage.**

	<i>PORTION INNOVANTE</i>	<i>PORTION TRADITIONNELLE</i>
<i>TEMPS DE SECHAGE</i>	27 MIN	25 MIN

On s'intéresse à présent aux amplitudes de température de la chaussée. Le Tableau 3 regroupe les amplitudes moyennes des températures de la chaussée. Ainsi, on constate que les journées avec arrosage permettent de diminuer la température de la chaussée, de 2° à 3,6°C.

**Tableau 3 : Amplitudes moyennes des températures à -5 cm pour 4 jours d'arrosage et 3 jours sans arrosage**

	<i>PORTION INNOVANTE</i>	<i>PORTION TRADITIONNELLE</i>
<i>JOUR AVEC ARROSAGE</i>	21.2°C	11.8°C
<i>JOUR DE REFERENCE</i>	23.2°C	15.4°C

### 3. Conclusions et perspectives

Les impacts microclimatiques et thermiques de l'arrosage d'un revêtement innovant et d'un revêtement traditionnel remis à neuf par rapport à un revêtement traditionnel témoin ont été étudiés pour un site expérimental situé rue Lecourbe (Paris) dans le cadre du projet LIFE « Cool & Low Noise Asphalt ». Les impacts microclimatiques de l'arrosage en 2019 et 2020 sur la température de l'air et l'UTCI sont évalués grâce à une analyse statistique.

Les résultats montrent de façon statistiquement significative que les campagnes d'arrosage permettent de réduire faiblement la température de l'air et le stress thermique pendant quelques heures par jour, de l'ordre de quelques degrés au maximum. Une analyse plus fine reste nécessaire afin de mieux comprendre certains résultats, notamment la forte réduction observée sur l'effet maximal de l'UTCI sur la portion de référence.

En ce qui concerne les flux de chaleur à -5 cm, l'arrosage de la chaussée s'observe nettement par une réduction abrupte du signal, nous permettant d'estimer la durée approximative de séchage des revêtements. Les résultats semblent indiquer que le revêtement innovant sèche légèrement plus lentement que le revêtement traditionnel (27 min contre 25 min). Néanmoins, ces deux valeurs étant très proches, il sera nécessaire de s'intéresser à leur significativité statistique avant de conclure. Un calcul du taux d'évaporation de l'eau sur ces deux zones grâce à un bilan thermique permettrait également de confronter plus rigoureusement ces valeurs. Enfin, la comparaison des amplitudes des températures à -5 cm montre que l'arrosage tend à réduire ces dernières.

Afin de renforcer la robustesse du test statistique, les campagnes de mesure se poursuivront lors des prochains étés. Elles permettront notamment d'étudier l'effet du vieillissement des matériaux sur les paramètres mesurés. Les analyses présentées seront par ailleurs complétées par une étude plus approfondie du bilan thermique de surface des revêtements, notamment pour estimer le flux évaporatif créé par l'arrosage.

### Bibliographie

- Błazejczyk K., Jendritzky G., Bröde P., Fiala D., Havenith G., Epstein Y., Psikuta A., Kampmann B., 2013 : An Introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Geographia Polonica*, 86(1), 5-10.
- Chaniel M., Parison S., Hendel M., Royon L., 2020 : Etude Du Comportement Thermique et Microclimatique d'un Revêtement Innovant. *XXXIIIème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 151-56.
- Hendel M., Gutierrez P., Colombert M., Diab Y., Royon L., 2016 : Measuring the Effects of Urban Heat Island Mitigation Techniques in the Field: Application to the Case of Pavement-Watering in Paris. *Urban Climate*, 16, 43-58.
- Lemonsu A., Kounkou-Arnaud R., Desplat J., Salagnac J. L., Masson V., 2013 : Evolution of the Parisian Urban Climate under a Global Changing Climate. *Climatic Change*, 116(3), 679-692
- Parison S., Hendel M., Royon L., 2020 : A statistical method for quantifying the field effects of urban heat island mitigation techniques. *Urban Climate*, 33, 100651.
- Santamouris M., 2013 : Using Cool Pavements as a Mitigation Strategy to Fight Urban Heat Island - A Review of the Actual Developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224-240.

# LCZ - LOCAL CLIMATE ZONES, AIR TEMPERATURE AND POLLUTION IN CURITIBA (BRAZIL)

Mendonça F. (1), Anjos M. (2), Roseghini W. F. F. (3), Leitões G. (4).

(1) Laboclima, Universidade Federal do Paraná, Brasil, chico@ufpr.br

(2) Laboclima, Universidade Federal do Paraná, Brasil, maxanjos@campus.ul.pt

(3) Laboclima, Universidade Federal do Paraná, Brasil, feltrim@ufpr.br

(4) Laboclima, Universidade Federal do Paraná, Brasil, leitõesgabriel@gmail.com

## Resumé

### Les LCZ - Local Climate Zones, la température et la pollution de l'air à Curitiba (Brésil).

*Dans cette étude, nous mettons en évidence une analyse de la relation entre la LCZ, la température (UHI) et la pollution de l'air dans la ville de Curitiba (sud du Brésil). La méthode appliquée a été la cartographie de la LCZ et de la UHI, qui étaient corrélées avec les données sur la pollution de l'air et l'utilisation et l'occupation des sols de la ville. Les résultats ont montré que les zones classées LCZ 10 (Heavy industry), LCZ 1 (tour compact) et LCZ 2 (hauteur moyenne compacte) ont des températures élevées et des niveaux considérables de polluants. Les zones à urbanisation moins dense (LCZ 6 - basse hauteur ouverte, LCZ 9 faiblement construite) et les espaces verts et parcs (LCZ A - arbre dense) ont montré des températures plus basses, ainsi que les meilleurs niveaux de qualité de l'air.*

**Mots clés:** zones climatiques locales, température de l'air, pollution de l'air, Curitiba.

### Abstract.

*In this study, we highlight an analysis of the relationship between LCZ, temperature (UHI) and air pollution in the city of Curitiba (southern Brazil). The method applied was the mapping of LCZ and UHI, which were correlated with data on air pollution and city land use and occupation. The results showed that the areas classified LCZ 10 (Heavy industry), LCZ 1 (compact tower) and LCZ 2 (compact medium height) have high temperatures and considerable levels of pollutants. Areas with less dense urbanization (LCZ 6 - low open height, LCZ 9 weakly built) and green spaces and parks (LCZ A - dense tree) showed lower temperatures, as well as better levels of air quality.*

**Key-words:** Local Climate Zones, air temperature, air pollution, Curitiba.

## 1. Introduction

Local Climate Zones (LCZ) are a system of climatic, generic and universal classification of land use and cover. They are defined as uniform regions in terms of surface coverage, structure and human activities that extend from hundreds of meters to several kilometers on a horizontal scale ( $> 1\text{km}^2$ ) (Stewart and Oke, 2012). The international project The World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT) uses the LCZ system to develop a consistent physical database on the shape and function of cities across the planet (<http://www.wudapt.org>). To generate the LCZ map, the WUDAPT project methodology uses remote sensing data sources (satellite images) and free software that is easily accessible to anyone with minimal knowledge of geoprocessing (Bechtel et al., 2019).

Several cities in the world have already made use of the methodology provided by the WUDAPT project and formulated their maps of the LCZs ([https://geopedia.world/#T4\\_x0\\_y0\\_s1\\_b2345](https://geopedia.world/#T4_x0_y0_s1_b2345)). LCZ mapping has become an important tool in understanding the relationship between urban morphology / structures, the spatio-temporal variability of the near-surface air temperature and implementation of climatic guidelines for urban planning (Anjos et al., 2020a).

The classification of the urban landscape in LCZs has aided studies on UHI (Anjos and Lopes, 2017; Anjos et al., 2020a), assessment of human thermal comfort (Anjos et al., 2020b) and used as inputs for urban climate models (Hammerberg et al., 2018) in addition to urban parameters in air quality models (Franco et al., 2019). In this research we will explore the role of LCZs in local thermal patterns and air quality in Curitiba, a big city (2 million inhabitants in the city,

3.5 in the conurbated area) located in southern Brazil, where climate change has manifested itself in differentiated environmental impacts, such as air pollution and excess heat due to UHI phenomenon. Numerous researches have reported Curitiba as an excellent example of the existence of UHI (Mendonça, 1995; Krüger and Rossi, 2002) and even the occasions when this phenomenon has a high intensity (5.0 °C), mainly in densely built-up areas with high human activity and little green spaces (Danni-Oliveira, 2000). It includes the interaction between UHI with human comfort (Schmitz, 2014), air pollution (Mendonça and Danni-Oliveira, 2000) and the intensification of cases of diseases such as leptospirosis and dengue, with significant impacts on the population's health.

Therefore, this study was developed based on three objectives:

- i) map the urban landscape of Curitiba and surrounding areas in the form of LCZ classes, using the WUDAPT methodology;
- ii) evaluate the spatial variation of air temperature from data observed in the field;
- iii) statically relate the classes of LCZs and the air pollutants obtained from local air quality monitoring.

## **2. Methods**

### ***2.1. LCZs mapping***

The procedures applied in the preparation of the map of the LCZ of Curitiba followed the WUDAPT methodology, according to the steps:

- (I) the pre-processing of Landsat 8 satellite images (resolution of 30 meters) made available for free on the USGS (U.S. Geological Survey) website;
- (II) the digitization of signatures (training areas) in Google Earth (.kml) according to the understanding of the LCZ system;
- (III) the importation of Landsat 8 images and signatures for the free software System for Automated Geoscientific Analyzes (SAGA-GIS). In SAGA, supervised classification is performed using the random forest algorithm in which the values of the LCZs' characteristics are assigned.

### ***2.2. UHI mapping***

To map the temperature differences in the study area, the grid mapping approach was used, which considers that the temperature values of a sample of grid cells (weather stations of an LCZ class) can be attributed to the non-sampled grid cells with the same class of LCZ (Anjos et al., 2020). For this, a 500m x 500m grid was created in ArcMap / ARCGIS and was superimposed on the LCZ map to identify the grid units with their respective LCZ classes. Then, the sampled and predicted temperatures were interpolated using the Ordinary Kriging method, which resulted in the mapping of the thermal field representative of the UHI maximum day and hour magnitude.

### ***2.3. In situ air temperature and pollution***

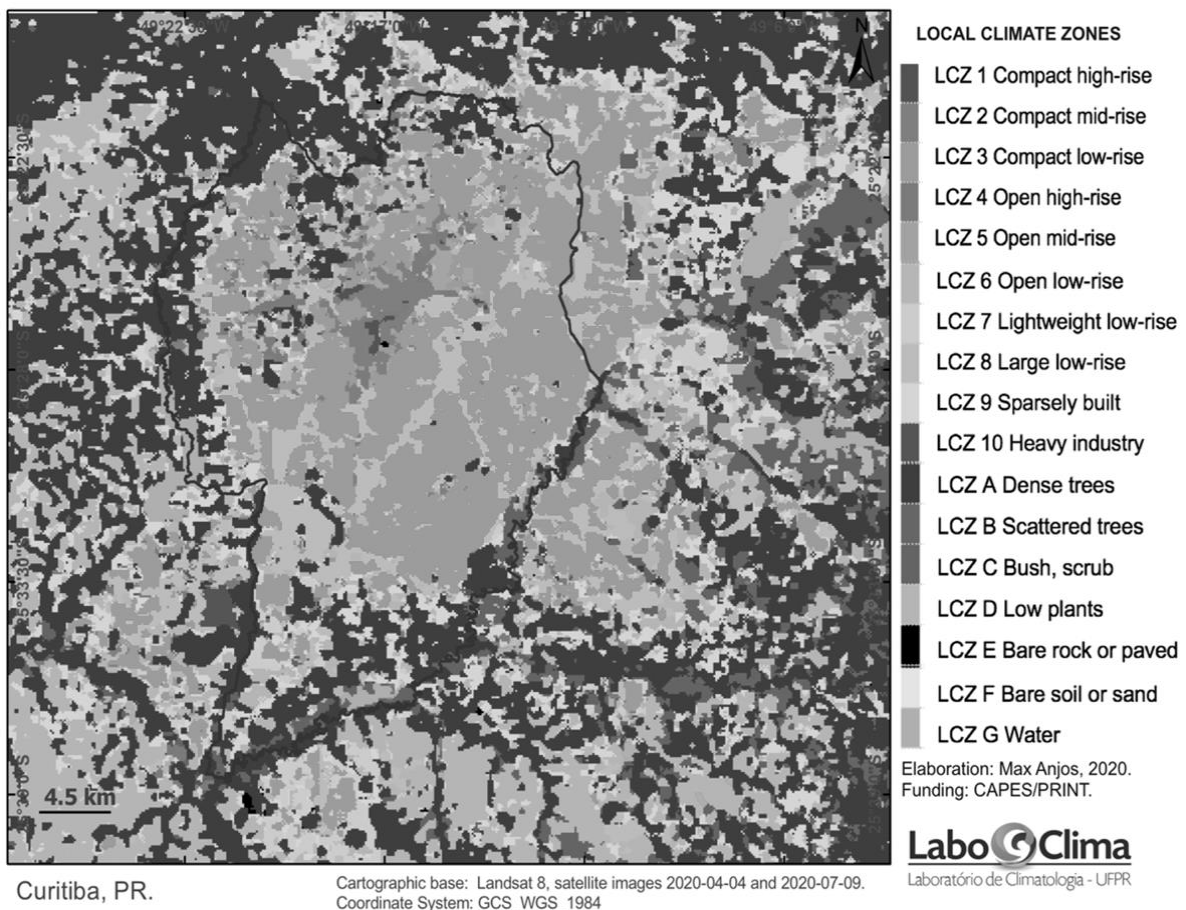
Temperature data were collected between 2016 and 2018 through automatic meteorological stations (Davis Vantage Vue model), calibrated and installed in the city of Curitiba, with the objective of seasonally identifying the average thermal behavior of the period. In the distribution of the stations, we tried to represent different types of urban land use according to the classification of the LCZs (central vertical areas, peripheral areas with high construction density, wooded areas, etc.). Data provided by the National Meteorological Institute (INMET) were also used to compose and calibrate the collection network.

Curitiba's Air Quality Program (PARCUR) international cooperative project (Brazil and Swedish) project was implemented to quantify air pollutant emissions and their impacts on air

quality state in the Curitiba metropolitan area. The city has currently an air pollution monitoring network which provides continuously samples of atmospheric pollutants and that have supported many specific action plan and climatic studies to reduction in environmental pollution levels. Emphasis was given the mean daily between 2016 and 2018 of the following air pollutants: Carbon Monoxide (CO), Particulate matter (PM10), Ozone (O3), Nitric Oxide (NO), Nitrogen Dioxide (NO2), Sulfur dioxide (SO2).

### 3. Results

Figure 1 shows the spatial distribution of LCZs in Curitiba with a diverse fraction of land use and coverage. LCZ 3 (compact low-rise, up to three floors) was the predominant class covering most of the urban area of Curitiba. LCZ 8 (large low-rise) crosses the city associated with the main arteries. At the core of the study area are the LCZ 1 (compact high-rise, up to nine floors) and LCZ 2 (compact mid-rise) classes, characterized by densely built-up areas with little green space. On the outskirts of the city, the landscape is covered by samples of LCZ 6 (open low-rise) and LCZ 9 (sparsely built), while rural areas are dominated by LCZs with natural characteristics, such as LCZ A (dense trees) and LCZ D (low plants).

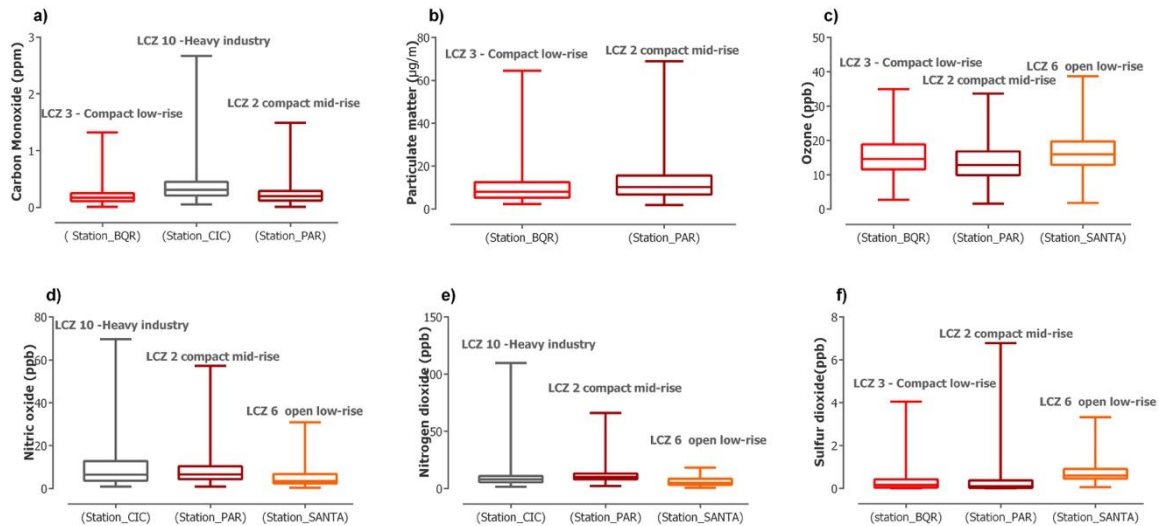


**Figure 1. LCZ map of Curitiba.**

In Figure 2 it is possible to observe hottest spots of air temperatures associated with main displacement axes (ex: Linha Verde), as well as in densely urbanized and industrial areas (CIC neighborhood), close to the border with the municipality of Araucária. The persistence of higher temperature values in these locations (20.5 °C) compared to adjacent rural areas (17.7 °C) is mainly due to the thermal inertia of the materials that make up urban structures, in particular asphalt and cement in buildings, in addition to the high impermeability and low vegetation density.







**Figure 3. Boxplots of the mean daily (2016-2018 period) of air pollutants and LCZ classes in Curitiba.**

Figure 3 (a-f) presents the results of the comparison between mean daily air pollutants done for different the LCZ classes. Based on their geographic location, the air pollution stations were aggregated to respective LCZ classes to show a possible spatial relationship between them. The highest median and maximum extreme for pollutants CO, NO, NO<sub>2</sub> occurred in area covered by the LCZ 10 (Heavy industry), located in the southwest of the city, compared to LCZs 1, 2, 3 and 6.

For stance, LCZ 10 had a mean maximum of 2.9 ppm of CO, whilst compact and urbanized LCZs with maximum of 1.0 ppm (Fig.3a). For PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> pollutants, maximum extremes are related to LCZ 2, located in the city center, due to elevated anthropogenic sources, such as traffic flow. LCZ 6, localized in the northeastern peripheral area of the city, had the lowest mean concentration of NO (36 ppb), NO<sub>2</sub> (20 ppb), and SO<sub>2</sub> (3.8 ppb). Regarding the CO<sub>3</sub>, though, the LCZ 6 recorded the mean maximum concentration with 40 ppm, which reveals the well-known “ozone paradox”, which is when the O<sub>3</sub> levels are higher in rural areas than urban ones (Fig. 3c). The high concentration of NO (60 ppb) in LCZ 2 (Fig. 3d) and consequently degradation of O<sub>3</sub> by the components of NO<sub>x</sub> can partly explain the lower O<sub>3</sub> level in the central area.

#### 4. Conclusion

LCZ map, derived UHI map, and spatial air pollution association give an excellent opportunity to incorporate the scientific knowledge about the urban climate to urban planning for improvement human comfort conditions and air quality.

LCZ–UHI mapping approach helps to identify the target areas responsible for negatives UHI effects. The LCZ map reveals that the Curitiba is dominated by the compact and densely built-up and low-permeability areas LCZ classes that favor the development of large thermal differences between urban and rural areas, with a maximum average of 3.0 °C. The first attempt of the relationship between air pollution and LCZ classes proved to be promising since LCZ 10 (Heavy industry) and LCZ 1 and 2 located in the city center have the highest maximum pollutants levels. Future work may address a better understanding of the role of LCZ classes in the local dynamics of air pollutants in the city.

## 5. References

- Anjos M, Targino AC, Krecl P, et al Oukawa, G. Y Braga, R. F (2020): Analysis of the urban heat island under different Anjos M, Targino AC, Krecl P, et al (2020) Analysis of the urban heat island under different synoptic patterns using local climate zones. *Build Environ* 185:107268.
- Anjos M, Lopes A, Lucena AJ de, Mendonça F (2020): Sea Breeze Front and Outdoor Thermal Comfort during Summer in Northeastern Brazil. *Atmosphere* (Basel) 11:1013.
- Anjos M, Lopes A (2017): Urban heat island and Park cool island intensities in the coastal city of Aracaju, North-eastern Brazil. *Sustainability* 9:1379.
- Hammerberg, K., Brousse, O., Martilli, A., Mahdavi, A., 2018. Implications of employing detailed urban canopy parameters for mesoscale climate modelling: a comparison between WUDAPT and GIS databases over Vienna, Austria. *Int. J. Climatol.* 38, e1241–e1257.
- Stewart, I.D., Oke, T.R., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93, 1879–1900.
- Bechtel, B., Alexander, P.J., Beck, C., B.hner, J., Brousse, O., Ching, J., Demuzere, M., Fonte, C., G.I, T., Hidalgo, J., Hoffmann, P., Middel, A., Mills, G., Ren, C., See, L., Sismanidis, P., Verdonck, M.-L., Xu, G., Xu, Y., 2019. Generating WUDAPT Level 0 data – Current status of production and evaluation. *Urban Clim.* 27, 24–45.
- Pellegatti Franco, D.M., Andrade, M. de F., Ynoue, R.Y., Ching, J., 2019. Effect of Local Climate Zone (LCZ) classification on ozone chemical transport model simulations in Sao Paulo, Brazil. *Urban Clim.* 27, 293–313.
- Danni-Oliveira, I M., 2000. Considerações sobre a poluição do ar em Curitiba face a seus aspectos de urbanização. *RA EGA (UFPR)*, Curitiba, v. 3, n.4, p. 23-26.
- Mendonca, F. A.; Danni-Oliveira, I. M., 2000. Contribuição ao estudo do clima urbano de Curitiba/PR: Considerações sobre suas características termo-higrométricas. In: IV Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, 2000, Rio de Janeiro. Caderno de resumos do IV SBCG. Rio de Janeiro: UFRJ.
- Monteiro, C. A. F.; Mendonça, F., 2003. Clima urbano. São Paulo: Contexto.
- Oke, T. R., 1987. Boundary layer climates. Second Ed. London: Methuen.
- Schmitz, L. K., 2014. Reestruturação Urbana e Conforto Térmico em Curitiba/PR: diagnóstico, modelagem e cenários. 307 f. Tese (Doutorado em Geografia) Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

# VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS DANS LA REGION DE SFAX (TUNISIE)

Mzoughi M.<sup>1et2</sup>, Feki M.<sup>1</sup> et Dahech S.<sup>1et2</sup>

<sup>1</sup>Université de Sfax, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Laboratoire SYFACTE, (mzoughimohamed23@gmail.com ; m\_feki@hotmail.com)

<sup>2</sup>Université de Paris Diderot, PRODIG (salem.dahech@gmail.com)

**Résumé**—L'objectif de ce travail est d'analyser la variabilité spatio-temporelle des précipitations dans la région de Sfax. Nous avons utilisé les données des stations pluviométriques de Sfax Elmaou, Bir Ali, Menzel Chaker et Elhencha pour la période 1976-2019. Les données pluviométriques ont été soumises à des tests d'homogénéité (test de Pettitt, test de Buishand et SNHT) et à des tests de tendances (Mann Kendall). Les tests d'homogénéité détectent des ruptures très proches notamment pour la sous-période 1996-2019 pour les indices ccd et RX5. Cependant, le test de Mann Kendall ne montre une tendance significative que pour quelques indices. Certains indices enregistrent un coefficient positif témoignant la tendance à la hausse (ccd Elmaou 1996-2019), d'autres ont un signe négatif comme celui de cdd aux stations de Menzel Chaker et Elhencha pour la période 1976-2019 signalant une tendance à la baisse.

**Mots clé** : Précipitations, variabilité spatio-temporelle, tendance, rupture, Sfax

**Summary** — Spatial-Temporal Variability of Precipitation in The Region of Sfax (Tunisia): The objective of this work is to analyze the spatio-temporal variability of rainfall in the region of Menzel Chaker. We used data from the rainfall stations of Sfax Elmaou, Bir Ali, Menzel Chaker and Elhencha for the period 1976-2019. The rainfall data were subjected to homogeneity tests (Pettitt test, Buishand test and SNHT) and trend tests (Mann Kendall). All the homogeneity tests show very close appearances for the shortest periods, especially for ccd and RX5 during the period 1996-2019. However, the Mann Kendall test shows no trend except for some indices during given periods. Some of them have a positive coefficient showing the upward trend (ccd Elmaou 1996-2019), others have a negative sign like that of cdd at Menzel Chaker and Elhencha stations for the period 1976-2019 signaling a downward trend.

**Key words**: Precipitation, spatial-temporal variability, trend, break

## Introduction

Le bassin méditerranéen est considéré comme étant un « hot spot » du changement climatique et classé parmi les zones de la planète qui pourrait subir des grandes modifications climatiques (IPCC, 2013). Les précipitations, très variables dans le temps et dans l'espace, représentent l'un des paramètres qui pourraient connaître des modifications ce qui représente un enjeu majeur en termes des ressources en eau et des risques associés aux événements extrêmes (Toreti et al, 2010, Garcia- Rugez et al, 2011). La majorité des simulations CORDEX (programme international mis en œuvre par plusieurs centres de recherches dans le but de produire des scénarios de changement climatique fiables à des fins d'études d'impact) suggère un réchauffement général d'ici la fin du siècle : entre +1 et +5 ° C par rapport à la période de référence 1986-2005, avec un assèchement général de 10% à 40% pour la majeure partie de la Méditerranée (Suraj et al., 2017). Ces simulations sont alarmantes pour la rive méridionale car les scénarios RCP4.5 et RCP 8.5 prévoient un réchauffement et un assèchement combinés.

En Tunisie, sur la rive sud, la variabilité des précipitations représente un sérieux problème pour la vie quotidienne de la population, l'agriculture et les ressources en eau (Henia, 2003). Les longues séquences sèches que subit l'année agricole, entraînent une porosité de la production agricole pratiquée principalement en mode pluvial (céréaliculture et oléiculture). Une baisse et/ou une mauvaise répartition des quantités de pluies pendant la saison agricole affecte les phases phénologiques de la production végétale et entraîne des conséquences dramatiques sur la production et les rendements, notamment dans le Centre et le Sud où l'aridité du climat devient plus intense.

La région de Sfax (fig. 1), centre-est de la Tunisie, est caractérisée par un climat subaride (Hénia, 1993), avec de faibles précipitations (200 mm en moyenne) qui sont très variables d'une

année à l'autre et un bilan hydrique déficitaire toute l'année. La saison des pluies est concentrée sur l'automne (43%), suivie par l'hiver et le printemps (29% et 25%, respectivement). Cette région est réputée pour la culture de l'olivier, arbre qui s'intègre parfaitement dans l'écosystème fragile et s'adapte bien aux conditions climatiques de la région (50% de la production nationale de l'huile d'olive) (Ben Rouina, 2007). L'eau révèle un élément important pour l'oléiculture. Il régule les différents processus physiologiques en conditionnant la productivité et la qualité de la récolte (Ben Rhouma *et al.*, 1998 ; Ben Rouina *et al.*, 2007 ; Ben Ahmed *et al.*, 2007).

Dans le présent travail nous étudions la variabilité spatio-temporelle des précipitations dans la région de Sfax. Cette étude a pour but de mettre en exergue la variabilité interannuelle de la quantité des précipitations et leurs irrégularités entre 1975 et 2020. Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé des données pluviométriques journalières de quatre stations pluviométriques : Menzel Chaker, Bir Ali, Sfax Elmaou et Elhencha (fig.1).



Figure1 : carte de la localisation des stations pluviométriques

## 1-Données et méthodes

Nous partons des totaux pluviométriques journaliers enregistrés dans les quatre stations précitées. Ces données ont été fournies par la direction générale des ressources en eau (Ministère de l'Agriculture) et l'Institut National de la Météorologie. Les données manquantes sont très rares puisqu'elles représentent environ 1%.

Le logiciel R via le module Rclimdex a été utilisé pour contrôler la qualité des données et calculer différents indices des extrêmes climatiques. Il s'agit de 27 indices recommandés par « Expert Team for Climate Change Detection Monitoring and Indices (ETCCDMI) » de l'organisation mondiale de la météorologie. Nous avons calculé 11 indices liés aux précipitations journalières (Tab. 1).

Nous étudions la variabilité interannuelle des précipitations en recherchant d'éventuelles ruptures et tendances. La série chronologique est répartie en trois périodes indépendantes : 1976-2019, 1986-2019 et 1996-2019 pour examiner des changements d'homogénéité des données ainsi qu'une évolution en fonction du changement de la chronique. Les tests non paramétriques de Pettitt (1979), SNHT et de Buishand au seuil de 5% ont été appliqués sur les trois périodes. Une fois une rupture a été identifiée, le test de Mann Kendall est appliqué pour valider ou non les tendances. Ce test non paramétrique est basé sur le rang et permet de déterminer si la corrélation entre le temps et la variable d'étude est significative ou pas (Hirsch R.M., et Slack J.R., 1984).

**Table 1 : Définition des indices des extrêmes en précipitations.**

Code	Name	Definition	Unit
Rx1day	Max 1-day precipitation amount	Annual maximum 1-day precipitation	mm
Rx5day	Max 5-day precipitation amount	Annual maximum consecutive 5-day precipitation	mm
R95p	Very wet days	Annual total precipitation from days >95th percentile	mm
R99p	Extremely wet days	Annual total precipitation from days >99th percentile	mm
R10	mm Heavy precipitation days	Annual count when precipitation > 10 mmd	
R20	mm Very heavy precipitation days	Annual count when precipitation $\geq 20$ mm d	
R25	mm Very heavy precipitation days	Annual count when precipitation $\geq 25$ mmd	
CDD	Consecutive dry days	Maximum number of consecutive days when precipitation < 1 mmd	
CWD	Consecutive wet days	Maximum number of consecutive days when precipitation $\geq 1$ mmd	
PRCPTOT	Total precipitation in wet days	Annual total precipitation from days $\geq 1$ mm	mm
SDII	Simple daily intensity index	The ratio of annual total precipitation to the number of wet days ( $\geq 1$ mm)	mm

## 2- Résultats :

### 2.1. Résultats des tests pour les différents indices et les différentes périodes

Les tests de rupture appliqués sur les indices d'extrêmes climatiques détectent des ruptures dans la stationnarité des séries chronologiques (Tab. 2). Les dates de ruptures varient selon les périodes mais les tests de Pettitt et de Buishand présentent à peu près les mêmes dates de ruptures pour les trois périodes aux stations de Sfax et de Menzel Chaker pour les journées consécutives secs (cdd). On a observé aussi la présence de la même date de rupture au station d'Elmaou pour les trois périodes et les trois tests de ruptures. Elle correspond à l'année 2007 pour r20 et 2005 pour r99p. Par ailleurs, elle était à 1999 pour r95p et AnnualRX5 à Menzel Chaker. Pour r10 elle était en 2007 et entre 2000 et 2001 pour Annual XR5 à la station de Bir Ali. Enfin, elle était en 1997 pour le SDI et entre 2005 et 2006 pour AnnualRX5. On remarque également que les dates de la rupture sont très proches selon les tests pour la période la plus courte (1996-2019) notamment les indices cdd et Rx5day. Ceci témoigne d'une faible variabilité spatiale de la pluviométrie journalière dans les quatre stations. En revanche les disparités spatiales s'accroissent si on allonge la période.

**Tableau 2. Résultats des tests de rupture**

Stations	période	Test/indices	cdd	cwd	prcptot	r10mm	r20mm	r25mm	r95p	r99p	sdi	AnnualRX1	AnnualRX5
Sfax	1976-2019	Pettitt	2006	1984	2007	1993	2007	2003	1998	2005	1984	1986	2005
		Buishand	2006	1984	2006	1993	2007	2007	1998	2005	2004	1986	2005
		SNHT	2006	1979	2001	2018	2007	2007	2005	2005	2004	1984	2005
	1986-2019	Pettitt	2006	1994	2007	1993	2007	2007	1998	2005	2011	1988	2005
		Buishand	2006	1994	2006	1993	2007	2007	1998	2005	2004	2005	2005
		SNHT	2010	1988	1988	1989	1988	1988	1998	2005	1988	2005	2005
	1996-2019	Pettitt	2006	1999	2007	2006	2007	2003	2003	2005	2011	2014	1999
		Buishand	2006	1999	2006	2006	2007	2007	2006	2005	2006	2006	2006
		SNHT	2006	1999	2006	2018	2007	2007	2006	2005	2006	2006	2006
Menzel Chakeur	1976-2019	Pettitt	2004	1994	1994	2017	1999	1986	1981	1989	1979	1989	1999
		Buishand	1995	1994	1989	2017	1999	1986	1999	1989	1999	1989	1999
		SNHT	2004	1994	2017	2017	2017	1986	1981	1989	1977	1989	1999
	1986-2019	Pettitt	2004	1994	1994	2017	2011	1994	1994	1999	1989	1989	1994
		Buishand	2004	1994	1999	2017	1999	1989	1999	1999	1999	1999	1999
		SNHT	2004	1994	1989	2017	2017	1989	1990	1990	1989	1989	1990
	1996-2019	Pettitt	2004	2000	1999	2017	1999	1999	1999	1999	2017	1999	1999
		Buishand	2004	2000	1999	2017	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999
		SNHT	2004	2000	1999	2017	1999	1999	1999	1997	1999	1999	1999
Bir Ali	1976-2019	Pettitt	1994	2010	1994	2007	1996	2007	2007	2005	1989	2005	2001
		Buishand	1994	1994	1994	2007	1996	2001	2001	2000	2001	2005	2000
		SNHT	1994	1994	1994	2007	1996	2007	2001	2000	2001	2005	2001
	1986-2019	Pettitt	1994	2010	2007	2007	1996	2007	2007	2005	2001	2005	2001
		Buishand	1994	2000	2003	2007	2005	2001	2001	2000	2001	2001	2000
		SNHT	1994	2000	2003	2007	2007	2001	2001	2000	2001	2001	2000
	1996-2019	Pettitt	1986	1994	1987	1987	1988	1987	1987	1996	1997	1987	2006
		Buishand	2004	2000	2003	2007	2001	2001	2001	2000	2001	2001	2000
		SNHT	2004	2000	2000	2007	2001	2001	2001	2000	2000	2001	2000
Elhencha	1976-2019	Pettitt	1986	1994	1987	1987	1988	1987	1987	1996	1997	1987	2006
		Buishand	1986	1994	1988	1987	1988	1989	1987	2008	1997	1987	2005
		SNHT	1984	1994	1987	2017	2017	1981	1981	2012	1997	1981	2005
	1986-2019	Pettitt	1991	1994	1997	1997	2017	2007	2007	1992	2008	1997	2005
		Buishand	1991	1996	1979	1997	1997	2007	2007	1992	2012	1997	2005
		SNHT	1990	1994	2017	1997	2017	2007	2007	1992	2012	1997	2005
	1996-2019	Pettitt	2005	2009	2011	2011	2011	2008	2003	1997	2011	2009	2006
		Buishand	2005	2009	2017	2011	2011	2007	2015	2012	2011	2003	2005
		SNHT	2005	2009	1997	2017	2017	2017	1997	1997	1997	1997	1997

## 2.2. Résultats des tendances

D'après les tableaux de tendance des quatre stations la plupart des indices utilisés ne présentent aucune tendance puisque le P- value est supérieur à 5% sauf pour quelques indices durant des périodes données. A la station Elmaou, l'indice cdd, atteint 4.2%, il présente une tendance significative durant la période 1986-2019 car le P-value est inférieur à 5%. Le coefficient statistique de MannKendal (UMK) est positif (0.251) ce qui confirme que la tendance est à la hausse et que les jours secs consécutifs ne cessent d'augmenter. Ce même indice a présenté une tendance significative pour les deux stations Menzel Chaker et Elhencha durant la période 1976-2019 (avec des taux de 4.3 et 2.4% respectivement). Le sens de ces tendances est négatif (-0.221 et -0.24) ce qui reflète la diminution des jours secs (non pluvieux) consécutifs, mais d'une manière plus excessive à Menzel Chaker qu'Elhencha.

Concernant la station de Bir Ali l'indice r95p présente une tendance significative durant la période 1986-2019 avec un taux de 3.9% ayant un signe négatif indiquant une tendance à la baisse. De plus, les indices des précipitations prcptot, r20, r25, r95p, r99p, Annuel Rx1 et Annuel Rx5 présentent une tendance significative à signe négatif confirmant la tendance à la baisse (-0.36, -0.388, -0.417, -0.518, -0.444, -0.386 et -0.388 respectivement).

A la station d'Elhencha l'indice sdi présente une tendance significative pour la période 1976-2019 avec un taux de 2.9% ayant un coefficient statistique de Man Kendal (UMK) négatif (-0.232) ce qui confirme la tendance à la baisse. En revanche, durant la période 1996-2019 l'indice AnnualRX5 présente une tendance à la hausse puisqu'elle est significative à signe positif (0.093).

**Tableau 3. Résultat de tests de tendance (significative en gras)**

Stations	période	cdd	cwd	prcptot	r10mm	r20mm	r25mm	r95p	r99p	sdii	AnnualRX1	AnnualRX5
Sfax	1976-2019	0,177	0,466	1	0,833	0,898	0,456	0,915	0,744	0,859	0,675	0,754
	1986-2019	<b>0,042</b>	0,41	0,745	0,888	0,681	0,713	0,525	0,058	0,377	0,515	0,515
	1996-2019	0,154	0,452	0,833	0,557	0,279	0,182	0,957	0,243	0,475	0,771	0,853
Menzel Chaker	1976-2019	<b>0,043</b>	0,962	0,711	0,776	0,8	0,841	0,841	0,533	0,686	0,686	0,728
	1986-2019	0,276	0,409	0,541	0,717	0,555	0,42	0,638	0,552	0,575	0,563	0,812
	1996-2019	0,227	0,609	0,786	0,52	0,44	1	0,597	0,267	0,928	0,786	0,587
Bir Ali	1976-2019	0,706	0,874	0,706	0,643	0,723	0,24	0,22	0,53	0,925	0,408	0,503
	1986-2019	0,394	1	0,525	0,674	0,962	0,202	<b>0,039</b>	0,24	0,238	0,103	0,149
	1996-2019	0,937	0,442	0,017	0,159	<b>0,015</b>	<b>0,01</b>	<b>0,002</b>	<b>0,011</b>	<b>0,095</b>	<b>0,011</b>	<b>0,01</b>
Elhencha	1976-2019	<b>0,024</b>	0,294	1,77	0,534	0,395	0,761	0,603	0,377	<b>0,029</b>	0,842	0,385
	1986-2019	1	0,511	0,988	0,901	0,975	0,404	0,562	0,61	0,137	0,525	0,577
	1996-2019	0,579	0,165	0,712	0,442	0,519	0,892	0,871	0,971	0,792	0,833	<b>0,0001</b>

## Conclusion

L'analyse des séries pluviométriques et les tests statistiques réalisés permettent de comprendre les changements des précipitations dans la région de Sfax. D'une part, d'après les tests de ruptures appliqués, les dates de ruptures varient suivant la longueur de la série, les indices et les stations. En revanche, ces dates apparaissent très proches pour la période 1996-2019, notamment pour le CCD et RX5.

D'autre part, la plupart des indices utilisés ne présentent aucune tendance du fait de la très forte variabilité interannuelle, à l'exception de certains indices durant des périodes bien déterminées. Certains d'entre eux ont un coefficient positif témoignant la tendance à la hausse (ccd Elmaou 1996-2019), d'autres ont un signe négatif comme celui de cdd aux stations de Menzel Chaker et Elhencha pour la période 1976-2019 signalant une tendance à la baisse. Ces différences témoignent d'une disparité entre le littoral et l'intérieur.

A Sfax Elmaou, l'augmentation de la fréquence du nombre de jours consécutifs secs et, à la fois, la légère tendance à la hausse des totaux pluviométriques annuels pourrait renseigner sur un changement de régime pluviométrique comme une conséquence des changements climatiques déjà observée en Méditerranées et amener à s'intensifier au futur d'après le GIEC (Zittis et al., 2019). Ces changements pourraient impacter les ressources en eau et conséquemment l'agriculture pluviale.

## Bibliographie

- Ben Ahmed, Ch., Ben Rouina, B. and Boukhris, M. 2007. Effects of water deficit on olive trees cv. Chemlali under field conditions in arid region in Tunisia. *Scientia Horticulture*, 113: 267-277.
- Ben Rhouma, B. 1998 (a) : contribution à l'étude de l'effet du climat et du sol sur la croissance et la production de l'olivier « Chemlali de Sfax » planté en milieu aride. Mémoire de DEA en Ecologie générale, faculté des sciences de Sfax. 76p.
- Ben Rouina, 2007 : Etude des relations sol-eau- plante et de l'effet du stress hydrique sur la croissance de la fructification de l'olivier (*Olea europea* L.) Thèse de doctorat en science biologique, faculté des sciences de Sfax, 229p.
- Ben Rouina, B., Trigui, A., Andria R., Boukhris, M., and Chaib M., 2007. Effects of water stress and soil type on photosynthesis, leaf water potential and yield of olive trees (*Olea europea* L. cv Chemlali Sfax). *Australian journal of Experimental Agriculture*. Volume **47(12)**: xxxx.
- Buishand, T. A. (1982): Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *J. Hydrol.* 50, 11-27.
- Garcia-Ruiz J.M., López-Moreno J.I., Vicente-Serrano S.M., Lasanta-Martínez T., Beguería S., 2011: Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews*, **105**, 121-139.
- Hénia L., 1993 : Climat et bilans de l'eau en Tunisie, Essai de régionalisation climatique par les bilans hydriques, publication de l'université de Tunis I, 391 p.

- Hénia L., 2003 : Les grandes sécheresses en Tunisie au cours de la dernière période séculaire p. 25-36
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013. The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA, 1535 p.
- Hirsch R.M. et Slack J.R. (1984): "A nonparametric trend test for seasonal data with serialdependence", *Water Resources Research*, 20, pp. 727-732.
- Pettit A. N. (1979): A non-parametric approach ID the change-point problem. *Appl. Statist.* 28(2), 126-135.
- Toreti A., Xoplaki E., Maraun D., Kuglitsch F.G., Wanner H., Luterbacher J., 2010: Characterisation of extreme winter precipitation in Mediterranean coastal sites and associated anomalous atmospheric circulation patterns. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **10**, 1037-1050.
- Zittis G., Hadjinicolou P., Klanjidou M., Proestos Y. & Lelieveld J., 2019: A multi-model, multi-scenario, and multi-domain analysis of regional climate projections for the Mediterranean, *Regional Environmental Change* volume 19, pp. 2621–2635.



# FACTEURS ATMOSPHÉRIQUES RESPONSABLES DES FORTES PLUIES AUTOMNALES EN TUNISIE : CAS DES ÉVÈNEMENTS PLUVIEUX DE SEPTEMBRE ET DE NOVEMBRE 2020

NASRALLAH W.<sup>1</sup> et AL ATRACH M-M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut Préparatoire aux Études Littéraires et de Sciences Humaines de Tunis - LR. Biogéographie, Climatologie Appliquée et Dynamiques Environnementales [nasrallah\_wafa@ymail.com].

<sup>2</sup> Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités de la Manouba - LR. Biogéographie, Climatologie Appliquée et Dynamiques Environnementales [alatrach\_mm@hotmail.fr].

**Résumé**– *Facteurs atmosphériques responsables des fortes pluies automnales en Tunisie : cas des événements pluvieux de septembre et de novembre 2020*

La Tunisie se caractérise par un régime pluviométrique de type méditerranéen. Il est marqué à la fois par une grande irrégularité interannuelle et inter-saisonnière des volumes pluviométriques, par l'importance des pluies des intersaisons ainsi que par la fréquence des événements pluviométriques extrêmes. Ces pluies extrêmes sont parfois prolongées dans le temps, d'une forte intensité et cumulent des totaux pluviométriques quotidiens très élevés. Ces spécificités pluviométriques exposent souvent la Tunisie au risque d'événements climatiques extrêmes.

En l'occurrence, au cours de l'automne 2020 (du 12 au 14 septembre et du 18 au 21 novembre 2020), des situations atmosphériques particulières étaient très favorables à la chute de fortes pluies en Tunisie dans plusieurs régions, avec des cumuls pluviométriques importants dépassant les normales mensuelles. Ces pluies exceptionnelles ont provoqué le débordement rapide des oueds et l'inondation des villes et des champs. Ces jours furent très difficilement vécus par les habitants : d'importants dégâts matériels ont touché profondément l'infrastructure, les établissements de services et les habitations.

Ce travail cherche à étudier les facteurs atmosphériques responsables des deux événements pluviométriques, en dégagant d'abord les caractéristiques de la circulation atmosphérique et les trajectoires des nuages pluvio-gènes, puis les caractéristiques de la répartition spatiale des cumuls pluviométriques dans les régions touchées de la Tunisie. Cette étude se réfère aux données pluviométriques quotidiennes recueillies auprès de l'Institut National de la Météorologie (I.N.M).

**Mots-Clés** : Facteurs atmosphériques, fortes pluies, du 12 au 14 septembre, du 18 au 21 novembre 2020, Tunisie.

**Abstract** - *Atmospheric factors responsible for heavy autumn rains in Tunisia: case of rainy events in September and November 2020*

Tunisia is characterized by a Mediterranean-type of rainfall regime. It is marked both by a great interannual and inter-seasonal irregularity in rainfall volumes, by the importance of inter-season rains as well as by the frequency of extreme rainfall events. These extreme rains are sometimes prolonged in time, of high intensity and cumulate very high daily rainfall totals. These specific pluviometric features often expose Tunisia to the risk of extreme climatic events.

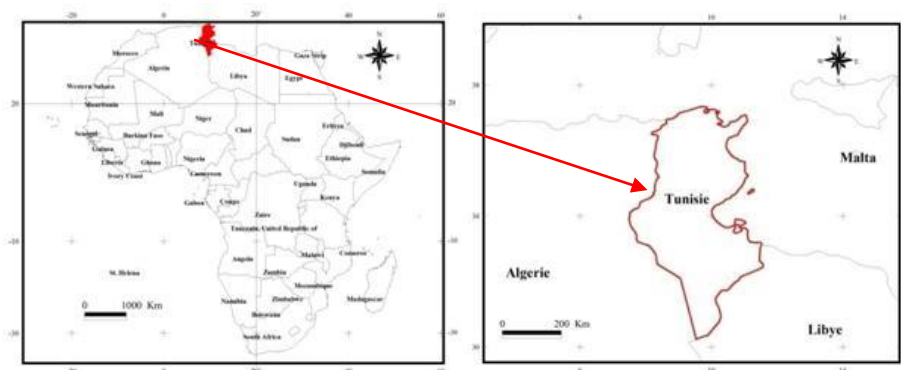
In this case, during the fall of 2020 (from September 12 to 14 and from November 18 to 21, 2020), particular atmospheric situations were very favorable to the fall of heavy rains in Tunisia in several regions, with cumulative rainfall significant in excess of monthly norms. These exceptional rains caused the wadis to overflow rapidly and the towns and fields to flood. These days were very difficult for the inhabitants: extensive material damage deeply affected infrastructure, service establishments and homes.

This work seeks to study the atmospheric factors responsible for the two rainfall events, first to identify the characteristics of atmospheric circulation and the trajectories of rainfall clouds, then the characteristics of the spatial distribution of rainfall accumulations in the affected regions of Tunisia. This study refers to daily rainfall data collected from the National Institute of Meteorology (I.N.M).

**Keywords**: Atmospheric factors, heavy rains, 12-14 September, 18-21 November 2020, Tunisia.

## Introduction

En Tunisie (Fig. 1), le risque inondation est devenu de plus en plus grave surtout en milieu urbain. Les villes tunisiennes sont majoritairement exposées à ce fléau (Mejebri A., 2010, Fehri N., 2014 ; Hmercha H., 2016 ; Nasrallah W., 2019...). Ceci, est dû essentiellement à l'étalement illégal du tissu urbain au profit des chemins naturels des cours d'eau.



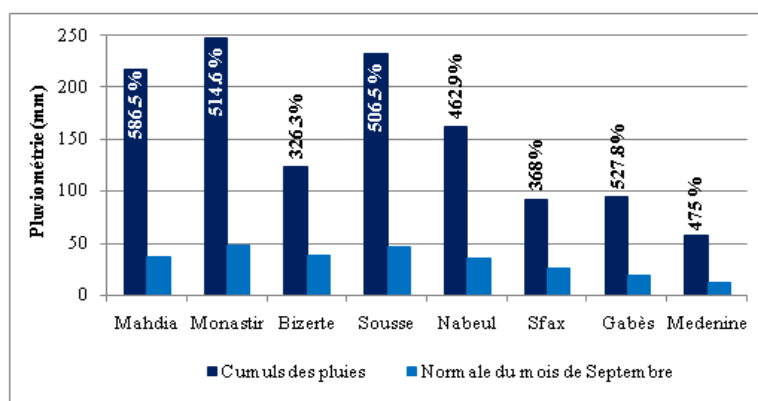
**Fig. 1 : Localisation de la Tunisie dans le continent africain**

En automne 2020, deux épisodes pluvieux ont marqué la Tunisie et la pluie a été généralisée. Plusieurs régions ont été touchées par les inondations surtout les régions de Sahel au Centre-est du pays où les quantités pluviométriques journalières ont dépassé les 120 mm, l'exemple de la ville de Chebba à Mehdiya. Dans ce travail, nous tenons d'abord à étudier les quantités des pluies enregistrées et leurs rapports avec les normales pluviométriques mensuelles. En second lieu on présentera les mécanismes atmosphériques responsables de ces fortes pluies. Puis, finalement, on se propose de dégager les principales conséquences de ces deux épisodes pluvieux.

## **I –Des pluies exceptionnelles et des records par rapport aux normales pluviométriques mensuelles**

### **1- L'évènement pluvieux du 12 au 14 septembre 2020**

Les pluies du 12 au 14 septembre 2020 ont marqué essentiellement la bande littorale est du pays, de Bizerte et Nabeul au Nord-est à Gabès et Medenine au Sud-est passant par la région du Sahel (Sousse, Monastir et Mahdia) au Centre-est. Les cumuls pluviométriques ont dépassé largement les moyennes du mois du septembre (Fig. 2). Le rapport à la normale du mois de septembre<sup>15</sup> dépasse 500% dans les stations du Sahel et semble aussi important dans le reste des stations avec des valeurs (3 à 4 fois plus).



**Fig. 2 : Rapport entre les cumuls des pluies du 12 au 14 septembre 2020 et les normales pluviométriques du mois de septembre.**

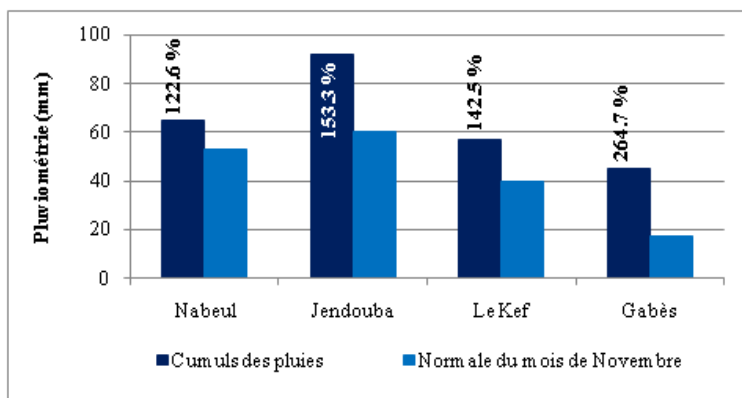
(Source des données brutes : Institut National de la Météorologie et <https://fr.climate-data.org/>).

### **2- L'évènement pluvieux du 18, 20 et 21 novembre 2020**

Les abats des eaux précipitées le 18, 20 et 21 novembre 2020 sont dispersés. Ils intéressent essentiellement le Nord-ouest du pays notamment Jendouba et le Kef, le Nord-est précisément Nabeul et la région du Sud-est, à Gabès. Les cumuls des pluies enregistrés à ces stations varient

<sup>15</sup>Les normales pluviométriques mensuelles sont puisées du site "<http://www.climate-data.org/>" est sont calculées pour la période 1882-2012.

entre 45 et 92 mm. Par rapport à la normale du mois de Novembre l'excédent des pluies oscille entre 122.6% à Nabeul et 264.7% à Gabès (Fig.3).



**Fig. 3 : Rapport entre les cumuls des pluies du 18,20 et 21 novembre 2020 et les normales pluviométriques du mois de novembre.**

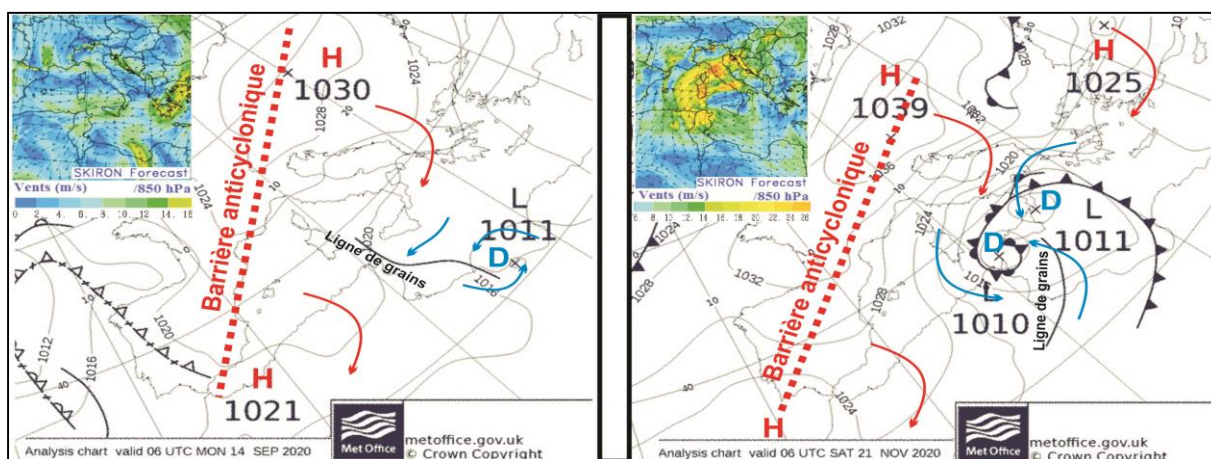
(Source des données brutes : Institut National de la Météorologie et <https://fr.climate-data.org/>).

## II – Facteurs atmosphériques responsables des fortes pluies : analyse synoptique

On s'intéressera, à ce niveau, d'étudier les situations atmosphériques en surface et en altitude responsables des fortes pluies des 14 septembre et 21 novembre 2020, respectivement les jours les plus marquants des deux épisodes pluviométriques.

### 1- Situation atmosphérique en surface

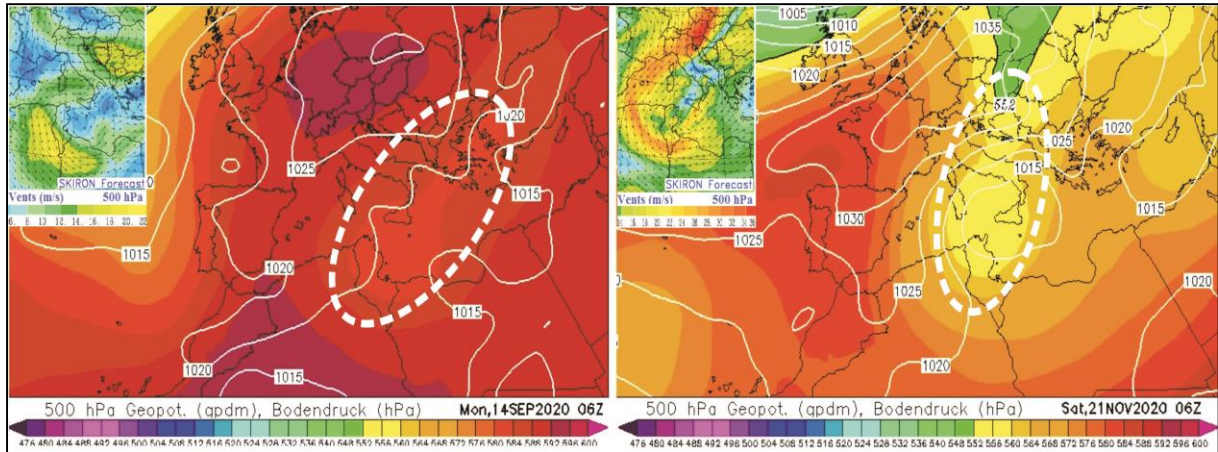
En surface, un champ de hautes pressions allongé du sud-ouest vers le nord-est. Il domine l'Atlantique tropical, l'Europe et l'Asie centrale. Les valeurs au centre, pendant les deux jours, sont de 1021 à 1039 le hPa (Fig. 4a et 4b). Le mouvement de l'air dans le sens horaire favorise un flux nord-est d'air froid d'origine continentale, le long du flanc méridional de cette barrière anticyclonique (*circulation azonale de composante est*). Cet air froid envahit directement la rive nord de la Méditerranée orientale. Cependant, la mise en place de la dépression en Méditerranée centrale, où l'air circule dans le sens antihoraire, le rabat vers l'Italie, le Sud-est de la France puis vers la Sardaigne et la Tunisie notamment le 21 novembre 2020 : C'est un flux d'est dévié vers le Sud puis vers le Nord (Fig. 4b).



**Fig. 4a et 4b :** Situation atmosphérique en surface du 14 septembre 2020 à 06h00 (à gauche) et du 21 novembre 2020 à 06h00 (à droite). Source : <https://www.meteo60.fr/> et <http://forecast.uoa.gr/forecastnew.php>.

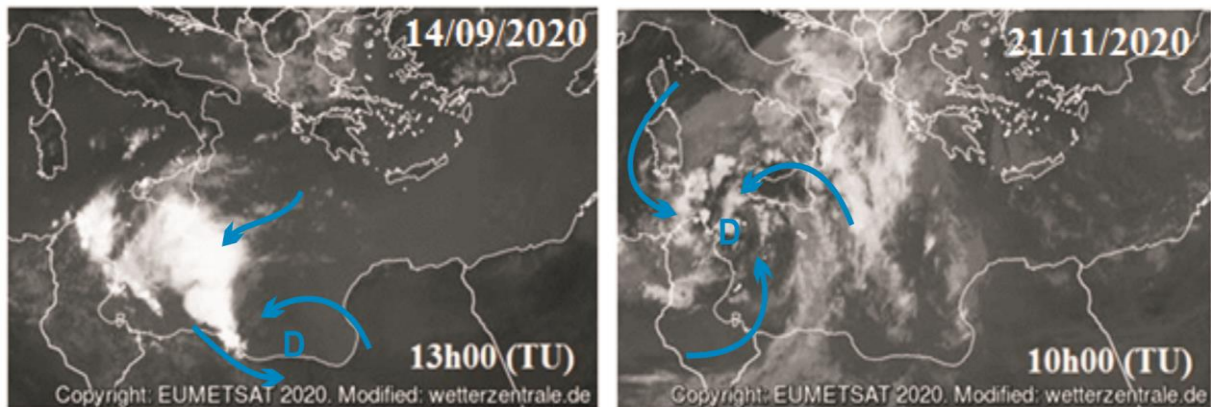
### 2- Situation atmosphérique en altitude

La surface isobarique (500 hPa) le 14 septembre 2020 est à 584 décamètres sur la Méditerranée occidentale mais avec une baisse relative sur la Tunisie (à 576 décamètres) : c'est une légère goutte d'air froid. Cette dernière se voit plus nettement le 21 novembre 2020 (556 décamètres) sur la Méditerranée centrale. Le courant-Jet (vents à 500hPa) se déplace sur Tunisie du côté est et nord-est avant qu'il l'en contourne de l'Ouest et du Sud (Fig. 5a et 5b).



**Fig. 5a et 5b** : Situation atmosphérique en altitude du 14 septembre 2020 à 06h00 (à gauche) et du 21 novembre 2020 à 06h00 (à droite). Source : <https://www.wetterzentrale.de> et <http://forecast.uoa.gr/forecastnew.php>.

La giration de l'air en altitude (rotation des vents en altitude sur la Tunisie) avec une vitesse très importante favorise les ascendances thermoconvectives qui peuvent atteindre rapidement les hautes couches de la troposphère. Ces propriétés sont très opportunes à la formation des cellules orageuses pluvieuses (Fig. 6a et 6b) : nuages d'orages (Cb).



**Fig. 6a et 6b** : Système nuageux du 14 septembre 2020 à 13h00 (à gauche) et du 21 novembre 2020 à 10h00 (à droite). Source : <https://www.wetterzentrale.de>

### III – Aperçu sur les conséquences des fortes pluies de septembre et novembre 2020

Les dégâts occasionnés sont essentiellement matériels. Le 21 novembre 2020, on a enregistré, à Tunis, une stagnation des eaux pluviales dans les zones basses avec des hauteurs qui dépassent par endroits le 1 mètre. Ces eaux ruisselées gênent d'une part la circulation (Fig. 7a) et pénètrent d'autre part dans les commerces et les maisons (Fig. 7b).



**Fig. 7a et 7b :** Stagnation des eaux pluviales près de la station de 20 Mars à Tunis (à droite) et à la gare du train Tunis Marine (à gauche) le 21-11-2020 gêne la circulation.

(Source : <https://www.businessnews.com.tn/en-photos--des-quartiers-de-la-capitale-sous-les-eaux>)

La circulation du métro a connu une perturbation sur les lignes de métro n° 4, 1 et 6 en raison de l'accumulation d'eau de pluie, notamment dans les tunnels de BabAlioua et du Bardo. Les usagers des routes ont été interdits d'utiliser les routes et avenues : de tous les croisements de la place cité El-Khadra, les places de BabSaâdoun et du Bardo et aussi la station TGM.

Lundi le 14 Septembre 2020, suite à un communiqué de la part des gouverneurs de Sousse et de Monastir le travail et les cours ont été suspendues dans les établissements étatiques et privés du gouvernorat de Sousse tout l'après midi de 13h30 à 17h30 : Les eaux de pluie ont envahi plusieurs maisons à Sousse, notamment aux cités Boukhezer, Bir Chebek, Laâouina et El Menchia. Plusieurs situations ont nécessité l'intervention des agents de la protection civile pour pomper l'eau et déboucher les avaloirs (Fig. 8a, 8b et 8c).



**Fig. 8a, 8b et 8c :** Quartiers submergés (à gauche), rues inondées (au milieu) à la ville de Sousse et intervention des agents de la protection civile pour déboucher les avaloirs et pomper l'eau à la ville d'Akouda (à droite) suite aux inondations du 14-09-2020

(Source : <https://www.tunisienumerique.com/https://www.realites.com.tn/2020/09/inondations-a-sousse-photos/>)

Au gouvernorat de Sousse, une crue des oueds Bliban et Leya a été enregistrée, suite aux quantités importantes de pluie. À la ville d'Akouda et suite au débordement de l'Oued Kamoundes routes ont été coupées (route 48) à la circulation automobile avec un niveau d'eau qui a atteint 0.5 mètre de haut par endroits (Fig. 9b). Le lendemain, à Monastir, un bus destiné pour transporter les employées a été inondé dans un oued de la région d'Âmira (Fig. 9a).



**Fig. 9a et 9b :** Un bus destiné pour transporter les employés a été inondé le 15 septembre 2020 dans un oued de la région d'Âmira à Monastir (à droite) et route coupée à la circulation automobile à la ville d'Akouda suite aux inondations du 14-09-2020 avec un niveau d'eau qui a atteint 0.5 mètre de haut par endroits (à gauche).

Source : [www.sahelvtv.tn](http://www.sahelvtv.tn)

## Conclusion

La détermination des facteurs atmosphériques responsables des fortes pluies est indispensable pour bien étudier l'événement climatique en amont. Dans cette étude, quoique sommaire, l'analyse des situations atmosphériques en surface et en altitude ainsi que l'évolution des systèmes nuageux nous a permis de bien comprendre les quantités importantes des pluies enregistrées en aval.

Les dégâts occasionnés sont essentiellement matériels. Ceci, peut être expliqué par le vieillissement de l'infrastructure de bases, le manque d'entretien et surtout le sous-dimensionnement voire même l'inexistence des canaux d'évacuation des eaux pluviales.

Cette vulnérabilité matérielle est l'une parmi d'autres types de vulnérabilités qui permettent d'aggraver le risque inondation. Une étude minutieuse de ce type de fléau à l'échelle de toute la Tunisie est devenue une nécessité. Ceci, en travaillant sur une échelle plus fine et en combinant plusieurs critères naturels et anthropiques, notamment : La vulnérabilité, les enjeux, l'aléa et la capacité d'adaptation.

## Bibliographie

- Abdelkhalek A., 2015 : Les très fortes pluies à risques dans la Tunisie centrale : cas de l'événement du 22 et 23 septembre 2009. *In Contribution à l'étude des aléas et des risques climatiques en Tunisie*, FSHS, pp. 61-66.
- Dallel J., 2015 : Les pluies à risques en Tunisie. *In Contribution à l'étude des aléas et des risques climatiques en Tunisie*, FSHS, p. 33-59.
- El Melki T., 2014 : Climatologie dynamique de la Tunisie. *FLAH de la Manouba*, 438 p.
- Fehri N., 2014 : L'aggravation du risque d'inondation en Tunisie : éléments de réflexion. *Physio-Géo*, vol 8, pp. 149-175.
- Henia L. et El Melki T., 2000 : Circulation de « Retour d'Est » et pluies diluviennes sur la Tunisie orientale. *In Publications de l'AIC*, vol. 13, pp. 120-127.
- Hmercha H., 2016 : *Les risques d'inondation dans le bassin de Sfax*, Thèse de doctorat en Géographie, Faculté des Lettres et Sciences Humaines de Sfax, 291 p.
- Mejbri A., 2010 : *Le ruissellement en milieu urbain : Cas du bassin versant de la sebka d'Essijoumi*, DEA, F.L.A.H de la Manouba, 176 p.
- Nasrallah W., 2019 : *Hydroclimatologie des zones urbaines dans les villes de Kairouan et de Sidi Bouzid: Approche intégrée du risque inondation*, Thèse de doctorat en Géographie, Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis et Université de Paul-Valéry Montpellier III, 274 p.

# IMPACT DE L'URBANISATION SUR LA TEMPERATURE DE SURFACE DE LA TERRE (LST) A MARRAKECH (MAROC)

Nasraoui Rh. et Sghir S.

*Laboratoire management territoire communication et modélisation, Faculté polydisciplinaire de Khouribga  
Université Sultan Moulay Slimane  
rhita.nasraoui@gmail.com ; sghirs@yahoo.fr*

**Résumé :** *L'urbanisation et le développement non planifié ont entraîné une dégradation généralisée de l'environnement dans les grandes villes du monde. Le problème est aigu dans nombreuses agences locales urbaines à forte densité et soumis à un développement économique rapide. Dans ce travail, une tentative a été faite pour examiner les changements spatiaux et temporels dans la croissance urbaine et les réponses la Température de Surface de la Terre (LST) dans la ville de Marrakech. Pour améliorer l'efficacité de l'utilisation des terres, la rénovation urbaine doit également tenir compte des climats urbains et des îlots de chaleur. La présente recherche est basée sur l'interprétation manuelle de l'imagerie satellitaire à haute résolution pour comprendre les changements de la LST.*

**Mots clés :** *Changement climatique, température de surface, indices spectraux, Marrakech.*

**Abstract:** *Urbanization and unplanned development have led to widespread environmental degradation in the world's major cities. The problem is acute in many high-density and rapidly developing local urban agencies. In this work, an attempt was made to examine the spatial and temporal changes in urban growth and the responses to the Earth's surface temperature (LST) in the city of Marrakech. To improve the efficiency of land use, urban renewal must also take into consideration urban climates and heat islands. The present research is based on the manual interpretation of high-resolution satellite imagery to figure out changes in Earth surface temperature (LST).*

**Keywords:** *Climate change; surface temperature, urban heat islands (UHI), spectral indices, Marrakesh*

## Introduction :

Les études du climat urbain ont acquis une grande importance ces dernières années en raison de la croissance rapide de l'urbanisation dans les zones urbaines.

L'effet îlot de chaleur urbain (ICU), ou urbain heatisland (UHI), peut être défini comme des valeurs de températures plus élevées dans les zones urbaines que dans les zones rurales environnantes (Amir Siddique et al. 2020). Les études sur les ICU sont importantes pour le climat urbain, la planification urbaine, la santé et le confort des personnes qui vivent en ville (Colombert et al. 2012).

La taille de l'effet ICU peut varier en fonction du modèle LU/LC (Land-Use/land-Cover), de la structure de la ville, de la taille de la ville, des variations saisonnières, du contexte environnemental, de l'ingénierie urbaine, de la topographie et de l'emplacement de la zone (Aslan et Koc-San 2016). Cette étude se concentre sur l'analyse des températures de surface à Marrakech à l'aide de données de la télédétection (Shojaei et al. 2017; Silva et al. 2018).

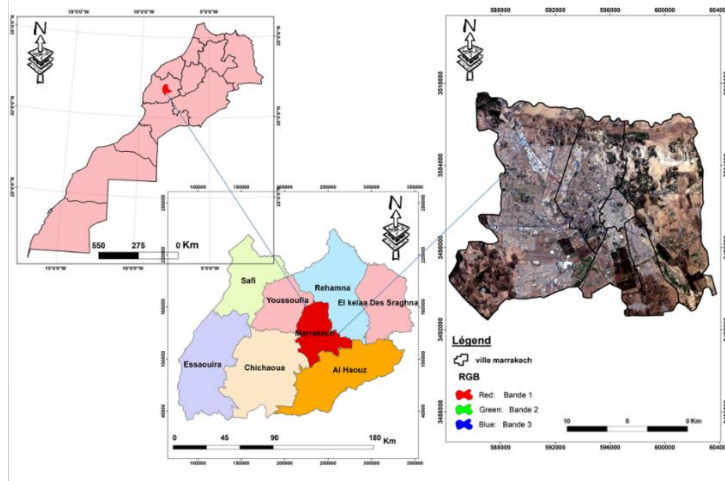
Cette technique offre la possibilité de caractériser et de suivre l'évolution du microclimat des villes, en calculant la température de surface, ou Land Surface Température (LST), par conversion infrarouge. L'étude vise à estimer l'effet de l'urbanisation à Marrakech en 1998, 2014 et 2020. Les LST des trois journées analysées seront comparées. Les différences moyennes sont liées aux conditions météorologiques non identiques entre les 3 journées sélectionnées, voir à l'heure de passage des satellites si celles-ci varient. Mais les évolutions des structures spatiales peuvent être mises en relation avec l'évolutif de l'occupation du sol.

## 1. Données et méthodes

### 1.1. Zone d'étude

La zone d'étude est limitée à la ville de Marrakech entre les longitudes 8,14° et 7,88° ouest et les latitudes 31,72° et 31,53° nord. Elle est située, dans la plaine du Haouz centrale, une

plaine uniforme s'inclinant doucement selon une pente d'environ 8% orientée du Sud-Est vers le Nord-Ouest depuis la cote 460m NGM (Niveau Général de la Mer) jusqu'à la cte 380 m NGM (Oued Tensift). Les seuls reliefs sont constitués par les Jbels (collines), Guéliz et Koudiat al Abid. La ville de Marrakech se situe dans la région de Marrakech-Safi qui s'étend sur une superficie de 230 km<sup>2</sup> et compte 1,5 millions d'habitants (RGPH2 2014), soit une densité de 6521 hab. /km<sup>2</sup>. Elle est limitée au Nord-Est par la province de Rehamna, au Sud-Est par la province d'Al Haouz, au Sud-Ouest par la province de Chichaoua, et au Nord-Ouest par la province de Youssoufia.



**Figure 1. Carte de situation de la zone étudiée (Marrakech, Maroc)**

### ***1.2. Données utilisées***

Les images multi-dates fournies par les satellites Landsat TM 5 et OLI/TIRS 8 de la NASA ont été utilisées pour calculer la LST et les indices NDVI (NormalizedDifferenceVegetation Index) et NDBI (NormalizedDifferenceBuilt-up Index). Ces images ont été téléchargées gratuitement sur le site de l'USGS (United States Geological Survey) : <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

Les images avec une couverture nuageuse inférieure à 10 % ont été exploitées, images prises au cours des mois de Juin 1998, 2014 et 2020.

### ***1.3. Méthodologie***

La présente étude a utilisé l'algorithme de Mono-Window développé par Qin et al. (2001) pour calculer la LST et générer les cartes de LST à partir des images satellites Landsat infrarouge thermique avec une résolution spatiale de 100 m et 120 m.

La LST est un paramètre important pour formuler des interactions surface-atmosphère. La LST dépend des roches, du sol, de la couverture végétale, des modes d'utilisation des terres et du climat local. Dans cet article, le travail majeur est la détermination de l'effet de l'urbanisation sur la LST à Marrakech. La bande rouge corrigée par l'atmosphère et la bande NIR (Near-InfraRed) sont utilisées pour le calcul de l'indice normalisé de la végétation de la différence normalisée NDVI afin d'extraire la LST (Li et al. 2018 ; Naserikia et al. 2019). Le NDVI est un indicateur numérique qui utilise les bandes visibles proches de l'infrarouge du spectre électromagnétique ; il est adopté pour analyser les mesures de la télédétection et évaluer si la cible observée contient ou non de la végétation verte vivante (Hassani et al. 2020).

L'indice de construction par différence normalisée NDBI utilise les bandes NIR et SWIR (Short WaveInfrared) pour mettre en valeur les zones bâties fabriquées.



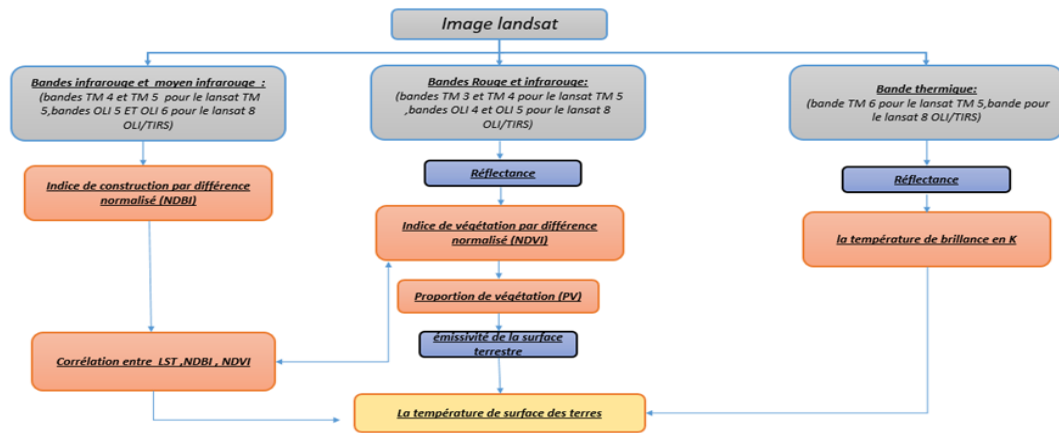


Figure 2. Chaîne de traitement décrivant la méthodologie de travail suivie pour l'extraction de la LST à partir des images Landsat

## 2. Résultats et discussion

### 2.1. Modèle spatio-temporel de la dynamique LU/LC

La figure 3 présente les cartes LU/LC de Marrakech, on peut en extraire le tableau 1 qui montre l'évolution des superficies construites et de végétations dans en juin 1998, 2014 et 2020. On remarque que la superficie construite présente 45,00 km<sup>2</sup> en 1998 passant à 62,5317 km<sup>2</sup> en 2014 pour atteindre 89,0129 km<sup>2</sup> en 2020. Selon le tableau 1, on note que la diminution de la couverture de la végétation qui passe de 62,76 km<sup>2</sup> en 1998 à 48,45 km<sup>2</sup> en 2020.

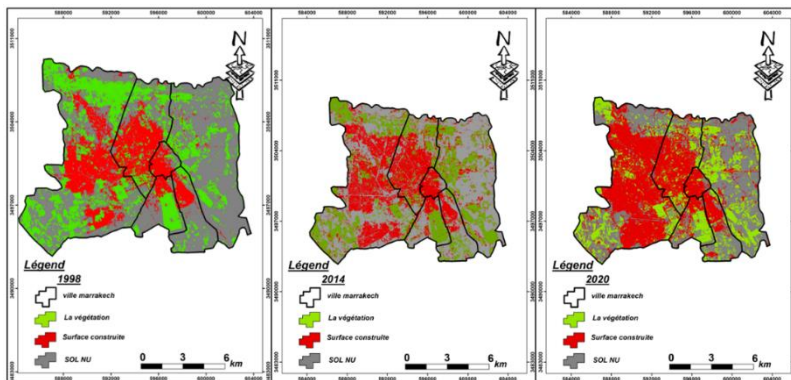


Figure 3. Dynamique spatiale de l'utilisation des terres / couverture des terres LU/LC à Marrakech

Tableau 1 : La proportion de terres urbaines, de couvert végétal et de sol dans la zone d'étude

13/06/1998			09/06/2014			09/06/2020		
LU/LC	Superficie en km <sup>2</sup>	%	LU/LC	Superficie en km <sup>2</sup>	%	LU/LC	Superficie en km <sup>2</sup>	%
Surface construite	45,00	20%	Surface construite	62,53	28%	Surface construite	89,01	40%
La végétation	62,76	28%	La végétation	56,26	25%	La végétation	48,65	22%
Sol NU	114,34	51%	Sol NU	103,33	47%	Sol NU	84,45	38%
<b>Totale</b>	<b>222,11</b>	<b>100%</b>	<b>Totale</b>	<b>222,13</b>	<b>100%</b>	<b>Totale</b>	<b>222,13</b>	<b>100%</b>

### 2.2. Distribution spatiale et temporelle du LST

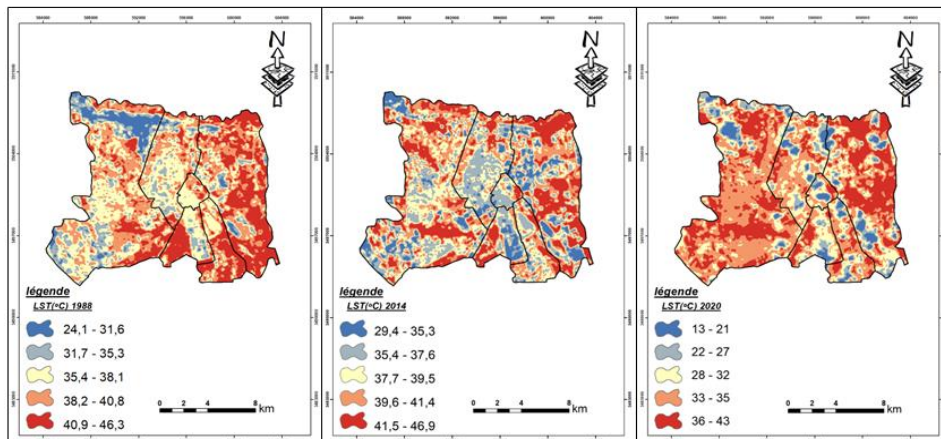


Figure 4. Dynamique de la LST à Marrakech 1998 ; 2014 ; 2020

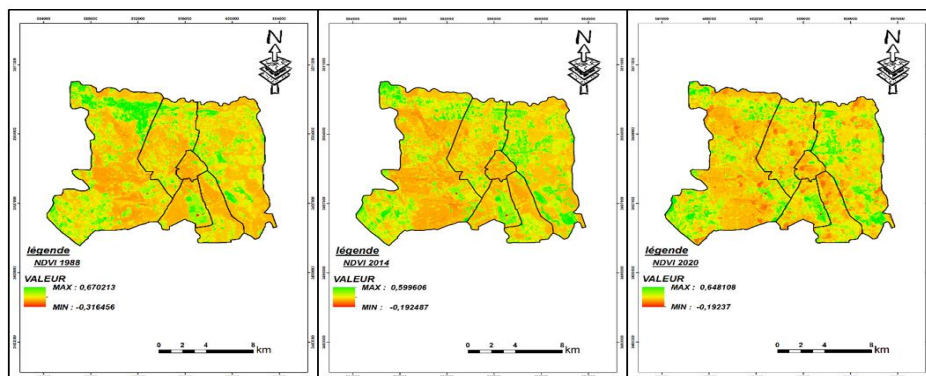


Figure 5. Dynamique de NDVI à Marrakech

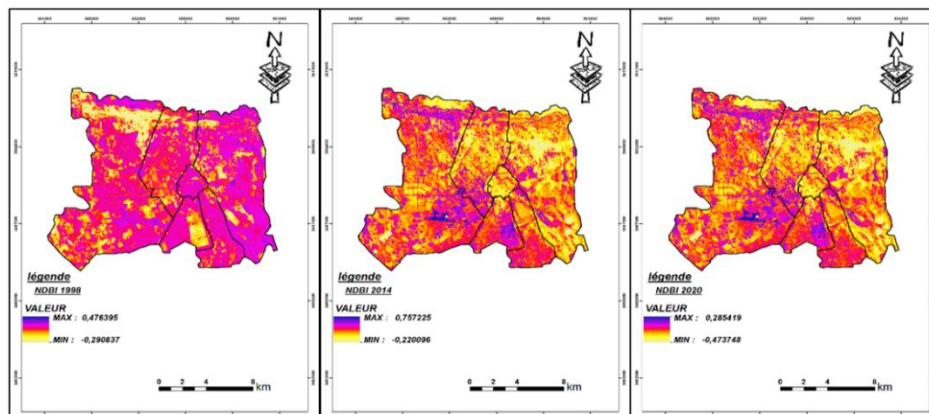


Figure 6. Dynamique de NDBI à Marrakech

La LST de la zone d'étude a été calculée avec des valeurs minimales et maximales de 46,3° à 24,1 °C en 1998, 29,43 à 46,89 °C en 2014 et 13° à 43 °C en 2020. Les LST moyennes de la zone d'étude étaient de 38,2 °C, 39,03 °C et 32 °C le 13 juin 1998 à 10 :42, le 09 juin 2014 à 11 :03, et le 09 juin 2020 à 11 :03, respectivement (Tableau 2). Ces différences sont imputables aux conditions météorologiques observées lors de ces trois journées.

Le 09 juin 2014 et le 09 juin 2020, les LST élevées se concentrent dans toutes les zones urbaines denses, zones touristiques et les zones industrielles comme le montrent les cartes de la LST en 2014 et 2020 comparées à celle de la LST du 13 juin 1998.

**Tableau 2 : Détails du calcul de LST, NDVI et NDBI en 1998, 2014 et 2020.**

Date	LST				NDVI				NDBI			
	MAX	MIM	Moyenne	Écart-type	MAX	MIM	Moyenne	Écart-type	MAX	MIM	Moyenne	Écart-type
13/06/1998	46,3	24,1	38,2	3,47	0,670	-0,31645	0,085	0,126	0,476	-0,2908	0,180	0,09
09/06/2014	46,89	29,42	39,03	2,56	0,599	-0,19248	0,148	0,092	0,757	-0,2201	0,135	0,08
09/06/2020	43	13	32	5,2	0,648	-0,1923	0,131	0,084	0,285	-0,4737	-0,027	0,06

D'après le tableau 2 et la figure 4, le NDVI à Marrakech pour les 3 journées de juin des années 1998, 2014 et 2020 présente une diminution dans les valeurs maximales et minimales au cours de la période de 1998 à 2020. Cela montre que la couverture de la végétation a connu une diminution de 22,48 % entre 1998 et 2020 (tableau1).

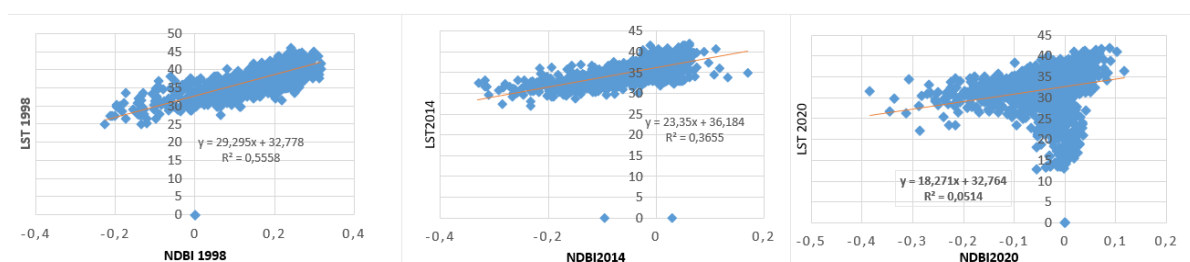
Le NDBI a une valeur en 1998 supérieure à celle de 2014 et 2020 (tableau2). En 1998 les sols nus représentaient 51% de la superficie totale de la ville de Marrakech qui se caractérise par un climat très sec durant l'été. Nous pouvons expliquer la valeur maximale de NDBI par la présence des sols nus très chauds et très secs.

### 2.3.Corrélation entre LST, NDVI et NDBI

Le développement de la relation entre NDBI et LST a montré un lien direct entre les deux indicateurs lors de trois journées (1998, 2014 et 2020) de juin (figure 7).

Les résultats de NDBI et LST et la température maximale dans les zones bâties ou urbaines ont montré beaucoup de changements dans la géographie de la LST. D'où  $R^2 = 0,5558$  pour 1998,  $R^2 = 0,3655$  pour 2014 et  $R^2 = 0,0514$  pour 2020.

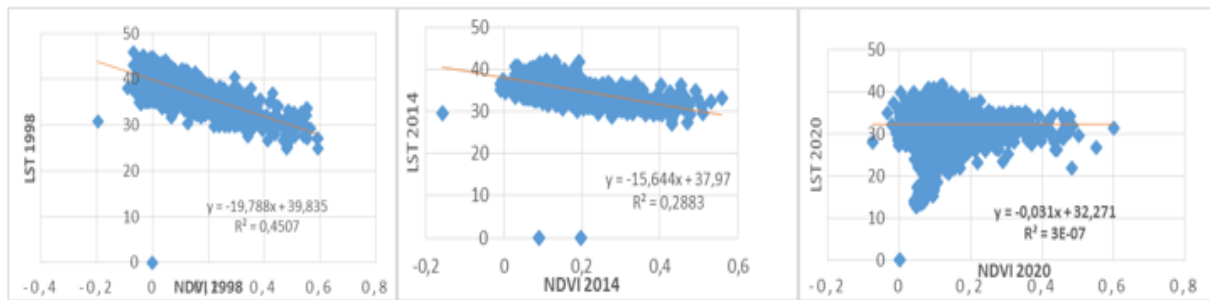
La relation positive entre NDBI et LST indique que les zones bâties génèrent de nombreux changements dans la LST. Cela est dû à l'expansion urbaine entre 1998 et 2020. Le NDBI est principal contributeur à l'émergence d'ICU.



**Figure 7. Corrélation entre NDBI et la LST (juin 1998, 2014 et 2020)**

La relation entre NDVI et LST lors de trois journées de Juin (1998, 2014 et 2020) a montré une corrélation négative avec les coefficients de régressions  $R^2 = 0,4507$ ,  $R^2 = 0,2883$  et  $R^2 = 3.10^{-7}$  (figure 8).

La présence d'espaces verts réduit la LST dans la ville. Une végétation saine joue un rôle clé dans la réduction de la LST dans les villes, de sorte qu'on peut suggérer que le NDBI ne peut pas seulement être utilisé pour l'analyse et la prévision du LST, mais peut également être utilisé pour cartographier des ICU, températures de surface et non de l'air, dans n'importe quelle zone et fournir une base fiable pour la construction et la planification urbaines.



**Figure 8. Corrélation entre NDVI et LST dans la période de l'étude (1998, 2014 et 2020)**

## CONCLUSIONS:

Cette étude a permis de caractériser l'évolution de l'urbanisation sur la température de surface de la terre dans la ville de Marrakech entre 1985 et 2020.

Les résultats du changement LU / LC montrent que les zones bâties ont considérablement augmenté de 45 km<sup>2</sup> à 89,012 km<sup>2</sup> entre 1998 et 2020. Ainsi, la majeure partie des sols nus et la couverture végétale ont été converties en zones bâties.

Les résultats ont montré une association négative significative entre la moyenne LST et le NDVI, tandis qu'une corrélation positive a été trouvée entre la moyenne LST et NDBI pour tous les pas de temps.

## Bibliographies

Amir Siddique, M., Dongyun, L., Li, P., Rasool, U., Ullah Khan, T., Javaid Aini Farooqi, T., Wang, L., Fan, B., Rasool, M.A., 2020: Assessment and Simulation of Land Use and Land Cover Change Impacts on the Land Surface Temperature of Chaoyang District in Beijing, China . *PeerJ* 8: e9115.

Aslan N., Koc-San D., 2016: Analysis of relationship between urban heat island effect and land use / cover type using landsat 7 etm+ and landsat 8 oli images. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLI-B8: 821-828.

Colombert, M., Salagnac, J.-L., Morand, D., Diab, Y., 2012: Le climat et la ville : la nécessité d'une recherche croisant les disciplines. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* (Hors-série 12). <http://journals.openedition.org/vertigo/11811> (7 juin 2021).

Hassani, N., Lebaut, S., Drogue, G., Sghir S., 2020: Evolution spatio-temporelle de températures de surface diurnes dans l'aire métropolitaine de Metz à partir de données Landsat. *The XXXIIIème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie* <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-02934907> (7 juin 2021).

Li, H., Meier, F., Lee, X., Chakraborty, T., Liu, J., Schaap, M., Sodoudi, S., 2018: Interaction between Urban Heat Island and Urban Pollution Island during Summer in Berlin. *The Science of the Total Environment* 636 : 818-828.

Naserikia, M., Asadi Shamsabadi, E., Rafieian, M., Leal Filho, W., 2019: The Urban Heat Island in an Urban Context: A Case Study of Mashhad, Iran. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16(3): 313.

Qin, Z., Karnieli, A., Berliner, P., 2001: A Mono-Window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat TM Data and Its Application to the Israel-Egypt Border Region. *International Journal of Remote Sensing* 22(18) : 3719-3746.

Shojaei, P., Gheysari, M., Myers, B., Eslamian, S., Shafieiyoun, E., Esmaili, H., 2017: Effect of Different Land Cover/Use Types on Canopy Layer Air Temperature in an Urban Area with a Dry Climate . *Building and Environment* 125: 451-463.

Silva, J.S., Silva, R.M., Santos, C.A.G., 2018: Spatiotemporal Impact of Land Use/Land Cover Changes on Urban Heat Islands: A Case Study of Paço Do Lumiar, Brazil . *Building and Environment* 136: 279-292.

# RENFORCEMENT DE LA RESILIENCE DES ECOSYSTEMES OASIENS DANS LE SUD TUNISIEN : CAS DE L'UTILISATION DES EAUX DE DRAINAGE POUR L'IRRIGATION DE LA CULTURE DE JONC DANS L'OASIS DE DOUZ

Karbout N.<sup>1</sup>, Ardhaoui K.<sup>1</sup> et Moussa M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut des Régions Arides Mednine, Tunisia, Email :nissaf.karbout@yahoo.fr mohamed.moussa@ira.rnrt.tn ardhaouikaouther@gmail.com

**Résumé :** Ce travail est basé sur une étude expérimentale dans le but de Caractériser les eaux de drainage de l'oasis de la région de Douz afin de le réutiliser pour l'irrigation de culture du jonc et de mettre en disponibilité le jonc pour les artisans de la région durant toute l'année. Nous avons réalisés deux enquêtes, une a ciblé environ 33% du total des agriculteurs de l'oasis de Douz pour remplir les questionnaires individuels sur l'utilité de drain pour les agriculteurs et l'autre a été mené au saint des artisans qui utilise la Jonc comme matière primaire dans la région de Kébili dans le gouvernorat d'Istiftimi et Douz et la région Djerba.

Les résultats physico –chimiques et microbiologiques obtenus montrent que l'eau d'irrigation et de drainage est de bonne qualité, et qu'ils peuvent être valorisée. de plus, pour les analyses du sol les résultats des analyses physicochimiques ont montré que ce sol est légèrement gypseux non salé a peu salé de pH neutre à légèrement alcalin pauvre en matière organique.

Ensuite, Nous avons fait une parcelle expérimentale dans lequel nous avons planté le jonc et l'irrigué par l'eau de drainage. Les Caractéristique morphologique du jonc ont montrés que la longueur de jonc planté est bien améliorée par rapport au jonc spontané.

**Mots clés :** oasis, Douz, drain, parcelle expérimentale, jonc

**Abstract :** This work is based on an experimental study with the aim of characterizing the drainage water of the oasis of the Douz region in order to reuse it for the irrigation of rush cultivation and to make the rush available for the artisans of the region throughout the year.

We carried out two surveys, one targeted around 33% of the total farmers of the oasis of Douz to complete the individual questionnaires on the utility of the drain for the farmers and the other was carried out to the saint of the craftsmen who uses the Rush as a primary material in the Kébili region in the governorate of Istiftimi and Douz and the Djerbaregion. The physicochemical and microbiological results obtained show that the irrigation and drainage water is of good quality, and that they can be valued. Moreover, for soil analyzes, the results of physicochemical analyzes have shown that this soil is slightly gypsum unsalted to little salt of neutral pH to slightly alkaline low in organic matter.

Then, we made an experimental plot in which we planted the rush and irrigated it with drainage water. The morphological characteristics of the rush showed that the length of the planted rush is much improved compared to the spontaneous rush.

**Keywords:** oasis, Douz, drain, experimental plot, rush

## 1. Introduction

La région de Kébili appartient à la partie sud-ouest de la Tunisie. Elle couvre une superficie approximative de 22900 km<sup>2</sup>, bordée au Nord par la chaîne montagneuse de chott El Fejj et à l'Ouest par Chott El Djérid. Elle est limitée au sud par le Grand Erg oriental qui forme la limite septentrionale du Sahara (Kadri et Van Ranst, 2002). La situation géographique de Kébili lui confère un climat aride. Elle est soumise à l'influence du climat continental, froid en hivers et chaud en été et située dans l'étage saharien à hivers frais. Les précipitations sont rares et irrégulières et prennent un caractère orageux, les moyennes annuelles sont de l'ordre de 90mm. Les oasis de la région de Kébili avec leurs différents étages forment un micro climat différent du milieu environnant où la température est plus basse, l'humidité est plus élevée et la violence des vents moins ressentie (Fig.1).

Le gouvernorat de Kébili, bien qu'il appartienne à la zone saharienne en bonne partie, est riche en ressources hydrauliques qui sont évaluées annuellement à 236,1 millions de mètres cubes.

Les systèmes d'irrigation sont conçus, construits et exploités de manière à couvrir le déficit des besoins en eau des cultures. Néanmoins, peu d'efforts sont parfois exercés dans l'estimation des besoins en eau des cultures pour le but de conception, le fonctionnement et la gestion des systèmes d'irrigation (Meier et al, 2003). Les auteurs ont déclaré que les systèmes d'irrigation du palmier dattier diffèrent selon un certain nombre d'aspects, y compris la source d'eau, sa disponibilité et de sa qualité, le type de sol et de sa topographie, les conditions climatiques, la population active et l'âge du palmier. Devant l'extension de la surface oasienne, l'exploitation

de l'eau pour l'irrigation est amélioré de 663Mm<sup>3</sup> en 1985 jusqu'à 1705 Mm<sup>3</sup> en 2015 soit 119%.

Dans le sud tunisien, l'accroissement des surfaces irriguées suite à la mobilisation accrue des eaux de nappes profondes peu renouvelables s'accompagne de graves problèmes d'engorgement et de salinisation qui, s'ils ne sont pas maîtrisés, fragilisent le système oasien et peuvent conduire à des problèmes écologiques. Dans ce contexte, le rejet des eaux de drainage généralement chargées en sels se pose avec acuité dans les oasis continentales tunisiennes. Différentes solutions techniques sont préconisées pour limiter les problèmes de rejet des eaux de drainage : réduire les pertes d'eau d'irrigation, valoriser les eaux de drainage, ou rejeter les eaux de drainage vers un autre système et les concentrer. (Rejili et al.2003).

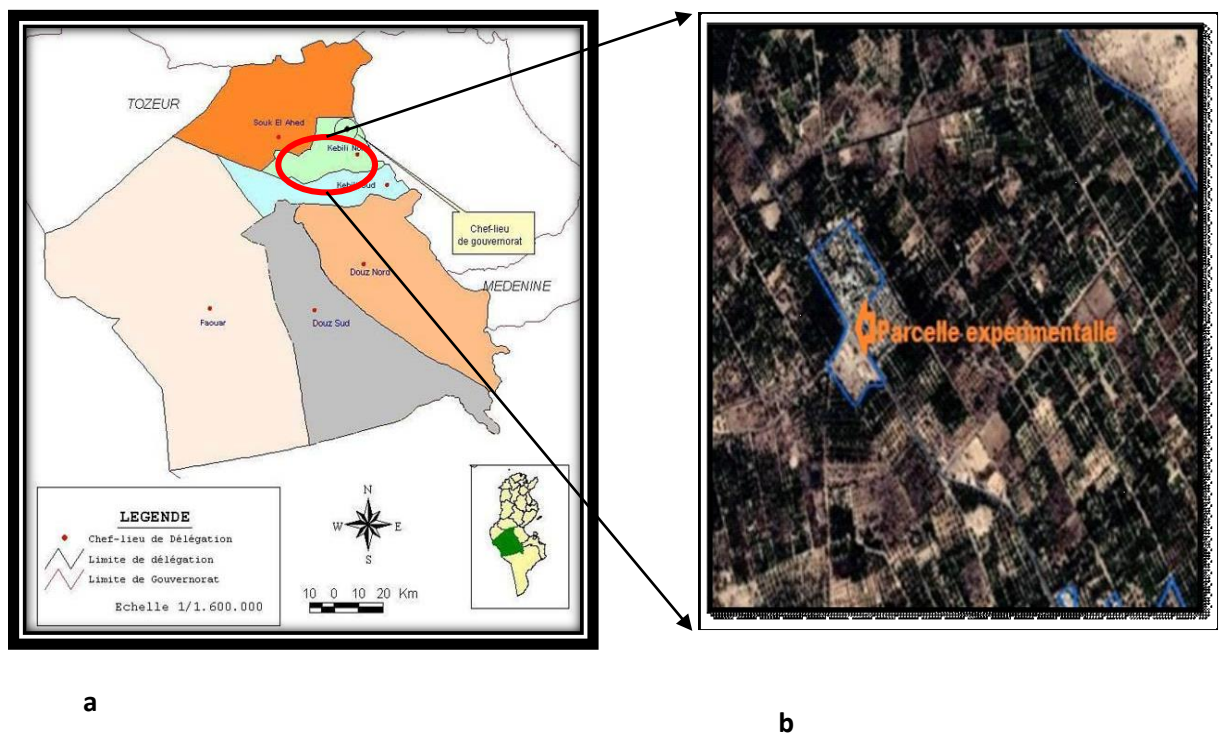
D'autres part dans notre zone d'étude Ilya une plante qui est bien développée à la bordure de drain c'est le jonc qui est un habitant typique des lieux ouverts et ensoleillés, frais et humides, des zones tempérées froides du monde entier ; certaines espèces tolèrent cependant les sols plus ou moins secs. Nous avons fait des enquêtes sur l'utilisation de jonc et nous avons remarquées qu'il y a un problème de disponibilité de cette plante pour les artisans, Pour cela, notre objectif dans ce travail est la valorisation de l'eau de drainage et la culture de jonc, une plante recherchée dans les domaines de l'artisanat.

## 2. Matériel et Méthodes

### 2.1. Site de l'étude

La parcelle expérimentale a été installée dans une oasis traditionnelle de la région de Douz au Sud de la ville de Kébili au Sud de la Tunisie.

La sélection de l'oasis comme étude de cas était basée sur deux raisons logiques, la première raison est que l'oasis est à la bordure d'un drain fonctionnel. La deuxième raison est que l'oasis est facilement accessible par l'équipe qui a mené le travail de terrain (discussion de groupe et enquêtes auprès des agriculteurs).



L'oasis est de superficie d'un hectare caractérisé par la présence de trois étages cultural (Palmier dattier, arboriculture et culture herbacé).

À la bordure de l'oasis il y a un drain fonctionnel valorisé par l'agriculteur pour l'irrigation. La plante du jonc (*Juncus*) est bien développée dans la zone d'étude à la bordure de la direction d'écoulement du drain.

## 2.2. Préparation de la parcelle expérimentale

Pour la préparation de la pépinière du jonc on fait les étapes suivantes :

Le désherbage de la parcelle expérimentale, puis labour après l'installation de drain au milieu de parcelle expérimentale et le relier avec le drain principale pour diminuer les pertes d'eau.

Puis on a fait le labour de la parcelle et préparation des plots, ensuite on a fait l'installation des brises vents pour conserver notre mini-pépinière et on a fait le repiquage du jonc et enfin on a mis en place de réseau d'irrigation et la plantation de la Jonc.

## 3. Résultats et discussion

### 3.1. Historique de l'utilisation de la Jonc

Comme illustre-la figure 2et après un discours très attractif avec les artisans, ils ont affirmé que l'utilisation de la Jonc pour l'artisanat est une pratique traditionnelle, dans notre cas le plus ancien artisan a commencé son travail avec la jonc depuis 1996 et le plus récent est depuis 2009.

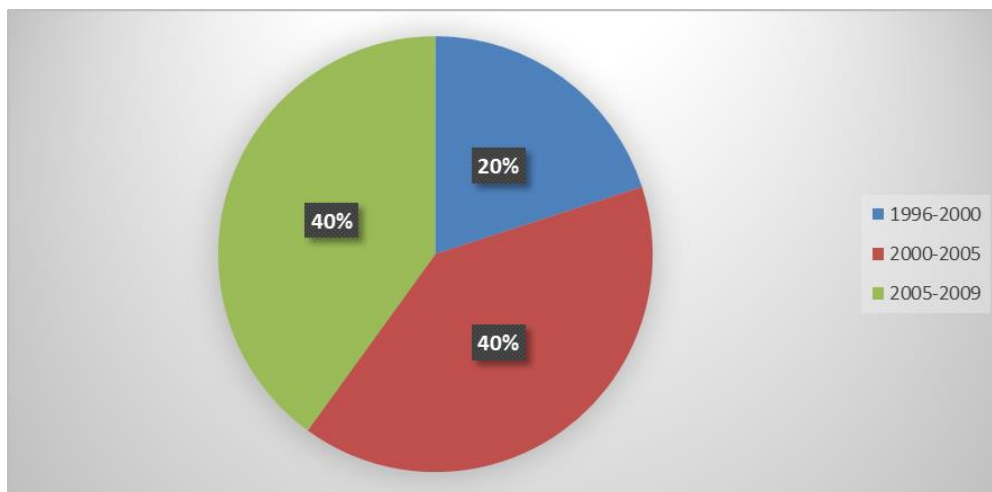
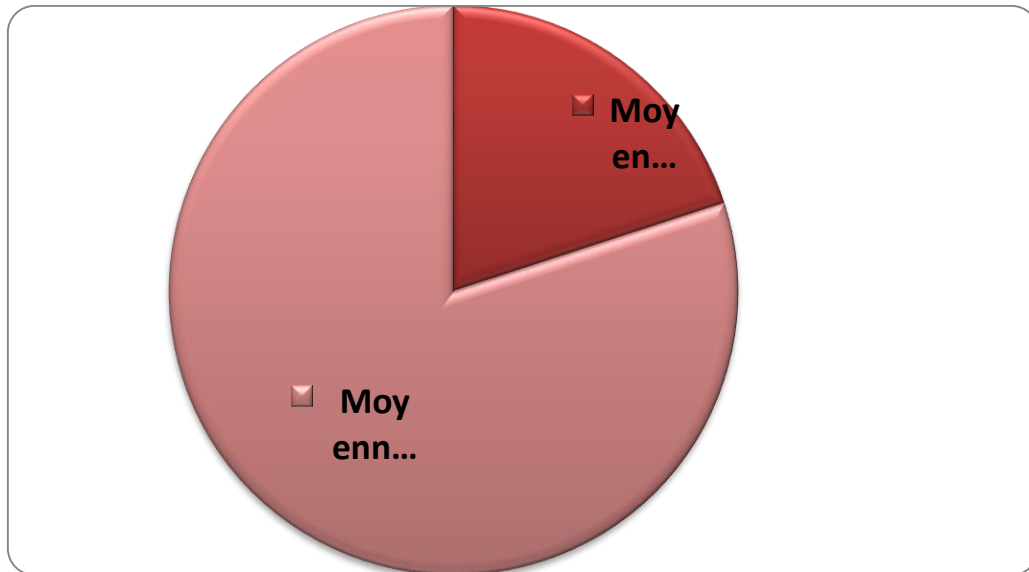


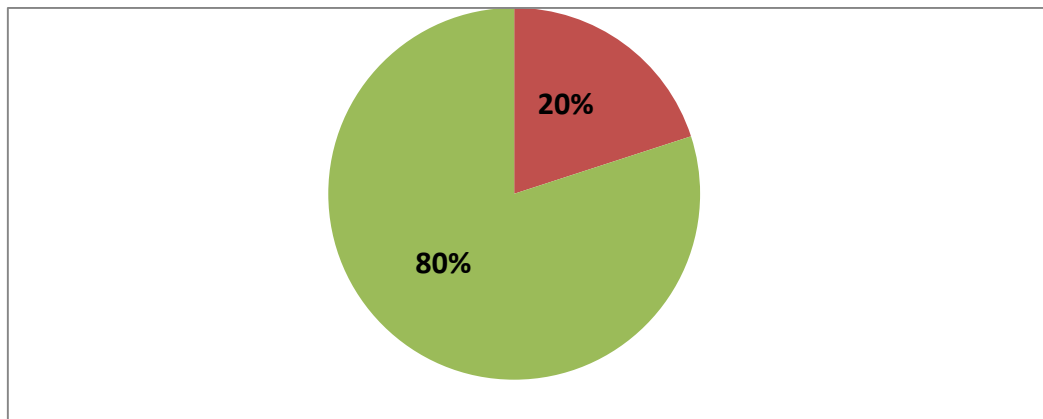
Figure 2.Historique de l'utilisation de la culture de Jonc à l'oasis de Douz

Mais malgré leur importance dans le domaine artisanal, comme montre la figure 3, les artisans 80% souffrent du manque de la Jonc, et il y a des artisans qui ont affirmé qu'ils ont perdu des marchés commerciaux à cause de non disponibilité de la matière première.



**Figure 3 . Avis des artisans sur la disponibilité de la matière première de Jonc à l'oasis de Douz**

Les besoins des artisans peuvent atteindre 1000 mètre du jonc par saison. On a décidé alors faire la culture de la Jonc et on la irrigué par les eaux de drainage pour mettre en disponibilité la jonc pour les artisans et en même temps réutilisé les eaux de drainage perdu. Comme illustre la figure 4, 18, 20% seulement des agriculteurs enquêtés utilisent les eaux de drainage pour l'irrigation, 80% utilise les eaux d'irrigation normale.



**Figure 4. l'utilisation des eaux de drainage par les agriculteurs oasiens**

Et tant que les drains sont en bonne état et fonctionnel alors cela nous encouragé à faire une mini pépinière du jonc. Les artisans ont affirmés que le temps de récolte de jonc est entre le mois de mai et juin.

### ***3.2. Caractéristiques physico-chimiques du l'eau de drainage***

Le tableau 1 montre que l'eau d'irrigation et l'eau de drainage ont un pH semblable basique qui est respectivement 8.49 et 8.37, la salinité est moyennement élevée pour les eaux de drainage par rapport à l'eau d'irrigation, leur teneur est de l'ordre de 17.1g/l pour les eaux d'irrigation et 22.5 pour les eaux de drainage. Pour le bilan ionique, une faible différence est observé au niveau des eaux de drainage par rapport aux eaux d'irrigation au niveau des ions indicateurs de salinité talque le chlorure la sodium. Dans ce contexte Wahba et al,2016 ont affirmé que l'utilisation des eaux de drainage pour l'irrigation n'a pas un effet néfaste sur le sol et les plante.



Tableau 1. Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau d'irrigation et de drainage

l'eau analysée	pH	CE (ms/cm)	RS (g/l)	CI (még/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (még/l)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (még/l)	Ca <sup>+</sup> Mg (mg/l)	k <sup>+</sup> (mg/l)	Na <sup>+</sup> (mg/l)
Eau d'irrigation	8,49	8,38	17.1	66	2,3±0,04	0	50±0,33	3,98±0,4	10,45±0,4
Eau de drainage	8,37	13,23	22.5	104,6±0,8	6,6±0,04	6,6±0,04	68,1±0,3	10,14±08	15,30±0,4

Selon les normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation, la valeur limite de coliformes fécaux est 1000/100 ml. Après l'analyse pour l'eau d'irrigation il n'y pas des résultats positifs donc d'après le tableau 3 le nombre des coliformes fécaux est inférieur à 3 par 100 ml. Pour l'eau de drainage, le nombre des résultats positifs est de l'ordre (2, 0,1) d'après les analyses Il y a 14 coliformes fécaux par 100 ml.

### 3.3. Caractéristique du jonc planté

Selon les avis des artisans, la flexibilité de jonc planté est très bonne par rapport au jonc spontané. De plus, la longueur de jonc irrigué est bien amélioré par rapport au jonc spontané. Les plantes du jonc irrigué sont bien développées.

## 4. Conclusion

Les résultats des analyses physicochimiques ont montré que les caractéristiques physicochimiques de l'eau d'irrigation et de drainage sont comprises dans des intervalles proches des normes internationales retenues pour l'eau.

Les analyses microbiologiques effectuées sur les prélèvements ont révélé une absence totale des germes pathogènes (salmonelle et Vibrions colorique) et la présence de faible quantité des coliformes fécaux tel que les nombres de coliformes fécaux est inférieur à 3 chez l'eau d'irrigation et présence de 14 coliformes fécaux chez l'eau de drainage.

A la lumière des résultats obtenus au cours de ce travail, nous pouvons conclure que l'eau d'irrigation et de drainage est de bonne qualité physico-chimique ainsi que bactériologique.

Les résultats obtenus permettent d'affirmer que les eaux de drainage peuvent être valorisées, leurs caractéristiques physicochimiques leur confèrent un potentiel d'utilisation.

Nous avons fait une parcelle expérimentale après on a fait l'installation de drain au milieu de parcelle et le relier avec le drain principale pour diminuer les pertes d'eau ensuite on a fait la plantation du jonc. La flexibilité de jonc planté est très bonne par rapport au jonc spontané.

Il sera intéressant de valoriser le jonc dans des autres domaines pharmaceutiques et cosmétiques.

### Référence :

- Kadri, A., and Van Ranst, E. 2002 : Contraintes de la production oasienne et stratégies pour un développement durable. Cas des oasis de Nefzeoua (Sud tunisien). *Science et changements planétaires/Sécheresse* **13**, 5-12.
- Meier – Ploeger, A., and Vogtmann, H. 2003:Qualitätsaspekte der DungungmitBioabfallkompost. *Journal of AridEnvironmentsIn:64. Informationsgesprach des ANS e. V. Die Zukunft der GetrennsammlungvonBioabfallen, 20JahrenBiotonneWitzenhausenlineStandortbestimmung.*, 225-238.
- Rejili, M., Mahdhi, M., Fterich, A., Dhaoui, S., Guefrachi, I., Abdeddayem, R., and Mars, M., 2012: Symbiotic nitrogen fixation of wild legumes in Tunisia: Soil fertility dynamics, field nodulation and nodules effectiveness. *Agriculture, Ecosystems&Environment***157**, 60-69.
- Wahba, M., 2016: *Assessment of Options for the Sustainable Use of Agricultural Drainage Water for Irrigation in Egypt by Simulation Modelling.*

# ESSAI DE MODELISATION DE LA CONCENTRATION DES PARTICULES DE LITHOMETEORES LIEES AU VENT DU KHAM SIN A DJIBOUTI VILLE.

NourAyeh M.<sup>(1)</sup> et Liban A. <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Université de Djibouti, Bd de Gaulle, site 3, BP 1904, Moustapha\_nour\_ayeh@univ.edu.dj

<sup>(2)</sup>Agence nationale de la météorologie de Djibouti, Route de l'aéroport, libansou@gmail.com

**Résumé :** La localisation géographique de Djibouti l'expose à un vent très sec venant du désert Afar appelé khamsin. Ce vent a la particularité de charrier beaucoup de particules de poussière et s'abat sur Djibouti durant l'été. Pourtant, faute d'études du phénomène, nous ne connaissons pas la variation saisonnière de la dégradation de la qualité de l'air due au khamsin, ni même le type et la concentration de particules (PM<sub>10</sub> / PST). Nous avons donc utilisé des modèles mathématiques recourant à la visibilité horizontale pour faire une première évaluation de la pollution par lithométéores. Pour faire nos calculs, nous avons utilisé les données relatives à la visibilité horizontale, de l'agence nationale de la météorologie de Djibouti (ANM), pour l'ensemble de l'année 2019. Cela donne plus de 710 valeurs de la visibilité horizontale nous permettant d'avoir une évaluation des PST et des PM<sub>10</sub> quotidiens avec les modèles susmentionnés. Les résultats de nos calculs donnent une grande inégalité entre les saisons. Pour les PST, la moyenne annuelle dépasse les 270 µg.m<sup>-3</sup> (en utilisant le modèle de Bertrand). La moyenne des mois d'été monte à 368 µg.m<sup>-3</sup>, et ne descend jamais à moins de 195µg.m<sup>-3</sup>. Alors qu'en 1979, pour les PST, l'OMS, dans ses directives sur la qualité de l'air, a établi les limites maximales à ne pas dépasser à 90 µg.m<sup>-3</sup>. Pour le PM<sub>10</sub>, la moyenne annuelle s'établit à 173µg.m<sup>-3</sup> à la station de Djibouti. Et la aussi, les mois d'été dépassent les 200 µg.m<sup>-3</sup>. Une concentration quotidienne de 150 à 425 µg.m<sup>-3</sup> indique une qualité de l'air malsaine à très malsaine. Nos résultats montrent qu'à Djibouti, 90.1 % des jours présentent, au moins un moment, une concentration en PM<sub>10</sub> supérieure au seuil de 150 µg.m<sup>-3</sup>. Les résultats de notre modélisation indiquent que l'air de Djibouti est pollué par les lithométéores. Le khamsin renforce, de juin à août, considérablement cette pollution.

**Mots-Clés :** Djibouti, lithométéores, pollution de l'air, modélisation

**Abstract-**Djibouti's geographical location exposes this town to a very dry wind from the Afar desert called khamsin. This wind has the particularity of carrying a lot of dust and hits Djibouti during the summer only. However, due to the lack of studies of the phenomenon, we do not know the seasonal variation in the degradation of air quality due to khamsin, nor even the type and concentration of particles (PM<sub>10</sub> / PST). We therefore used mathematical models using horizontal visibility to make a first assessment of pollution by lithometers. To do our calculations, we used data relating to horizontal visibility, from the Djibouti National Meteorological Agency (ANM), for the whole of 2019. This gives more than 710 horizontal visibility values. allowing us to have a daily PST and PM<sub>10</sub> assessment with the aforementioned models. The results of our calculations show a great inequality between the seasons. For TSPs, the annual average exceeds 270 µg.m<sup>-3</sup> (using Bertrand's model). The average for the summer months rises to 368 µg.m<sup>-3</sup>, and never drops below 195 µg.m<sup>-3</sup>. Whereas in 1979, for TSPs, the WHO, in its air quality guidelines, established maximum limits not to be exceeded at 90 µg.m<sup>-3</sup>. For PM<sub>10</sub>, the annual average is 173µg.m<sup>-3</sup> at the Djibouti station. And again, the summer months exceed 200 µg.m<sup>-3</sup>. A daily concentration of 150 to 425 µg.m<sup>-3</sup> indicates unhealthy to very unhealthy air quality. Our results show that in Djibouti, 90.1% of days have, at least for a moment, a PM<sub>10</sub> concentrations above the threshold of 150 µg.m<sup>-3</sup>. The results of our modelling indicate that the air of Djibouti is polluted by lithometers. The khamsin considerably strengthens this pollution from June to August.

**Keywords:** Djibouti, lithometers, air pollution, modelling

## Introduction

Les préoccupations en matière de pollution de l'air font souvent ressortir l'impact du phénomène dans les régions développées, car les pollutions étudiées se focalisent sur celles issues de l'industrie (dioxyde d'azote, suie, transport...). Pourtant, une autre forme de pollution pose des problèmes. C'est la concentration des particules minérales, nommées « lithométéores », dans l'atmosphère. Ces particules peuvent rendre l'air toxique et réduisent la visibilité en formant des brumes sèches. Les rares travaux menés en Afrique font ressortir une concentration dangereuse de lithométéores dans l'air pour les régions sahéliennes (Ozer, 2004 ; Diagne, 2018).

Djibouti (à 11,5° lat N) s'est développée dans une zone sèche à cause de sa situation d'abri par rapport aux alizés. Cette localisation géographique l'expose à un vent très sec venant de la dépression Afar appelé khamsin<sup>16</sup>. Ce vent rabat sur cette ville une grande quantité de

<sup>16</sup> De l'arabe 50, parce que les anciens avaient observé que ce vent du désert durait environ 50 jours.

lithométéores durant la saison chaude (de juin à août). Pourtant, scientifiquement nous connaissons mal ce phénomène et sa dangerosité, faute d'études. Ainsi, l'impact du khamsin sur la qualité de l'air, son ampleur et intensité, la concentration de particules (PM10 / PST) sont encore largement méconnus. Autant de questions qui sont l'objet même de cet article.

## 1. Matériel et méthode

### 1.1 Les données et les modèles

Pour évaluer la concentration de lithométéores dans l'air, nous avons utilisé des modèles mathématiques (Tableau 12), tous recourant à la visibilité horizontale, définie par l'OMM comme la distance maximale à laquelle un observateur peut voir et identifier un objet situé à proximité du plan horizontal où il se trouve lui-même. Les premiers (celui de Bertrand ou Ben Mohamed par exemple) évaluent la concentration de particules en suspension totale (PST). Le modèle d'Almeida s'intéresse plus aux particules de taille inférieure à 10 microns (PM10).

**Tableau 12 : quelques modèles d'évaluation des lithométéores**

PST	$C = 1356 VV^{-1,05}$	modèle de Bertrand
	$C = 1339,84 VV^{-0,67}$	modèle de Ben Mohamed
	$C = 1500 VV^{-1}$	modèle de Bayoko-Fodang
PM10	$C = 914,06 VV^{-0,73} + 19,03$	modèle de D'Almeida

Pour faire nos calculs, nous avons utilisé les données relatives à la visibilité horizontale, de l'agence nationale de la météorologie de Djibouti (ANM), pour l'ensemble de l'année 2019 où nous avons les valeurs quotidiennes (maximales, minimales). Cela donne plus de 710 valeurs de la visibilité horizontale nous permettant d'avoir une évaluation des PST et des PM10 quotidiens avec les modèles susmentionnés. Les données de visibilité et les modèles mathématiques ont été intégrés à Excel pour automatiser les calculs.

### 1.2 Le Khamsin

Le Khamsin, «Cinquante en arabe »,souffle approximativement sur une période de cinquante jours. Ildébut généralement à la mi-juin et se dissipe vers la fin août début septembre, mais il ne souffle pas d'une manière continue. La force du khamsin et sa fréquence sont fluctuantes d'année en année et même d'une semaine à l'autre. Il prend sa source en Éthiopie. Les hautes terres éthiopiennes font obstacle aux alizés consécutifs à la remontée de la convergence intertropicale. Les vents parcourent le désert (la dépression afar) avant de s'abattre sur la ville de Djibouti, réduisant drastiquement la visibilité (Figure 48). Le khamsin accompagne un vent de faibles intensités (10-15 km/h) à modérées (15-40 km/h) est le plus fréquent le khamsin fort est plutôt rare, néanmoins on mesure quelques fois 50-60 km/h avec des pointes à 70 km/h ou plus, occasionnant des dégâts sur les toits, les arbres, poteaux électriques, etc....

On dénote deux grandes directions dominantes de ce vent. Le khamsin de régime SO (Sud-Ouest) à Ouest, quivient généralement des zones de hautes plaines d'Éthiopie, ce vent sec est réputé pour être très poussiéreux surtout le matin avec une température plus fraîche, mais qui augmente progressivement pour atteindre son pic à partir de 10 h. Le khamsin de NNW (Nord-Nord-Ouest) à la différence du régime de Sud-ouest transporte moins de particules de sable, mais il possède la spécificité d'être plus sec, chaud et brûlant.

**Figure 48: Djibouti, journée à khamsin**



Photo personnelle prise le 17 juillet 2017 au matin

## **2. Résultat et interprétation**

Les résultats de nos calculs donnent une grande inégalité entre les saisons. Après le calcul de la moyenne annuelle pour avoir une grandeur générale, nous nous intéressons par l'intensité et la variabilité de la pollution de l'air durant l'année.

### **2.1 Les Particules en Suspension totale (PST)**

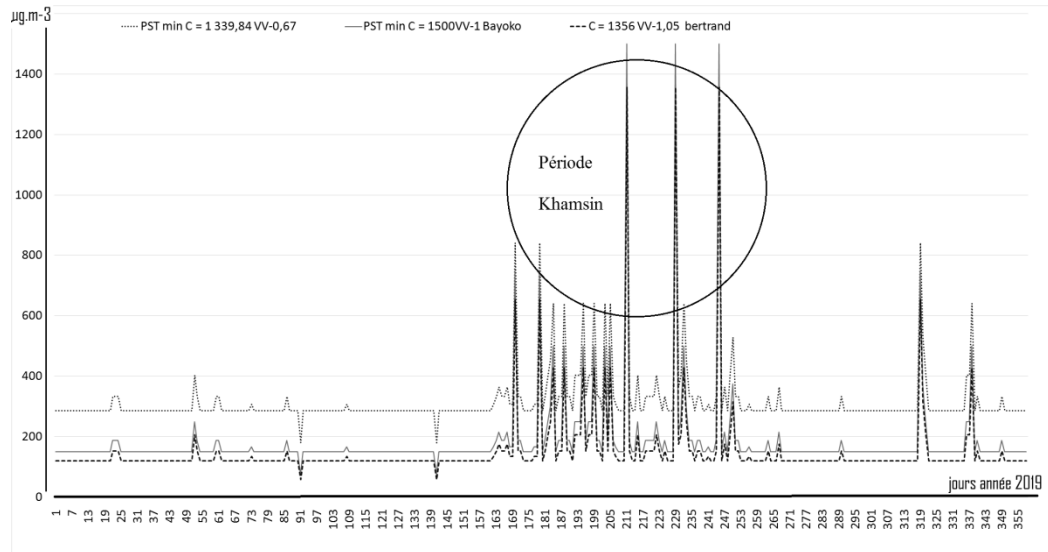
Pour les PST, la moyenne annuelle fluctue selon les modèles de 113 à 264  $\mu\text{g.m}^{-3}$ , alors que Pr Ozer avait calculé 103  $\mu\text{g.m}^{-3}$  pour la station de Niamey. En s'intéressant au nombre de jours où la visibilité est constamment dégradée (soit supérieur à 90  $\mu\text{g.m}^{-3}$ ), une autre information apparaît. Cette valeur est obtenue en utilisant dans nos calculs, la visibilité maximale enregistrée de la journée, c'est-à-dire la meilleure visibilité, dans une journée. Selon les modèles choisis, la concentration de PST est délétère entre le quart et quasiment 100 % des jours. La pollution de l'air va donc au-delà des lithométéores générés par le khamsin.

**Tableau 13 . Les modèles utilisés**

	Nombre de jours critiques PST > 90 $\mu\text{g.m}^{-3}$ constamment	%
Modèle Bertrand	79	22
Modèle Bayoko	149	41
Modèle Ben Mohamed	357	99

Les saisons sont inégalement touchées par cette mauvaise qualité de l'air. En effet, la moyenne des mois d'été monte à 100 à 251  $\mu\text{g.m}^{-3}$  selon les modèles, en tenant compte de la visibilité maximale qui plus est. Cette moyenne ne descend jamais à moins de 195  $\mu\text{g.m}^{-3}$ , pour les autres mois de l'année. Durant les mois où souffle ce vent, la concentration en PST de l'air de la ville peut dépasser les 1800  $\mu\text{g.m}^{-3}$ , soit 20 fois la norme admise par l'OMS (Figure 49) à certains moments de la journée.

**Figure 49 . Particule en Suspension totale**



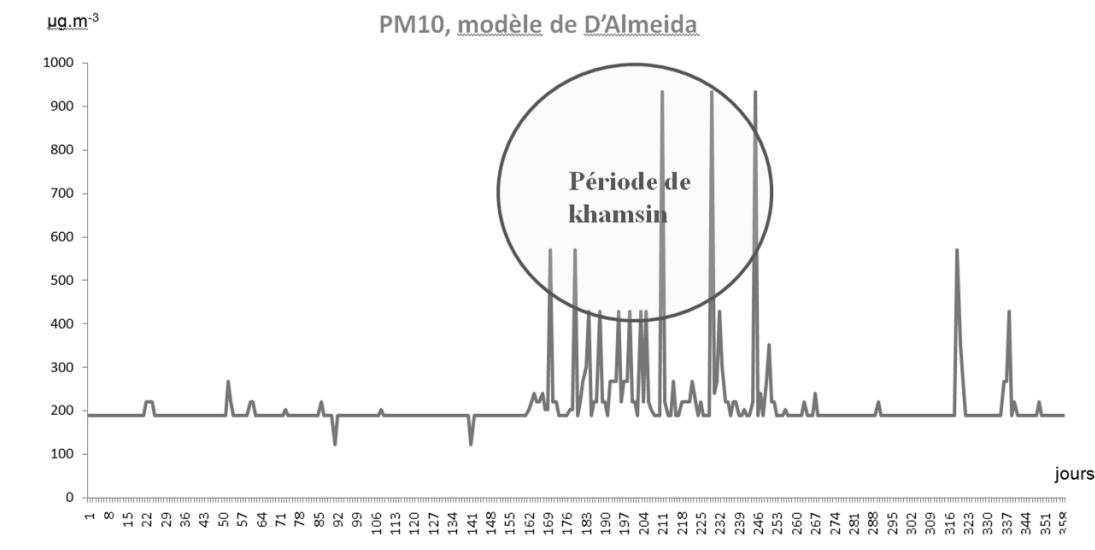
Alors qu'en 1979, pour les PST, l'OMS, dans ses directives sur la qualité de l'air, a établi les limites maximales à ne pas dépasser à 90  $\mu\text{g.m}^{-3}$ . 92 % à 100 % (selon les modèles) des jours présentent une concentration supérieure au seuil de 90  $\mu\text{g.m}^{-3}$ , au moins à un moment de la journée. Lorsque l'on considère la dégradation de l'air la plus importante chaque jour en faisant les calculs avec la visibilité minimale de chaque jour, la situation est encore plus dégradée. 100 % des jours connaissent au moins un moment avec une pollution dépassant les normes établies.

## 2.2 Les particules avec un diamètre inférieur ou égal à 10 $\mu\text{g}$ ( $\text{PM}_{10}$ )

L'étude des  $\text{PM}_{10}$  confirme les conclusions inquiétantes tirées des PST. La moyenne annuelle s'établit à 124  $\mu\text{g.m}^{-3}$  lorsqu'on calcule avec la visibilité maximale et à 199  $\mu\text{g.m}^{-3}$  (moyenne à Niamey 67  $\mu\text{g.m}^{-3}$ ). Nous sommes très loin des recommandations de l'OMS relatives à la qualité de l'air, qui situe le niveau moyen acceptable sur une année à 20. Si l'on ne tient compte que des jours constamment pollués, c'est-à-dire où la concentration ne descend jamais à moins de 150  $\mu\text{g.m}^{-3}$  pollution de l'air d'après le modèle d'Almeida, il y en a 79 jours. En revanche, une autre façon de voir la pollution est d'analyser les pics de pollution chaque jour. Pour notre cas, 90,1 % des jours présentent un pic de concentration en  $\text{PM}_{10}$  supérieure au seuil de 150  $\mu\text{g.m}^{-3}$ .

Et la aussi, les mois d'été dépassent les 237  $\mu\text{g.m}^{-3}$  alors que les mois les plus sains le niveau est largement inférieur à 150  $\mu\text{g.m}^{-3}$ . Et là, l'impact du khamsin est manifeste (Figure 50), la concentration de lithométéores dépassant les 900  $\mu\text{g.m}^{-3}$ . Les jours les plus dangereux de 2019, le 6 et 24 août et le 9 septembre.

**Figure 50. PM<sub>10</sub>, modèle d'Almeida, VV min**



A ce niveau de l'analyse, nous sommes en droit de nous interroger sur l'impact sanitaire possible d'une telle pollution de l'air aux lithométéores. Nous remarquons que l'air sain n'est jamais possible à Djibouti (Tableau 14). En revanche 96 % des jours présentent, au moins un moment de la journée, un air provoquant des irritations des voies respiratoires. Car ces jours peuvent avoir un niveau de PM<sub>10</sub> supérieur à 150, seuil responsable d'« irritation répandue des voies respiratoires de la population en bonne santé, déclenchement de certaines maladies, diminution de la tolérance en exercice physique chez les personnes en bonne santé » (P.Ozer, 2014). Les niveaux de pollution dangereux pour l'être humain parce qu'entraînant des décès sont atteints 1.69% des jours de 2019. Ces jours, sans surprises, se retrouvent lorsque le khamsin souffle durant l'été.

**Tableau 14 : pollution au PM<sub>10</sub> et risques sanitaires**

Niveau de pollution en PM <sub>10</sub> (µg.m <sup>-3</sup> )	Qualité de l'air	Effet négatif sur la santé	Djibouti (jours) %
0-50	Excellente	0	0
10-150	Moyenne	0	0
150-380	Malsaine	Irritation des voies respiratoires	96,5
380-420	Très malsaine	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Aggravation significative des symptômes des personnes sensibles</li> <li>✓ Irritation répandue des voies respiratoires des personnes normales</li> </ul>	0
420-500	Médiocre	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Déclenchement de certaines maladies des personnes sensibles,</li> <li>✓ Exercice physique difficile personnes en bonne santé</li> </ul>	2,25 (Juillet 1,7%)
> 500	Dangereuse	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Morts prématurés de personnes sensibles</li> <li>✓ Symptômes et maladies de personnes en bonne santé</li> </ul>	1,69 (Juin et août 1,2%)

Boubel RW, Fox DL, Turner DB, Stern AC, eds. Fundamentals of air pollution. London : AcademicPress, 1994 : 574, repris par Ozer, et complété avec les données djiboutiennes par les auteurs

## Conclusion

Les résultats de notre modélisation indiquent que l'air de Djibouti est pollué pratiquement toute l'année au moins un moment de la journée. La permanence de la pollution renvoie à ¼ des jours de l'année. Le khamsin renforce, de juin à août, considérablement cette pollution. Après cette première évaluation, plusieurs problèmes restent à étudier

Commenous l'avons montré la pollution de l'air va au –delà du khamsin. Il reste à connaître la nature de celle-ci. Ensuite, cette étude espère, sur le long terme, de prévoir si le réchauffement global se traduit par un renforcement du khamsin tant par son intensité que par sa durée sur l'année. Il faut donc des séries de données depuis au moins les années 60. Enfin, nous devons être en mesure de la morbidité engendrée par le khamsin en interrogeant les bases de données sanitaires durant le mois de khamsin et les comparer hors khamsin. Il est urgent de lancer un programme de recherche sur l'impact sanitaire de ce khamsin pour les populations de l'agglomération de Djibouti

## Bibliographie

- Ben Mohamed A, Frangi JP, Fontan J, Druilhet A, 1992: Spatial and temporal variations of atmospheric turbidity and related parameters in Niger. *J Appl Meteorol*, **31** : 1286-94
- Bertrand J. 1976 Visibilité et brume sèche en Afrique. *La Météorologie* ;**6** : 201-1
- Houmed I.A. .2018 : *Contribution à l'étude de prévisibilités des phénomènes de tempête des poussières a l'aéroport international de Djibouti*, mémoire de master, université d'Antananarivo, 179 p.
- M. Demba G, 2018 : Les lithométéores au Nord Sénégal : dégradation de la qualité de l'air, réduction de la visibilité horizontale et conséquences socio-économiques, *Pollution atmosphérique*, N°236, URL : <http://odel.irevues.inist.fr/pollution-atmospherique/index.php?id=6450>,
- D'Almeida GA, 1986 : A model for Saharan dust transport. *J Climate Appl Meteor*; **25**, 903-1
- Ozer P, 2005 : Estimation de la pollution particulaire naturelle de l'air en 2003 à Niamey (Niger) à partir de données de visibilité horizontale. *Environnement, Risques & Santé*, **4**, Numéro 1, 43-9

# L'IMPACT DES PROCESSUS NAO ET AMO SUR LA VARIABILITE DE L'UPWELLING AU LARGE DU MAROC

Ouattab M<sup>1</sup>, Charifi H<sup>1</sup>, Moustabchir R<sup>1</sup>, Amchghal M<sup>2</sup>, Hilmi K<sup>3</sup>, El Filali a<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Laboratoire de recherche matériaux et énergies renouvelables, Faculté des sciences Agadir. Université Ibn Zohr-Agadir. Maroc. m.ouattab20@gmail.com

<sup>2</sup> Direction Générale de la Météorologie (DGM), BP 8106-Casa Oasis ; Bd Mohamed Taïb Naciri Hay Hassani, Casablanca. Maroc.

<sup>3</sup> Institut National des Recherches Halieutiques (INRH), Bd Sidi Abderrahmane, aindiab, Casablanca. Maroc.

<sup>4</sup> Laboratoire de recherche en management territorial-communication et modélisation, Faculté Polydisciplinaire de Khouribga. Université Sultan Moulay Slimane, Beni Mellal. Maroc. filalihakim@gmail.com

**Résumé :** L'essor de la richesse halieutique au Maroc a suscité, ces dernières décennies, une accentuation de l'effort de recherche pour le suivi de l'état des pêcheries et la compréhension des enjeux de l'exploitation et de l'environnement marin, ainsi la compréhension du changement climatique ou plus encore la variabilité climatique et son éventuel impact sur la variabilité des ressources halieutiques au Maroc. Pour répondre à cette problématique, en premier temps, une caractérisation temporelle et un cycle annuel sont établis pour chaque indice afin de comprendre et d'expliquer sa variabilité au cours de notre période de référence allant de 1967 jusqu'à 2015. En second temps, nous avons fait une étude de corrélation spatio-temporelle entre l'anomalie mensuelle de la SST et l'indice NAO pour traiter les téléconnexions et mécanismes physiques liant la NAO et le champ de la SST dans l'Atlantique Marocain. Vers la fin de notre étude, nous avons fait une étude statistique liant l'indice AMO avec l'indice IUC pour chaque zone afin de justifier l'effet de la variabilité d'anomalie de la SST au niveau de l'océan Atlantique sur la variabilité de l'activité d'upwelling au niveau de l'Atlantique Marocain. Une thématique qui nous incite à trouver une meilleure stratégie pour conserver de manière durable les ressources halieutiques au Maroc et de mettre au point un programme d'adaptation au changement climatique.

**Mots-Clés:** Variabilité, Richesse halieutique, évolution, Maroc, changement climatique.

**Abstract :** The development of fishery resources in Morocco has led, in recent decades, to an increase in the research effort for the monitoring of the state of the fisheries and the understanding of the issues of exploitation and the marine environment, as well as the understanding of climate change or, more importantly, the climate variability and its possible impact on the variability of fishery resources in Morocco. To address this issue, first, a temporal characterization and an annual cycle are established for each index to understand and explain its variability during our reference period from 1967 to 2015. Secondly, we made a spatio-temporal correlation study between the monthly SST anomaly and the NAO index to address the teleconnections and physical mechanisms linking the NAO and the SST field in the Moroccan Atlantic. To illustrate the spatial distribution of the SST in the Moroccan Atlantic Ocean. Towards the end of our study, we made a statistical study linking the AMO index with the IUC index for each area in order to justify the effect of the SST anomaly variability in the Atlantic Ocean on the variability of the upwelling activity in the Moroccan Atlantic. A theme that challenges us to find a better strategy to sustainably conserve fisheries resources in Morocco and to develop a program of adaptation to climate change.

**Keywords:** Variability, Fisheries wealth, evolution, Morocco, climate change.

## Introduction

Les principaux systèmes d'upwelling sont situés dans les zones subtropicales à l'est de l'Atlantique et de l'océan Pacifique, ils sont quatre, à savoir le système d'upwelling de Californie, le long des côtes de Californie et d'Oregon, le système d'upwelling Humboldt, le long des côtes du Pérou et du Chili, l'upwelling du Benguela, le long des côtes de l'Angola, de Namibie et d'Afrique du Sud et l'upwelling des Canaries associé aux îles des Canaries et le long des côtes d'Afrique du Nord-Ouest (Chavez et Messié, 2009). Ces grandes régions d'upwelling côtier communément appelées EBUS (Eastern Boundaries Upwelling System) se caractérisent par la présence d'importants stocks de petits pélagiques (Sardine, anchois), très exploités par les pêcheries et très fluctuants aux échelles interannuelles (Chavez et al, 2003). L'upwelling marocain représente une partie importante du système des Canaries. Le long du Courant des Canaries, l'upwelling n'est pas régulier et les remontées se produisent plus souvent en certains points du littoral, favorisés par la topographie, notamment au voisinage de certains caps (Binet 1988). La dynamique et la variabilité spatio-temporelle de ce phénomène dépendent largement des changements du régime des vents et de la température de la surface de la mer (SST) et donc également des régimes l'oscillation nord atlantique (NAO) et de l'oscillation multi-décennale



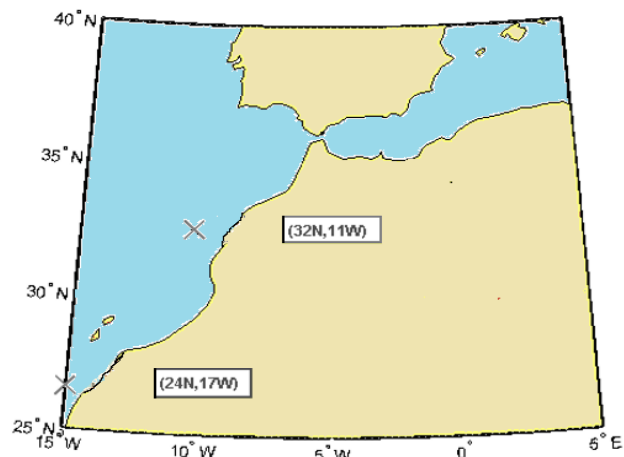
atlantique (AMO) dans le système considéré (Yaalaoui, 2007). Il est important d'étudier la variabilité climatique de ces événements en raison des éventuels impacts sur la variabilité des ressources halieutiques au Maroc (Motib, 2020).

## 1. Sites d'étude, données, méthode

### 1.1. Zone d'étude

La zone sud-marocaine, comprise entre 20° et 32°N, est une région où l'upwelling est pratiquement permanent tout au long de l'année, puisque les vents y soufflent constamment avec une composante Nord-Sud (Benazouz et al, 2014). Cette zone connaît des situations météorologiques à caractère exceptionnel, généralement difficiles à prévoir et à modéliser (Moujane et al, 2011). L'influence de certains paramètres atmosphériques, ainsi que des indices climatiques et océaniques sur le système d'upwelling du Maroc sont étudiés sur deux points géographiques : 32°N, 11°W & 24°N, 17°W (Fig.1). Dans ce travail de recherche, la dynamique de quatre processus ayant un rôle important pour la caractérisation du développement de l'upwelling régional est examinée. Il s'agit de la NAO, l'AMO, la SST et l'indice d'upwelling côtier (IUC).

Figure 1 : Localisation des deux points géographiques.



### 1.2. Données et Méthodologie

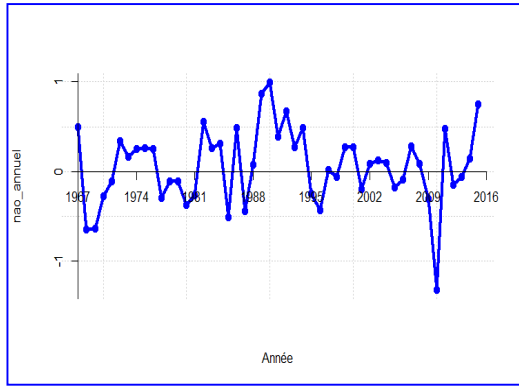
La base de données mise à notre disposition provient de différentes sources. L'indice d'upwelling côtier (IUC) des deux points d'étude provient de Pacific Fisheries Environmental Group (PFEG) ; l'indice d'oscillation nord atlantique et celui caractérisant l'oscillation multi-décennale atlantique proviennent de NCEP/NCAR et le champ de la SST du Met Office Hadley Centre for Climate Science and Services.

Pour mettre en évidence l'impact du changement climatique sur la variabilité de la richesse halieutique au niveau de l'Atlantique Marocain, on cherche d'une part à étudier la variabilité de chaque indice, à savoir l'indice caractérisant l'activité de l'upwelling côtier pour les deux d'étude, l'indice caractérisant l'oscillation nord-Atlantique et l'indice caractérisant l'oscillation multi-décennale atlantique sur notre période de référence allant de 1967 jusqu'à 2015, dans le but d'analyser leur évolution et la tendance générale. D'autre part, pour mieux repérer et quantifier l'effet des régimes positif et négatif de l'oscillation nord-Atlantique, on adopte une analyse de corrélation spatio-temporelle. Par la suite, on illustre la cohérence de variabilité des deux indices AMO-IUC à l'aide d'une étude de corrélation simultanée.

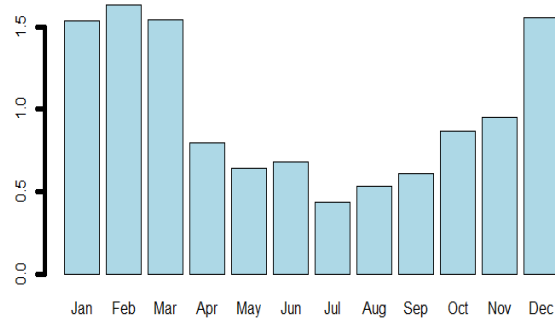
## 2. Résultats

### 2.1. Evolution des différents indices

La caractérisation temporelle de chaque indice est bien visualisée (Figures 2, 4, 6 & 8).

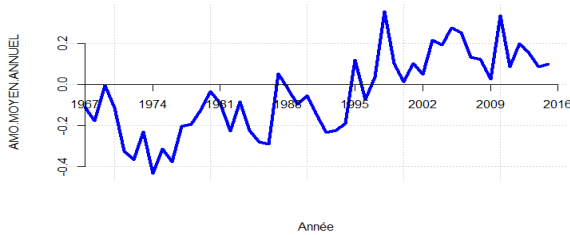


**Figure 2 : Evolution annuelle moyenne de l'indice NAO**

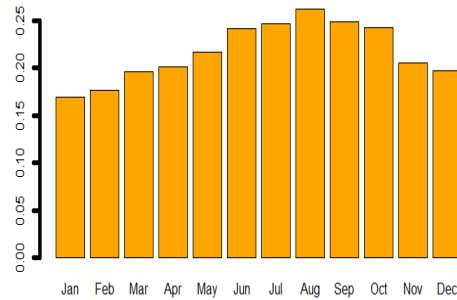


**Figure 3 : cycle annuel de l'NAO (A base de du Coefficient de variation COV)**

L'évolution temporelle de l'indice de l'oscillation nord atlantique d'Hurrell (Hurrell,1995), qui est illustrée sur la fig.2, met en évidence une forte variabilité interannuelle. Nous pouvons également remarquer qu'il existe une certaine alternance incessante de séquences pluriannuelles de phases positives et négatives de la NAO, avec une prédominance assez importante du régime positif de la NAO entre 1988 et 1994. De plus, il est remarquable qu'en moyenne, la phase positive prédomine plus durablement que la phase négative sur notre période de référence. On a pu montrer la persistance de l'oscillation nord-atlantique en hiver davantage qu'en été grâce à un cycle annuel basé sur le coefficient de variation (Fig.3).



**Figure 4 : Evolution annuelle moyenne de l'indice AMO**



**Figure 5 : cycle annuel (COV) de l'AMO**

Les figures 4 et 5 illustrent respectivement la variabilité de la moyenne annuelle de l'indice d'oscillation atlantique multidécennale au cours de la période de référence, ainsi la variabilité mensuelle de l'AMO. L'évolution de cette oscillation est marquée par une tendance vers la hausse, passant d'une valeur négative d'ordre -0.1 à 0.1. Cette évolution ponctuée par un minimum en 1974 d'ordre -0.45 et maximum de +0.4 en 1998. On assiste à une phase positive de l'AMO à partir de la fin des années 90 (fig4), ainsi qu'à un renforcement plus marqué en été qu'en hiver (fig.5).

Grâce à la même méthodologie, on a pu relever le caractère permanent de l'activité d'upwelling au niveau de la zone d'étude située dans la partie sud du Maroc (24°N,17°W) (Fig.7), et un caractère saisonnier de l'activité d'upwelling au niveau du centre (32°N,11°W) (Fig.6).

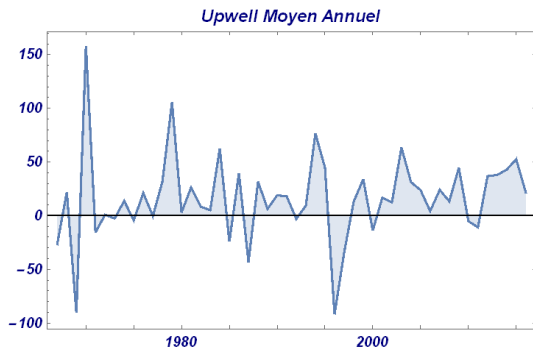


Figure 6 : Evolution annuelle de l'IUC (32°N, 11°W), (1967-2015)

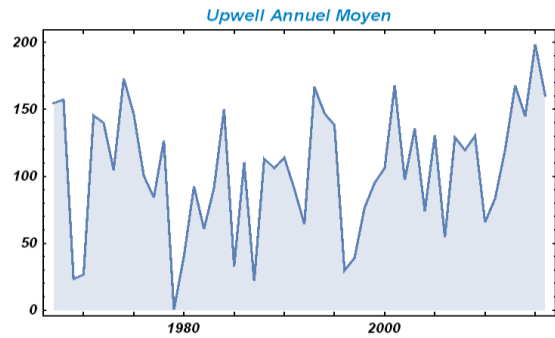


Figure 7 : Evolution annuelle de l'IUC (24°N, 17°W), (1967-2015)

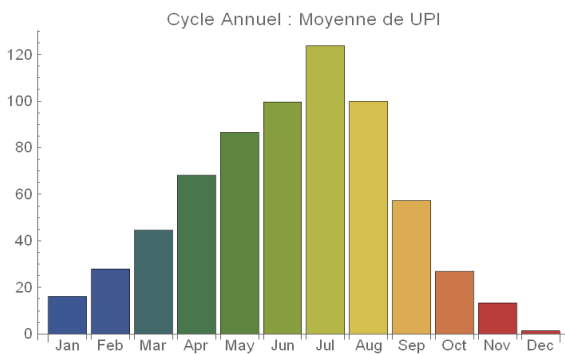


Figure 8 : Cycle annuel de L'IUC (32°N, 11°W).

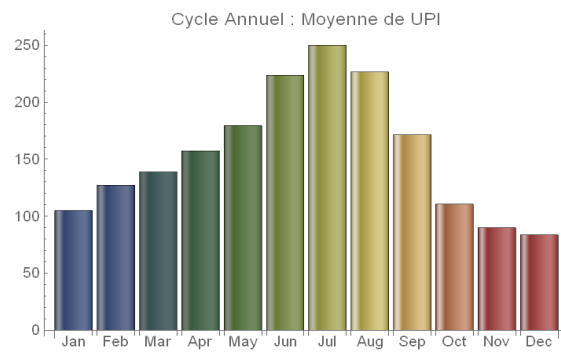


Figure 9 : Cycle annuel L'IUC (24°N, 17°W).

## 2.2 Analyse de corrélation spatio-temporelle NAO- SST :

Comme nous l'avons mentionné dans la première partie, l'hiver et l'été représentent deux saisons contrastées et une analyse distincte de ces deux saisons serait intéressante. Ce paragraphe se penche sur l'impact de la NAO sur la SST observé au cours de ces deux saisons [hiver (DJFM) et été (JJA)] sur l'Atlantique.

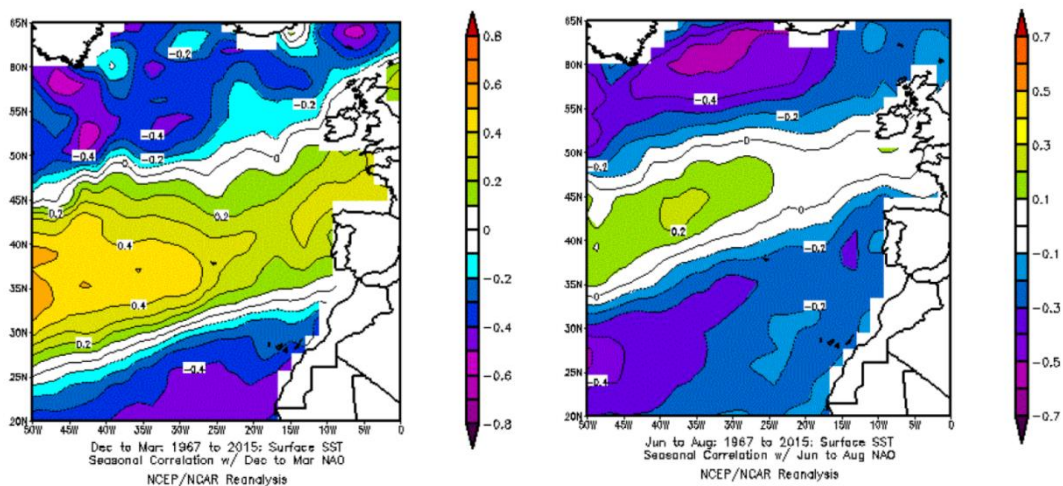
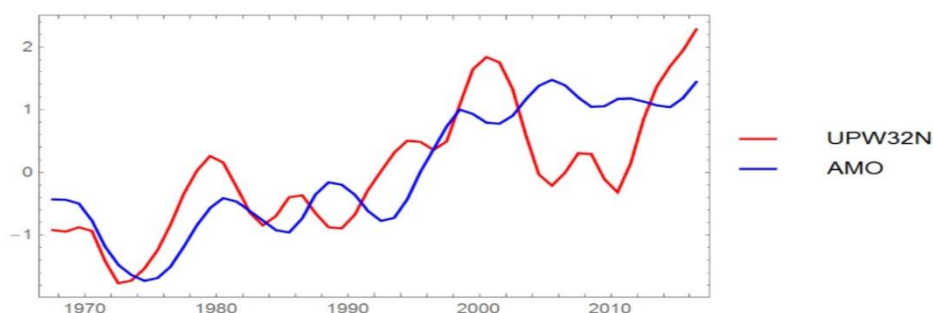


Figure 10 : Champ de corrélation linéaire entre l'anomalie mensuelle de la SST et l'indice NAO pour les deux saisons hiver (à gauche) / Eté (à droite) (1967-2015). (Source : <https://psl.noaa.gov/data/correlation/>)

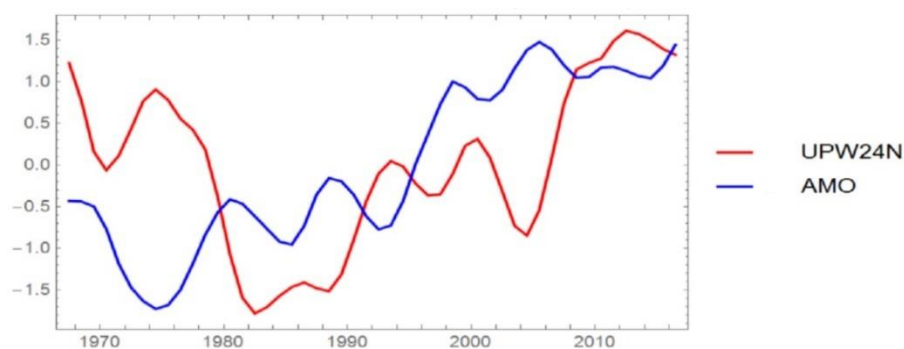
La figure 10 montre une corrélation négative entre les deux variables au large de la côte Atlantique Marocaine quelleque soit la saison, et celle-ci est plus élevée en hiver qu'en été. Cet effet a été évalué par des corrélations négatives entre l'indice NAO et la SST. Les corrélations les plus fortement négatives sont observées en hiver plus qu'en été, donc la réponse de la SST aux régimes de NAO est plus remarquable en hiver qu'en été. Ce résultat est donc en accord avec le fait que la NAO se manifeste plus intensément dans les mois d'hiver « DJFM » (Fig. 3).

### 2.3 Relation AMO ET IUC

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les résultats de l'étude de la relation entre l'indice d'oscillation multi-décennale atlantique et l'activité d'upwelling pour chaque latitude [32°N,11°W] (Fig.11) et [24°N,17°W] (Fig.12). Les résultats sont générés sous Mathematica, la courbe en bleu correspond à l'indice de l'AMO et la courbe en rouge correspond à l'indice d'upwelling côtier. Pour cette partie, on a retenu seulement les résultats obtenus pour l'échelle multi-décennale.



**Figure 11 : Corrélation simultanée entre deux séries chronologiques associées aux indices AMO-IUC [32°N, 11°W].**



**Figure 12 : Corrélation simultanée entre deux séries chronologiques associées aux indices AMO-IUC [24°N, 17°W].**

À travers cette analyse des évolutions de l'indice d'upwelling et de l'indice AMO sur une échelle multi-décennale, nous avons pu observer une variabilité homogène de ces deux indices. En effet, les basculements de l'AMO entre ses deux phases au cours de notre période de référence sont généralement associés à une variabilité remarquable de l'intensité de la résurgence pour les deux régions d'étude. Il en résulte que la phase positive de l'AMO est très bien liée au dynamisme de l'activité d'upwelling pour les deux régions d'étude. Une réponse retardée de l'upwelling est ainsi remarquée pour les deux latitudes.

## Conclusion

La persistance de l'oscillation nord-Atlantique en hiver et son influence sur la variabilité spatiale de l'activité d'upwelling ainsi que l'homogénéité de la variabilité des deux indices AMO et IUC sur une grande échelle temporelle, mettent en évidence l'effet robuste des variabilités climatiques et océaniques sur la richesse halieutique au niveau de l'Atlantique Marocain. Les résultats obtenus nous incitent à étudier davantage la variabilité de l'indice d'upwelling côtier au Maroc et de trouver un programme d'adaptation au changement climatique.

## Bibliographie

- Binet D., 1988 : Role possible d'une intensification des alizés sur le changement de repartition des sardines et sardinelles le long de la cote ouest-africaine. *Aquat-li-resour.* **1**, 115-132.
- Benazzouz A., Demarcq H., Machin F., Mason E., Orbi A., 2014 : On the temporal memory of coastal upwelling off NW Africa. *J. Geophys.Res.*, **119**, 6356-6380.
- Chavez F., Messié M., 2009 : A comparison of easternBoundary upwelling ecosystems. *ProgOceanogr.*, **83**, 80-96.
- Chavez F., Ryan J., Lluch-Cota S., Niquen M., 2003 : From anchovies to sardines and back : Multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science.*, **299**, 217-221.
- Hurrell J., 1995 : Decadal trends in the North Atlantic Oscillation, regional temperatures and precipitation. *Science.*, **269**, 678-679.
- Motib I., 2020 : Durabilité des ressources halieutiques au Maroc. *EuropeanScientific Journal.*, **16**, 204-223.
- Moujane A., Chagdali M., Blanke B., Mordane S., 2011 : Impacts des vents sur l'upwelling au sud du Maroc ; apport du modèle Roms forcé par les données Aladin et QuikScat. *Bulletin de l'institut scientifique, Rabat, section science de la terre.*, **33**, 53-64.
- Yaalaoui A., 2007 : Réponse de la circulation océanique, dans l'océan atlantique marocain, au forçage climatique de type « Oscillation Nord Atlantique (NAO) ». *Mémoire de fin d'études Ecole Hassania des Travaux Publics.*

# VALIDATION ET INTER-COMPARAISON DES BASES DE DONNEES SATELLITAIRES D'ESTIMATION DE RAYONNEMENT SOLAIRE INCIDENT SUR LA FAÇADE ATLANTIQUE D'AFRIQUE CENTRALE.

OUHECHOU A. <sup>1</sup>, PHILIPPON N. <sup>2</sup>, MOREL B. <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) / Université Grenoble Alpes – Grenoble – France, amine.ouhechou@univ-grenoble-alpes.fr

<sup>2</sup> Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) / Centre National de Recherche Scientifique (CNRS) – Grenoble – France, nathalie.philippon@univ-grenoble-alpes.fr

<sup>3</sup> Laboratoire d'Energétique, d'Electronique et Procèdes (LE2P) – Energylab / Université de La Réunion – La Réunion – France, beatrice.morel@univ-reunion.fr

**Résumé :** Le rayonnement solaire incident à la surface de la Terre est important pour le fonctionnement des forêts tropicales car il entre en jeu dans la disponibilité en lumière et en eau. En raison du manque de données in-situ dans les milieux forestiers tropicaux, les produits satellitaires et les réanalyses sont les seuls moyens d'estimer le rayonnement solaire à l'échelle régionale. Une inter-comparaison de cinq bases de données satellitaires dont CERES-EBAF, CERES-SYN1deg, CMSAF-SARAH, CMSAF-CLARA, CAMS-JADE ainsi que les réanalyses ERA5, est effectuée pour la façade atlantique d'Afrique Centrale en les évaluant par rapport à deux ensembles de données in-situ : la base de données mensuelles FAOCLIM2 et des données originales infra-journalières issues de stations météorologiques implantées dans le cadre de projets écoclimatiques. À partir de cette inter-comparaison, nous montrons les différences existantes entre ces six produits et avec les données in-situ, aux échelles mensuelles à journalières. Nous montrons également que la façade atlantique d'Afrique Centrale reçoit le moins de rayonnement solaire dans l'ensemble des produits par rapport aux autres régions d'Afrique Centrale.

**Mots-clés :** rayonnement solaire incident - Afrique Centrale - estimations satellitaires - variabilité spatio-temporelle.

**Abstract:** Solar radiation incident on the Earth's surface is important for the functioning of tropical forests because it affects the availability of light and water. Due to the lack of in-situ data in tropical forest environments, satellite products and reanalysis are the only ways to estimate solar radiation on a regional scale. An intercomparison of five satellite databases including CERES-EBAF, CERES-SYN1deg, CMSAF-SARAH, CMSAF-CLARA, CAMS-JADE as well as the ERA5 reanalysis, is carried out for the Atlantic coast of Central Africa by evaluating them against two in-situ data sets: the monthly FAOCLIM2 database and original infra-daily data from meteorological stations set up within the framework of ecoclimatic projects. From this inter-comparison, we show the differences between these six products and with in-situ data from monthly to daily scales. We also show that the Atlantic coast of Central Africa receives the least amount of solar radiation in all products compared to other regions of Central Africa.

**Keywords :** incident solar radiation - Central Africa - satellite estimates - spatiotemporal variability.

## Introduction

Le rayonnement solaire incident à la surface de la terre est la principale source d'énergie pour la biosphère et un paramètre important du bilan radiatif de surface (Gupta et al. 1999, Liang et al. 2010). Plusieurs réseaux de mesure du rayonnement solaire sont en place aujourd'hui, mais ils sont toujours insuffisants pour estimer la distribution globale du rayonnement solaire : les stations restent trop rares et hétérogènes (Zhang et al. 2015), ce qui est particulièrement vrai pour les milieux forestiers tropicaux comme l'Afrique Centrale (Bigot et al. 2016). Pour cette raison, les produits satellitaires et les réanalyses sont les seuls moyens d'estimer le rayonnement solaire à l'échelle régionale pour de nombreuses régions, dont l'Afrique Centrale.

Dans cette étude, nous essayons de répondre aux deux questions suivantes : comment varie le rayonnement solaire en Afrique Centrale et y-a-t-il des différences importantes entre les estimations satellitaires ?

### 1. Données et méthodes

Pour répondre à ces deux questions, nous utilisons 5 estimations satellitaires de rayonnement solaire et un produit de réanalyses (tableau 1), et les évaluons par rapport à deux sources de données in-situ : la base FAOCLIM2 (47 stations disponibles) et 6 stations météorologiques originales (figure 1).

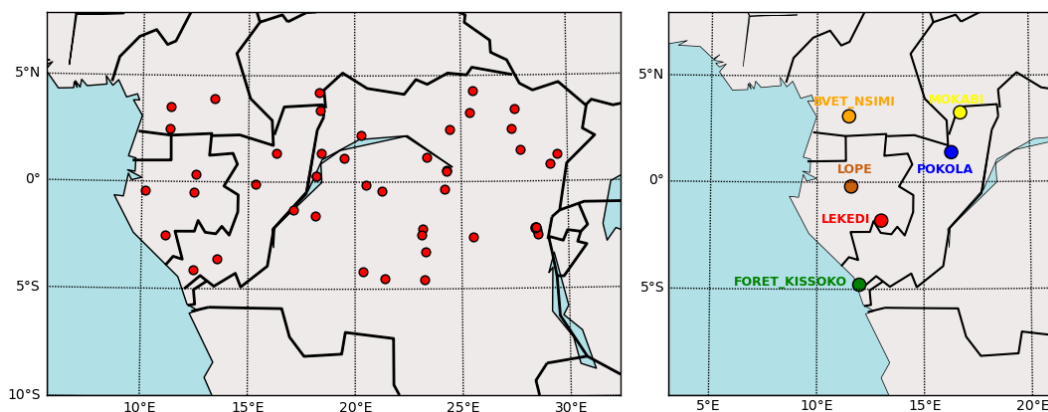


Figure 1. Localisation des stations de la FAO (panel gauche) et des stations météorologiques originales (panel droit).

Tableau 1 : Détails des sources de données utilisées.

Ensemble de données	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Période de disponibilité	Satellites	Lien de téléchargement
CERES-EBAF	1° × 1°	Mensuelle	2000-03 / 2019-11	Terra + Aqua	<a href="https://ceres.larc.nasa.gov/data/#energy-balanced-and-filled-ebaf">https://ceres.larc.nasa.gov/data/#energy-balanced-and-filled-ebaf</a>
CERES-SYN1deg	1° × 1°	Journalière	2000-03 / 2019-11	Terra + Aqua	<a href="https://ceres.larc.nasa.gov/data/#energy-balanced-and-filled-ebaf">https://ceres.larc.nasa.gov/data/#energy-balanced-and-filled-ebaf</a>
Réanalyses ERA5	0.25° × 0.25°	Journalière	1979-01 / 2020-04	--	<a href="https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=form">https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=form</a>
CMSAF-CLARA-A2	0.25° × 0.25°	Mensuelle	1982-01 / 2015-12	NOAA et METOP.	<a href="https://wui.cmsaf.eu/safira/action/viewProduktSearch?menuName=PRODUKT_SUCHE">https://wui.cmsaf.eu/safira/action/viewProduktSearch?menuName=PRODUKT_SUCHE</a>
CAMS-JADE	0.2° × 0.2°	Journalière	2005-01 / 2018-12	MVIRI/ SEVIRI sur METEOSAT MSG	<a href="http://www.soda-pro.com/soda-products">http://www.soda-pro.com/soda-products</a>
CM SAF-SARAH 2	0.05° × 0.05°	Journalière	1983-01 / 2017-12	MVIRI/ SEVIRI sur METEOSAT MSG	<a href="https://wui.cmsaf.eu/safira/action/viewProduktSearch?menuName=PRODUKT_SUCHE">https://wui.cmsaf.eu/safira/action/viewProduktSearch?menuName=PRODUKT_SUCHE</a>

Afin d'évaluer la capacité de ces produits satellitaires à estimer le rayonnement solaire incident sur notre zone d'étude, nous utilisons les outils statistiques suivants :

- le coefficient de corrélation de Pearson R mesurant l'intensité de la relation linéaire entre les estimations et les observations :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

$x_i$  et  $y_i$  : sont les ièmes éléments des variables x et y ;  
 $\bar{x}$  et  $\bar{y}$  : sont les moyennes respectives de ces variables.

- le biais (pris comme erreur moyenne) :

$$Biais = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{esti} - x_{obsi})}{n}$$

$x_{obs i}$  : est la ième observation du jeu de données de validation ;  
 $x_{est i}$  : est la valeur estimée pour la ième observation ;  
n : est le nombre d'observations.

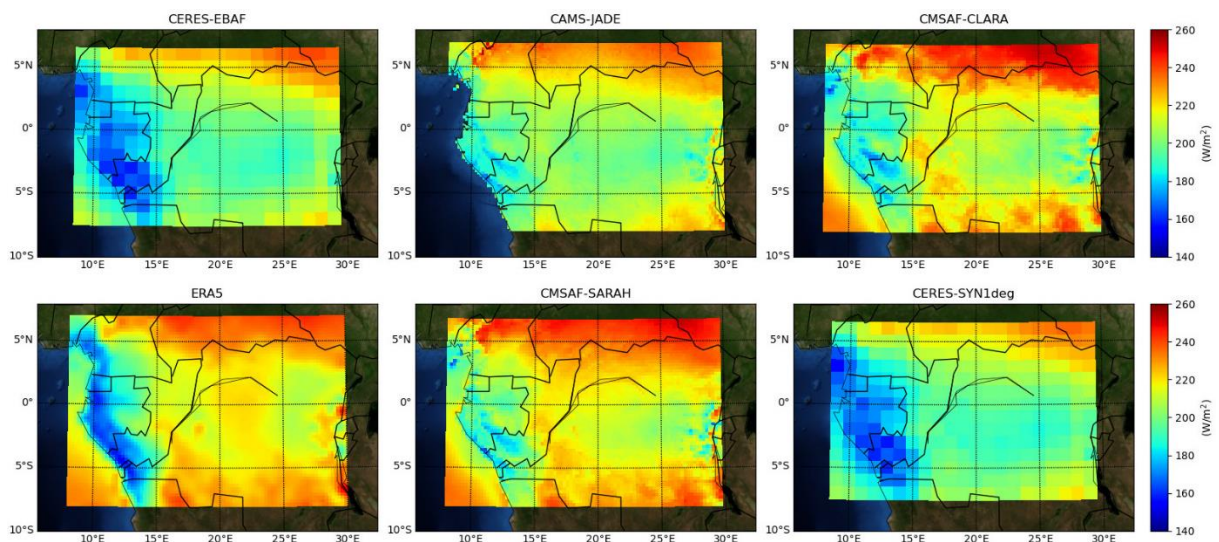
Nous utilisons également deux critères supplémentaires appelés scores de compétences statistiques et qui sont dérivés à partir des tableaux de contingence, à savoir :

- la probabilité de détection (POD), qui est le nombre de jours les moins lumineux (inférieurs au 25ème percentile) correctement détectés, divisé par le nombre total de jours les moins lumineux dans les observations.
- le taux de fausses alertes (FAR), qui est le nombre de jours incorrectement détectés comme les moins lumineux, divisé par le nombre total de jours détectés comme les moins lumineux.

POD et FAR ont également été calculés pour les jours les plus lumineux c'est à dire supérieurs au 75ème percentile.

## 2. Variation spatio-temporelle de rayonnement solaire incident en Afrique Centrale

A partir de la figure 2, nous pouvons remarquer clairement la différence qui existe entre la quantité de rayonnement solaire incident sur la façade atlantique de l'Afrique Centrale et les autres zones du massif forestier de l'Afrique Centrale : elle reçoit le moins de rayonnement solaire, avec des valeurs inférieures à  $175 \text{ W/m}^2$  pour ERA5 et les produits CERES et des valeurs un peu plus élevées ( $\sim 200 \text{ W/m}^2$ ) pour CAMS-JADE et CMSAF-SARAH.



**Figure 2 : Distribution spatiale de la moyenne annuelle de rayonnement solaire incident d'après les 6 produits sur la période (2005-2015).**

Afin de mieux comprendre la variation temporelle (sur tous les mois de l'année) du rayonnement solaire incident sur l'Afrique Centrale, nous présentons les moyennes mensuelles de rayonnement solaire incident entre  $7^{\circ}\text{S}$  et  $6^{\circ}\text{N}$ , moyennées sur les longitudes  $8-30^{\circ}\text{E}$  (figure 3).

Nous remarquons que pour les 6 produits, les plus faibles valeurs de rayonnement solaire ne correspondent pas aux deux saisons des pluies de mars-avril et octobre-novembre mais à la saison sèche de juin à septembre (JJAS). Ce signal correspond principalement à la façade atlantique de l'Afrique Centrale. Ceci justifie l'étude de la nébulosité pour cette région et cette saison (Dommo et al. 2018). On remarque également que les deux produits ERA5 et CLARA ont un deuxième minimum pendant la saison pluvieuse d'octobre à novembre.



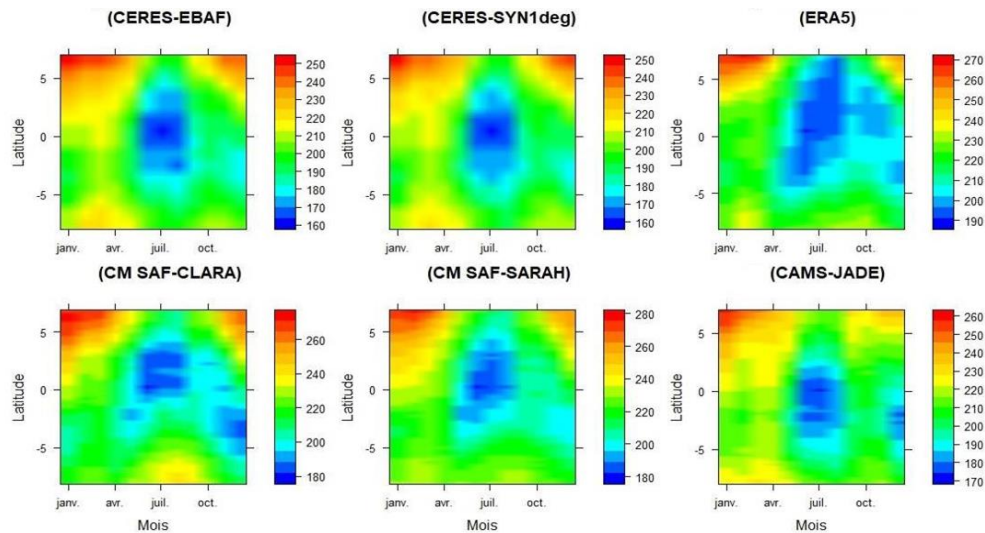


Figure 3 : Diagrammes de Hovmöller des moyennes mensuelles de rayonnement solaire incident d’après les 6 produits, en moyenne sur les longitudes 8-30°E.

### 3. Régionalisation climatique et inter-comparaison des 6 produits vs les observations in-situ de la FAO à l’échelle mensuelle et sous régionale.

Par la suite, nous évaluons les produits sur des sous-régions (figure 4) prédéfinies par Philippon et al. (2018). Chaque région agrège les pixels présentant des cycles annuels proches en termes de fréquence de cycles diurnes « types » de rayonnement.

Nous générons des cycles annuels moyens de rayonnement solaire incident pour chacune des 6 sous-régions, et nous mettons l’accent uniquement sur les deux sous-régions situées sur la façade atlantique de l’Afrique Centrale : le SW Gabon et le Cameroun (figure 4).

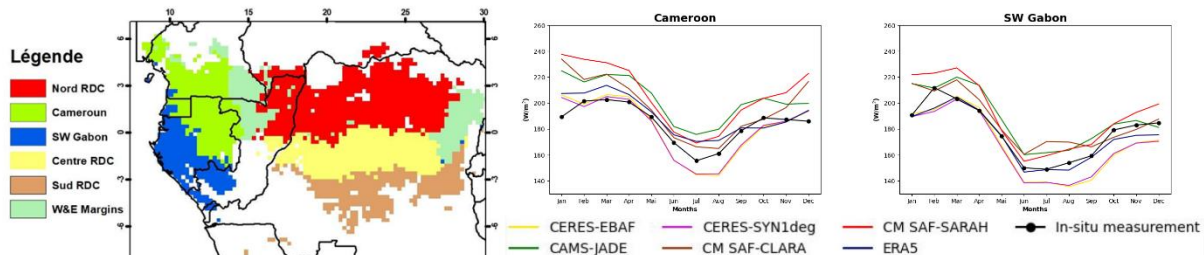


Figure 4. Régionalisation climatique de l’Afrique Centrale (panel gauche) et cycles annuels moyens d’après les 6 produits et les données FAO (panel droit, exemple pour les deux sous-régions « Cameroun » et « SW Gabon »).

Tableau 2 : Corrélation et biais entre les cycles annuels moyens de rayonnement pour les 6 produits satellitaires et les données FAO.

Produits	Corrélation	Biais	Résolution spatiale
CERES-EBAF	0.95	-6.6	1° x 1°
CERES-SYN1deg	0.96	-7	1° x 1°
ERA5	0.93	1.1	0,25° x 0,25°
CMSAF-CLARA	0.87	10.6	0,25° x 0,25°
CMSAF-SARAH	0.94	17.6	0,05° x 0,05°
CAMS-JADE	0.93	14.3	0,2° x 0,2°

D’après la figure 4, nous remarquons que pour ces deux sous-régions, le maximum de rayonnement solaire est enregistré en février-mars par l’ensemble des produits et le minimum

de juin à août (moins de  $180 \text{ W/m}^2$ ), ce qui explique les bons scores de corrélation obtenus dans le tableau 2. On remarque également que les produits CERES-EBAF et CERES-SYN1deg sous-estiment le rayonnement solaire par rapport aux mesures in-situ de la FAO alors que les autres produits le surestiment.

#### 4. Intercomparaison des produits satellitaires à l'échelle journalière et stationnelle.

Afin d'affiner ces analyses, les 3 produits satellitaires ayant une résolution temporelle fine (CERES-SYN1deg, CMSAF-SARAH et CAMS-JADE) sont comparés aux données disponibles à l'échelle journalière pour 6 stations (figure 1).

La figure 5 montre la variation mensuelle du biais aux 6 stations. Les biais varient de  $-20$  à  $51 \text{ W/m}^2$  pour CERES-SYN1deg, de  $24$  à  $52 \text{ W/m}^2$  pour CAMS-JADE, et de  $35$  à  $86 \text{ W/m}^2$  pour CMSAF-SARAH.

En général, les biais les plus élevés sont observés pendant les deux saisons sèches, avec des biais plus élevés en janvier-février pour les stations au nord de l'équateur comme Pokola, Mokabi et Nsimi, et des biais plus élevés en juillet-août pour les stations au sud de l'équateur. Ces analyses confirment les résultats des moyennes mensuelles : le produit CMSAF-SARAH est trop lumineux.

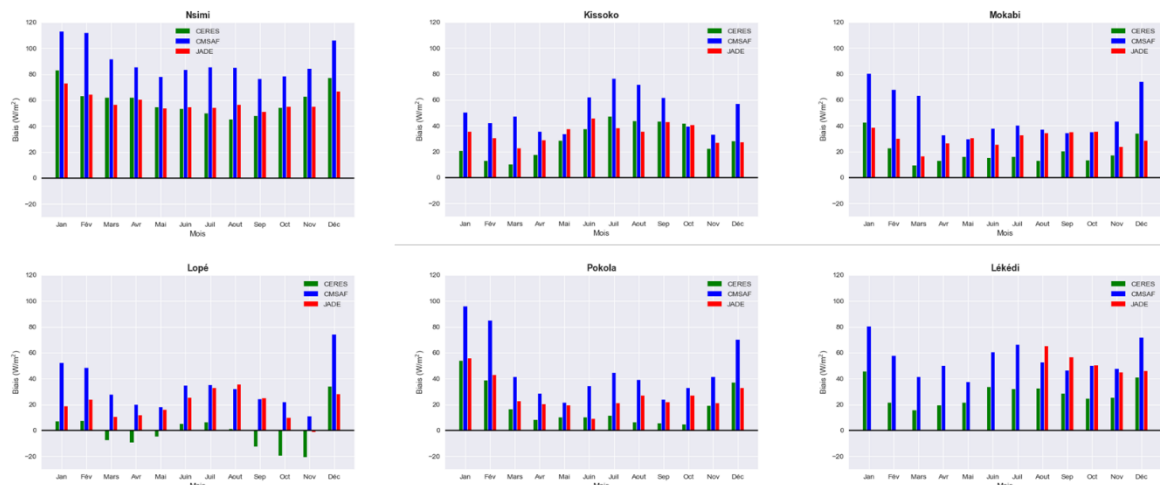


Figure 5. Variation mensuelle des biais, aux 6 stations météorologiques utilisées et pour chacun des 3 produits CERES-SYN1deg (vert), CMSAF-SARAH (bleu) et CAMS-JADE (rouge).

Pour mieux comprendre ces biais, une présentation de la distribution fréquentielle de rayonnement solaire incident pour toutes les stations est donnée en figure 6. Nous remarquons que pour les 3 produits, la distribution des estimations est asymétrique notamment pour CMSAF-SARAH, alors que pour les mesures in-situ, la distribution est gaussienne. De manière générale, les 3 produits satellitaires sous-estiment le nombre de jours obscurs et surestiment le nombre de jours les plus lumineux.

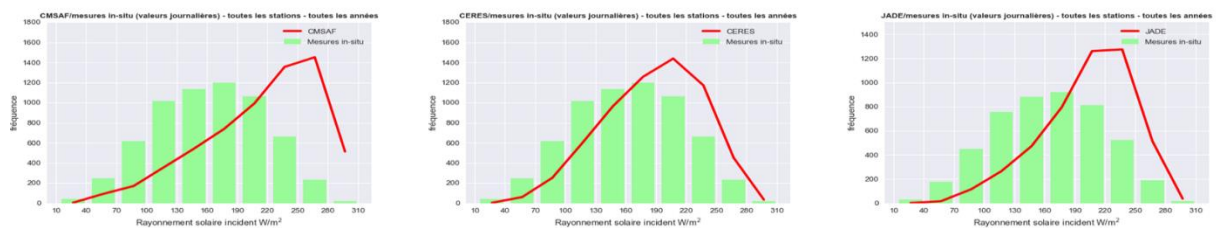
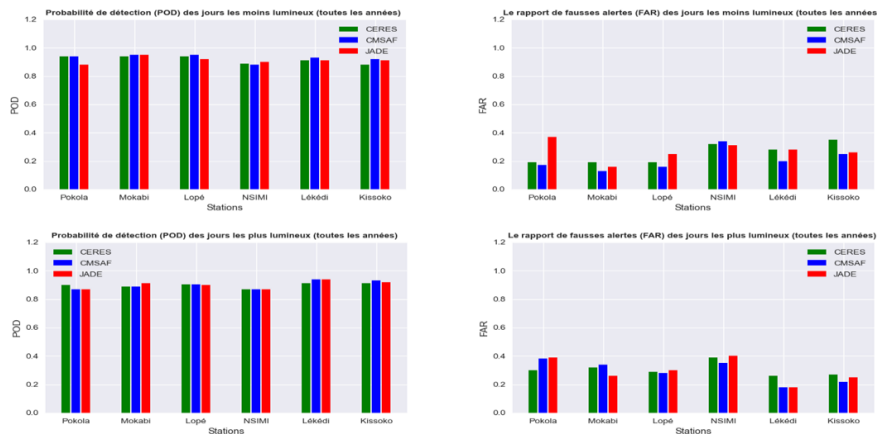


Figure 6. Distribution fréquentielle de rayonnement solaire incident sur la base de toutes les stations (barres vertes) et pour CMSAF-SARAH (gauche), CERES-SYN1deg (milieu) et CAMS-JADE (droite)(courbe rouge).

Afin de s'affranchir des biais systématiques identifiés, nous évaluons les produits avec des scores de POD et FAR basés sur des catégories : un POD proche de 1 et un FAR proche de 0 signifient une prévision parfaite. Nous constatons sur la figure 7 que ces deux scores sont bons pour l'ensemble des 3 produits satellitaires : un jour anormalement lumineux (obscur) aux stations correspond généralement à un jour anormalement lumineux (obscur) dans le produit satellite.



**Figure 7. Scores de performance (POD à gauche et FAR à droite) des trois produits satellitaires (CERES-SYN1deg en vert, CMSAF-SARAH en bleu et CAMS-JADE en rouge) à estimer les jours les moins (haut) ou les plus (bas) lumineux.**

## Conclusion

Dans cette étude nous comparons 5 estimations satellitaires et un produit de réanalyses vs des mesures in-situ de rayonnement solaire incident sur la façade atlantique d'Afrique Centrale. La façade atlantique reçoit le moins de rayonnement solaire dans l'ensemble des produits, avec une moyenne annuelle de  $178 \text{ W/m}^2$ .

Cette comparaison montre des différences notables entre les produits en termes de biais, biais très important dans CMSAF-SARAH ( $15 \text{ W/m}^2$  à l'échelle mensuelle et  $\sim 70 \text{ W/m}^2$  à l'échelle journalière). Mais lorsqu'on s'affranchit des biais systématiques, les performances des trois produits sont bonnes.

## Bibliographie

- S. Bigot, N. Philippon, V. Gond, V. Moron, W. Pokam, et al. État actuel des réseaux de mesures éco climatiques en Afrique centrale : les ambitions du projet de recherche international FORGREENE. 29<sup>ème</sup> Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Besançon, France. pp.101-106.
- Dommo A., Philippon N., Vondou D., Sèze G., Eastman R., 2018. The June-September low cloud cover in Western Central Africa : mean spatial distribution and diurnal evolution, and associated atmospheric dynamics. *J. Clim.*,
- Gupta, S.K., Ritchey, N.A., Wilber, A.C., Whitlock, C.H., Gibson, G.G., & Stackhouse, P.W, 1999: A climatology of surface radiation budget derived from satellite data. *Journal of Climate*, 12, 2691–2710.
- Liang, S.L., Wang, K.C., Zhang, X.T., & Wild, M. 2010: Review on estimation of land surface radiation and energy budgets from ground measurement, remote sensing and model simulations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3, 225–240.
- Philippon N, Cornu G, Gond V, Monteil L, Moron V, Pergaud J, Seze G, Bigot S, Camberlin P, Doumenge C. 2, Fayolle A. 2018 : Cycles diurnes de rayonnement solaire et forêts en Afrique Centrale. *31<sup>ème</sup> Colloque de l'AIC*, 38–42.
- Zhang, X, Liang S, & Wild M, Jiang B. 2015: Analysis of surface incident shortwave radiation from four satellite products. *Remote Sensing of Environment*. 165.

# VARIATION SPATIALE DU CHAMP THERMIQUE DE LA VILLE DE LIMEIRA (SP), BRÉSIL

Pascoalino, A (1), Marandola Jr, e (2), Braga, L. C. (3), Aderaldo, P. Í. C. (4)

(1) *Professeur Docteur, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Brésil, apascoal@unicamp.br*

(2) *Professeur Associé, Faculdade de Ciências Aplicadas, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Brésil, ejmjr@unicamp.br*

(3) *Letícia Cassanelli Braga – Licence en Géographie, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Brésil*

(4) *Pedro Ítalo Carvalho Aderaldo – Doctorant en Géographie, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Brésil, pedroit@ige.unicamp.br*

**Résumé:** *L'objectif de cette recherche était déterminer l'existence d'un îlot thermique dans la ville de Limeira, centre-est de l'État de São Paulo. Pour cela, on a utilisé la base de données de la variation du champ thermique de la ville en: janvier (été) et juillet (hiver). Les données sur la température de l'air ont été collectées à quarante points, durant les horaires suivants (9h, 15h et 21h), pendant cinq jours d'été et cinq d'hiver, dans points fixes et transects mobiles. Les données collectées ont été traitées pour: a) correction du temps de collecte entre les points initial et final; b) interpolation par la méthode de krigeage; c) technique d'analyse rythmique épisodique; d) évaluation qualitative des unités paysagères. Vérifié un noyau thermique plus chaud dans la partie nord-ouest de la ville et près du cours d'eau principal dans a zone centrale, en été comme en hiver, la performance des systèmes atmosphériques stables était prédominante. Dans ces conditions, la plus grande différence thermique entre la zone rurale et urbaine s'est produite en été.*

**Mots clés:** *variation thermique; climat urbain; îlot thermique.*

**Summary:** *The objective of this investigation was to identify the existence of a heat island in the Limeira city, central-east of the São Paulo State. To this end, was worked with the variation of the city's thermal field in: January (summer) and July (winter). The collect of air temperature data occurred at forty points, at three times (9:00 am, 3:00 pm and 9:00 pm), during five summer days and five winter days, at fixed points and mobile transects. The collected data were treated by: a) correction of the data collection time between the initial and final points; b) interpolation by the kriging method; c) episodic rhythmic analysis technique; d) qualitative assessment of the landscape units. There was a thermal core with greater heating in the northwest portion of the city and close to the main watercourse in the central area, both in summer and in winter, the performance of stable atmospheric systems prevailed. In these conditions, the greatest thermal difference between the rural and urban areas occurred in the summer period.*

**Key words:** *thermal variation; urban climate, heat island*

## Introduction

Sur le territoire brésilien, la plus grande population est concentrée dans les zones urbaines, ce qui souligne l'importance de mener des études sur ce thème. L'urbanisation comme un phénomène dynamique façonne le tissu urbain, lui ajoutant des formes et des fonctions inhérentes aux exigences économiques par accumulation temporelle d'actions sur l'environnement, qui se traduit par une redéfinition constante de l'espace urbain et de ses contrastes. La façon dont l'homme occupe le sol est un des principaux responsables des changements dans la dynamique environnementale. Les objets et les actions contenus dans l'espace urbain sont étroitement liés, il n'est donc pas possible de séparer le résultat obtenu des actions qui agissent sur lui (SANTOS, 2008).

Les fonctions, les fonctionnalités et la mobilité de chaque ville se traduisent par une gamme d'interconnexions et de flux qui génèrent des spécificités locales par le biais de facteurs qui modifient, réorientent ou chevauchent les caractéristiques du paysage d'origine. La composante climatique n'est pas exclue de cette interférence, car l'environnement atmosphérique reçoit les effets de l'action anthropique, de l'échelle microscopique aux échelles supérieures. L'artificialisation de l'environnement déclenche des scénarios uniques du climat urbain local, et il peut être conçu comme une condition environnementale à risque. Ainsi, les études du climat urbain sont un outil important pour le diagnostic environnemental.

Monteiro (1976, p. 95) définit le Système Climatique Urbain (SCU) comme quelque chose qui «englobe le climat d'un espace terrestre donné et son urbanisation». Ce système dans sa dimension scalaire interagit à travers une interconnexion entre le naturel et singulier - climat local, et le phénomène social qui se manifeste par l'urbanisation, en plus d'être conçu pour une intégration à des niveaux supérieurs (climats sous-régionaux et saisonniers) et à des niveaux inférieurs (microclimats). Landsberg (2006) souligne que la ville, lorsqu'elle interagit avec le climat local, peut interférer dans la réduction du: rayonnement atmosphérique à la surface, visibilité, humidité et des vents, tandis qu'il y a une augmentation du potentiel électrique de l'atmosphère urbaine, dans les précipitations locales, de la température et de la nébulosité.

Les études de climat urbain sont un outil important pour le diagnostic environnemental. Dans les villes brésiliennes, trois aspects importants peuvent être ajoutés à cette perspective analytique: presque toutes les municipalités ignorent les caractéristiques topoclimatiques et climatiques locales, ce qui désavantage la gestion des problèmes environnementaux de la ville; la planification urbaine et environnemental est précaire, ce qui favorise et exacerbe les conséquences inhérentes au climat urbain - même dans les petites villes; et la plupart des villes se situent dans la gamme de latitude tropicale, avec des températures élevées non seulement au printemps et en été, ce qui entraîne un inconfort thermique. C'est dans ce contexte que cette recherche a été menée avec l'objectif de déterminer l'existence d'un îlot thermique dans la ville de Limeira, située dans la partie centre-est de l'État de São Paulo, dans la région située au sud-est du territoire brésilien.

## **1. Données et Méthodes**

### ***1.1 Collecte de données***

Pour la définition des points de collecte de données, une recherche sur le terrain a été effectuée et deux trajets ont été définis (A et B). Les activités de collecte de données se sont déroulées sur cinq jours consécutifs, en deux saisons. Au cours de la période du 15 au 19 juillet 2013 et du 29 janvier au 1er février 2014, afin d'appréhender les caractéristiques saisonnières dans des mois d'hiver et d'été représentatifs, respectivement, et les répercussions de celles-ci dans la variation du champ thermique de la ville. Le choix des horaires (9h, 15h et 21h) se justifie par l'objectif de vérifier les variations thermiques spatiales intra-urbaines tout au long de la journée. Les données ont été collectées en deux points fixes - l'un d'eux la station météorologique locale et 38 autres, avec des enregistrements obtenus à partir de thermohygromètres numériques (Minipa - modèle MT241), dans deux transects mobiles. Les transects ont été réalisés simultanément, début et fin en milieu rural, dans les régions plus reculées de l'occupation urbaine dense, comme le suggèrent Oke (1982), Pitton (1997), Amorim (2000), Fialho (2009), Minaki (2013) parmi d'autres.

La collecte du point fixe a eu lieu en même temps que les transects mobiles, mais toutes les dix minutes pour coïncider avec les enregistrements de la station météorologique automatique de la ville. L'équipement était fixe et couplé à des tubes en PVC - protégés des facteurs externes pour garantir la qualité des données - positionnés dans les voitures et au point fixe, à une hauteur de 1,50 mètre par rapport au niveau du sol. Les thermohygromètres ont été précédemment calibrés à la station météorologique du Centre Supérieur D'enseignement Technologique (CESET), situé sur le campus de la Faculté de Technologie de l'Université d'État de Campinas (FT-UNICAMP Limeira-SP), vérifiant leur fiabilité.

Dans le but mieux les résultats obtenus lors de la collecte, on a également recueillies des données sur: la température, l'humidité relative, les précipitations, la direction et intensité du vent, données fournies par la station météorologique de Limeira; des images du satellite Goes 13 dans la bande Infrarouge 4, fournies par le Centre de Prévisions Météorologiques et D'études Climatiques - CPTEC et les cartes synoptiques de surface fournies par le service

météorologique de la Marine - considérant un jour avant et un jour après la période de collecte, afin de vérifier la continuité des performances des systèmes atmosphériques.

### ***1.2 Traitement et cartographie des données***

Les données collectées ont été traitées de la façon suivante: a) correction du temps de collecte des données entre les points de départ et d'arrivée des itinéraires: chaque donnée obtenue subi une correction tout au long du temps de collecte, comme suggéré Barbirato et al (2007); ainsi, ils ont été corrigés sur la base de l'élaboration du graphe de dispersion et de l'équation de la ligne de corrélation linéaire de chaque thermohygromètre selon (FIALHO et al, 2011). La procédure a supprimé les effets du chauffage ou du refroidissement causés par la variation horaire de chaque lecture; b) spatialisation des données collectées: des cartes thermiques ont été développées pour chaque heure de collecte quotidienne. Pour interpoler les données, la méthode de krigeage a été utilisée, en utilisant les logiciels Surfer8 et ArcGis10; c) analyse rythmique épisodique: elle a été appliquée pour l'identification des systèmes atmosphériques fonctionnant pendant la période de collecte de données, avec les caractéristiques des types de temps et des systèmes atmosphériques respectifs agissant dans les épisodes hivernaux et l'été; et d) évaluation qualitative des unités paysagères du site urbain: pour une meilleure compréhension de l'espace intra-urbain.

### ***1.3 Secteur d'étude***

La municipalité de Limeira est insérée dans la dépression périphérique moyenne à São Paulo (Média Depressão Periférica Paulista), une zone située entre les plateaux atlantique (Planalto Atlântico) et occidental à São Paulo (Planalto Ocidental Paulista). Il présente un relief de larges collines aux sommets lisses et ondulés, avec des altitudes comprises entre 500 et 700 mètres. Dans la structure climatique de l'État de São Paulo, le positionnement latitudinal et géomorphologique de la municipalité la place dans une zone qui fonctionne comme un couloir pour l'alternance d'action entre les systèmes climatiques inter et extratropicaux. Pendant l'été, des zones de basse pression se forment à l'intérieur de l'hémisphère sud, ce qui favorise l'entrée de masses d'air chaud et humide; ainsi, les systèmes intertropicaux sont élargis; en hiver, l'anticyclone migrateur polaire agit plus fréquemment, augmentant les performances de la masse polaire aux basses latitudes. La région du Sud-Est étant située à la limite orientale de l'Amérique du Sud, la ligne du tropique du Capricorne passe sur le territoire, la plus grande partie étant située dans la zone tropicale, sous l'influence directe de l'océan Atlantique. Ainsi, le rythme climatique de la région est défini par l'existence d'une période de l'année de sécheresse (automne et hiver) et d'une période pluvieuse (printemps et été).

Pendant la période hivernale, l'augmentation de la pression de l'anticyclone migrateur polaire permet une entrée plus vigoureuse de l'air polaire, ce qui provoque le retrait des masses d'air tropicales, garantissant à la région des conditions de stabilité et peu de précipitations. En été, les perturbations frontales sont plus fréquentes et l'augmentation de l'occurrence des pluies est également alimentée par l'humidité apportée par les vagues du nord-ouest. Cette région peut être considérée comme une zone de transition entre les climats chauds de basse latitude et les climats tempérés de moyenne latitude. La ville de Limeira est insérée dans cette portion du territoire brésilien entre les coordonnées géographiques de 22 ° 27'S et 22 ° 44'S et 47 ° 12'W et 47 ° 30'W et agissent dans la circulation atmosphérique de la commune les masses d'air Tropical Atlantique, Polaire Atlantique, Tropical Continental, Equatorial Continental et Front Polaire Atlantique, qui commande le régime pluviométrique tout au long de l'année (MONTEIRO, 1973).

## **2. Résultats**

Dans l'épisode d'hiver, il y a eu quatre jours de stabilité atmosphérique et un jour d'instabilité. Ils ont agi de manière séquentielle: masse Tropical Atlantique (mTa le 15 juillet), masse Polaire Atlantique (mPa le 16 juillet), masse Polaire Ancienne ou Tropicalisée (mPv - le 17 juillet), masse Tropical Atlantique (mTa - le 18 juillet) et le Front Polaire Atlantique (FPA - 19 juillet). Dans cet épisode, les températures de l'air enregistrées à 9 h se situaient entre 14 et 26° C, à 15 h entre 17,8 et 30,1° C et à 21 h entre 14,5 et 21,3° C. Dans l'épisode d'été de tous les jours de collecte, il y avait des conditions de stabilité dans les performances et l'expansion de la masse Tropical Atlantique (mTa). Dans des conditions d'été et en l'absence de nébulosité, les différences thermiques entre zones urbaines et rurales étaient encore plus importantes. Les températures de l'air enregistrées à 9 h se situaient entre 22,2 et 28,5° C; à 15 heures entre 28,1 et 34,4° C; et à 21 h entre 20,2 et 31,2° C.

Considérant la variation du champ thermique dans l'épisode d'hiver, la plus grande différence thermique entre la température de la zone urbaine et la zone rurale a été identifiée dans des conditions de chauffage pré-frontal le 18 juillet, de l'ordre de 7,1° C. Dans la période nocturne (tableau 1), la plus grande différence s'est produite les 15 et 17 juillet, sous le contrôle de systèmes atmosphériques stables, avec des différences thermiques de 4,3° C et 4,2° C, respectivement. Le 19 juillet, le Front Polaire Atlantique (FPA) a agi et il y avait la plus faible intensité du champ thermique de tous les temps de collecte (1,4° C). Les plus grandes différences thermiques entre les zones urbaines et rurales se sont produites pendant la nuit et se situaient entre 7,3 et 9° C, avec une intensité plus élevée les jours 29 (8,9 °C), 30 (9,0° C) et 31 janvier (8,8 °C).

**Tableau 1. Différence thermique entre zones urbaines et rurales (en ° C) et systèmes atmosphériques actifs, selon l'épisode, pour 21 h.**

Date	Hiver					Été				
	15/07	16/07	17/07	18/07	19/07	28/01	29/01	30/01	31/01	01/02
Différence Thermique	4,3	3,5	4,2	3,5	1,4	7,3	8,9	9,0	8,8	7,6
Masse d'air	mTa	mPa	mPv	mTa	FPA	mTa	mTa	mTa	mTa	mTa

Parmi les résultats obtenus, il a été vérifié l'existence d'un noyau thermique plus chaud dans la partie nord-ouest de la ville et dans l'axe de conduite près du cours d'eau principal dans la zone centrale - zones de grand flux de véhicules (figure 1 et 2). Les zones de printemps où la forêt ciliaire originale existe encore ont enregistré les températures les plus basses. Il a également été observé que lors de la collecte de données, été comme hiver, la performance des systèmes atmosphériques stables était prédominante - situation défavorable par rapport aux conditions habituelles de l'été local. Dans ces conditions, la plus grande différence thermique entre la zone rurale et la zone urbaine s'est produite en été (9,0°C), alors qu'en hiver, la plus grande différence était 4,3°C.

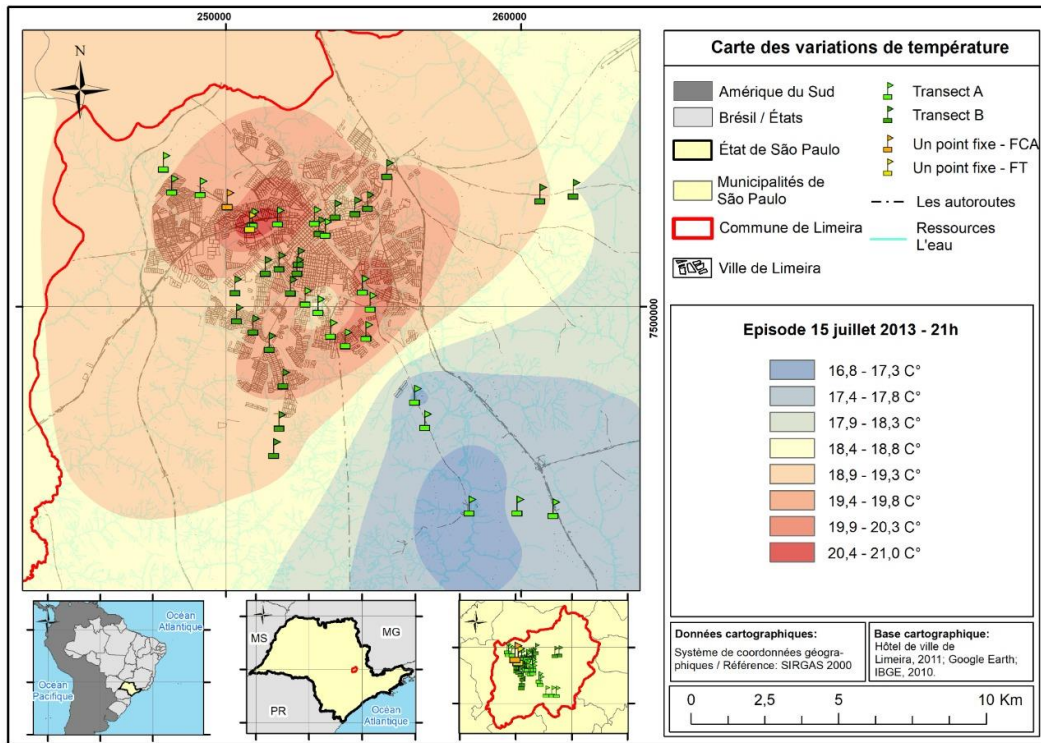


Figure 1. Variation thermique spatiale de la ville de Limeira le 15/07/2013 à 21 h.

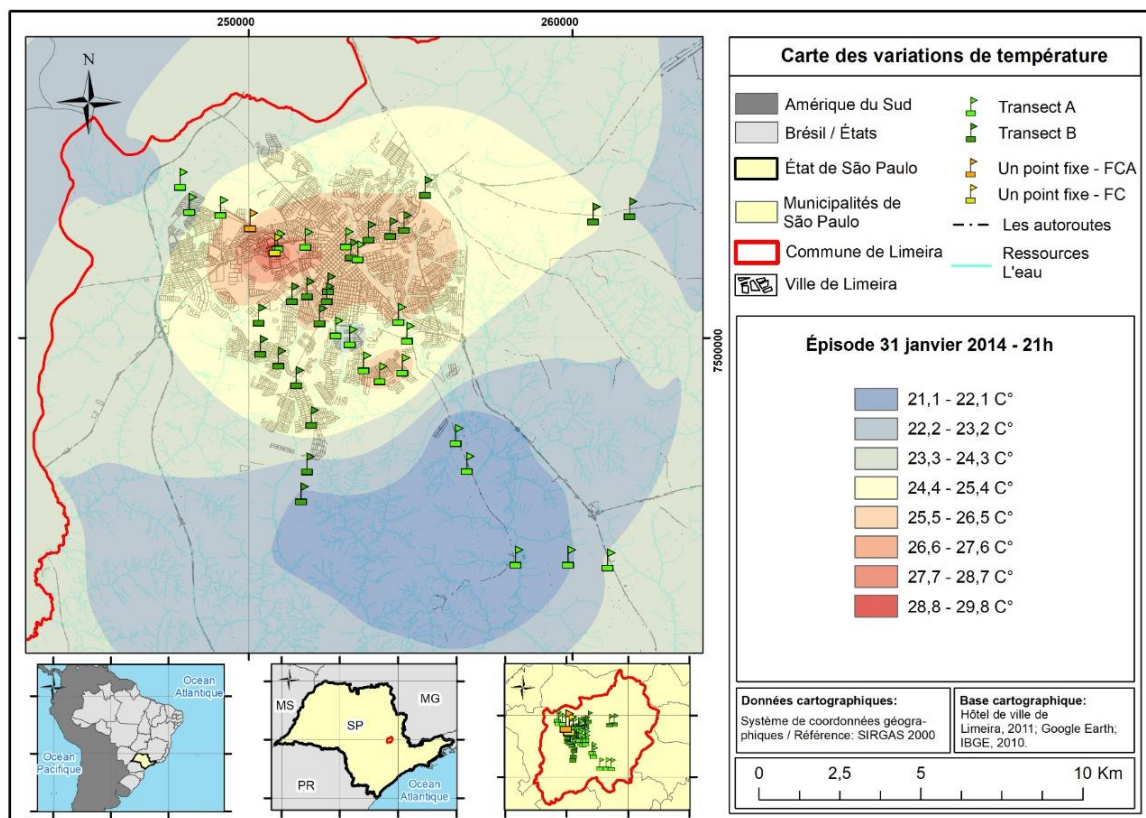


Figure 2. Variation thermique spatiale de la ville de Limeira le 30/01/2014 à 21h.



## Conclusions et Discussion

L'adoption de procédures méthodologiques, qui étaient déroulées en trois phases, s'est avérée efficace pour l'objectif proposé par l'étude. Grâce aux transects, il a été possible de multiplier les points de collecte des données et d'enregistrer les variations de température dans la couche intra-urbaine, au niveau des topoclimats, où les caractéristiques du paysage révèlent les détails de la ville. L'existence d'un îlot de chaleur dans la zone d'étude et sa variabilité selon la dynamique atmosphérique et les caractéristiques saisonnières ont été identifiées. Dans la zone d'étude, la période d'hiver a tendance à être plus sèche, elle offre donc des conditions plus favorables à la survenue du phénomène. Cependant, au cours de la recherche, il y a eu des situations d'instabilité dans l'épisode d'hiver et de stabilité dans l'épisode d'été, ce qui a entraîné une plus grande différence thermique pour le second - accentuant la différence de température entre la ville et le milieu rural - ce qui démontre l'influence de la dynamique atmosphérique sur l'intensité du phénomène, même si la matérialité et les formes de la ville génèrent des changements thermiques en surface. L'étude a démontré l'importance d'évaluer le champ thermique dans les villes moyennes insérées dans le contexte de la variabilité d'un climat tropical, qui a généré des produits utilisables en urbanisme.

## Remerciement

Remerciements au Fonds d'appui à la recherche de l'État de São Paulo (FAPESP), qui a financé le Projet *Géographie des risques et des changements environnementaux: construction de méthodologies pour l'analyse de la vulnérabilité (GERMA)*, développé au Laboratoire de Géographie des Risques et de la Résilience (LAGERR), de la Faculté des Sciences et Technologies (FCT) UNICAMP - campus Limeira - dont fait partie cette recherche.

## Bibliographie

- Amorim, M. C. C. T., 2000. O clima urbano de Presidente Prudente/SP. São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 322 p.
- Barbirato, G. M. et al., 2007. Clima e a cidade:a abordagem climática como subsídio para estudos urbano. Maceió, UFAL, 164p.
- Braga, L. C., 2015. Variações espaciais do campo térmico da cidade de Limeira/SP : um estudo do clima urbano no contexto das mudanças ambientais. Campina, Universidade Estadual de Campinas, 115 p.
- Fialho, E. S., 2009. Ilha de calor em cidade de pequeno porte: Caso de Viçosa, na Zona da Mata Mineira. São Paulo, Universidade de São Paulo, 279 p.
- Fialho, E. S. et al., 2011. Clima e Sitio na Zona da Mata Mineira: Uma análise em episódios de verão. *Revista Brasileira de Climatologia*, Ano 7, v. 8. Jan/Jun 2011, 118-136.
- Landsberg, H. E., 2006. O clima das cidades. *Revista do Departamento de Geografia* (18). 95-111.
- Minaki, C., 2013. Análise da temperatura e da umidade relativa do ar na primavera-verão em Araçatuba/SP. *Revista Brasileira de Climatologia* (9), v. 12, jul./dez. 2013. 236-247.
- Monteiro, C. A. de F., 1976. Teoria e Clima Urbano. São Paulo: EDUSP.
- Oke, T. R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* (108), 1-24.
- Pitton, S. E. C., 1997. As cidades como indicadoras de alterações térmicas. São Paulo, Universidade de São Paulo, 272 p.
- Santos, M., 2008. A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo.

# TENDANCE PLUVIOMETRIQUE DE LA SAISON PLUVIEUSE DANS LE TOGO CENTRAL ET SEPTENTRIONAL

PILABINA Somiyabalo\*<sup>1</sup>, YABI Ibouaïma<sup>2</sup> et KOLA Edinam<sup>1</sup>

1 = Département de Géographie, Université de Lomé, Togo, Email : [spilabina85@gmail.com](mailto:spilabina85@gmail.com) ; [edikola@yahoo.fr](mailto:edikola@yahoo.fr)

2 = Département de Géographie et Aménagement du Territoire (DGAT), Université d'Abomey-Calavi (UAC), E-mail : [yafid2@yahoo.fr](mailto:yafid2@yahoo.fr)

\* = auteur principal et correspondant

## Résumé

*De nos jours, la variabilité climatique, surtout pluviométrique, a des conséquences considérables sur la saison culturale et sur la production agricole surtout dans les pays tropicaux comme le Togo. Cette recherche vise à caractériser l'évolution des descripteurs pluviométriques intra saisonniers notamment les début et fin de saison des pluies dans le Togo central et septentrional. Les données utilisées sont essentiellement les précipitations journalières sur la période 1950 à 2015. Un ensemble de tests de stationnarité a été appliqué à l'indice de Nicholson afin de relever la variabilité des précipitations et des paramètres caractéristiques de la saison culturale en termes de risques. Les résultats montrent une tendance générale à la baisse avec des années de ruptures observées plus au courant de la décennie 1970. Le déficit pluviométrique dans la première phase varie entre 11,2 % à Dapaong et 22,4 % à Pagouda. Seul Kara et Sotouboua connaissent une augmentation dans leur première phase et un déficit dans leur deuxième phase. La saison des pluies commence généralement dans la troisième décennie du mois d'avril et prend fin dans la troisième décennie d'octobre. La corrélation entre le début et la longueur de la saison des pluies traduit le fait que les débuts tardifs de pluies entraînent un raccourcissement de la durée de saison et inversement pour les débuts précoces. La latitude est le paramètre le plus déterminant de la répartition des dates de démarrage de la saison des pluies. Dans ce contexte, il est indispensable de réajuster le calendrier cultural tenant compte de la variabilité des paramètres de la saison des pluies.*

**Mots-clés :** Variabilité pluviométrique, test statistique, saison des pluies, descripteurs saisonniers, Togo central et septentrional

## Introduction

Les sociétés rurales d'Afrique (60 à 80 % de la population) sont considérées comme les plus vulnérables de la planète face aux variations climatiques (Oram, 1985 ; Hansen, 2002 ; Barbier *et al.*, 2009 ; Marteau, 2010) ; vu que leur économie et leur sécurité alimentaire sont étroitement liées à l'agriculture pluviale. Cette pluviométrie est très variable affectant l'activité principale de toutes ces populations. En effet, les travaux de Bricquet *et al.* (1997), Servat *et al.* (1998), Paturel (1998), Goula *et al.* (2006), Dongo *et al.* (2007) et Diomandé (2013) montrent que les modifications pluviométriques se font ressentir en Afrique de l'ouest depuis les années 1970.

La plupart des études se sont intéressés aux précipitations annuelles, saisonnières et mensuelles (Badameli, 1996, 1998 ; Klassou, 1996 ; Alidjao, 1997 ; Adewi, 2002 ; Dalouba, 2004 ; Adewi *et al.*, 2010 ; Lemou, 2008 et 2014 ; Badjana *et al.*, 2017 ; Pilabina, 2015 et 2019) et ont conclu à l'existence d'un déficit pluviométrique depuis les années 1970 au Togo.

Cette dépendance de l'agriculture vis-à-vis du climat, principalement de la pluviométrie, devient une problématique de plus en plus récurrente pour les exploitants agricoles, mettant en avant la question de la vulnérabilité agricole et de l'insécurité alimentaire (Dekoulaet *al.*, 2018). Or, une connaissance de la saison des pluies en termes de dates de début et de fin, de longueur et de cumul pluviométriques saisonniers pourrait aider les agriculteurs dans le choix des moments de semis et des variétés à semer pour minimiser les risques climatiques (Balme *et al.*, 2005 ; Dekoulaet *al.*, 2018). L'objectif de cette étude est de caractériser l'évolution des descripteurs pluviométriques intra saisonniers notamment les début et fin de saison des pluies dans le Togo central et septentrional.

## 1. Matériels et méthodes

### 1.1. Site de l'étude

L'espace d'étude qui est le Togo central et septentrional est étalée sur quatre degrés de latitude c'est-à-dire entre 8° et 11° de latitude nord (figure 1).

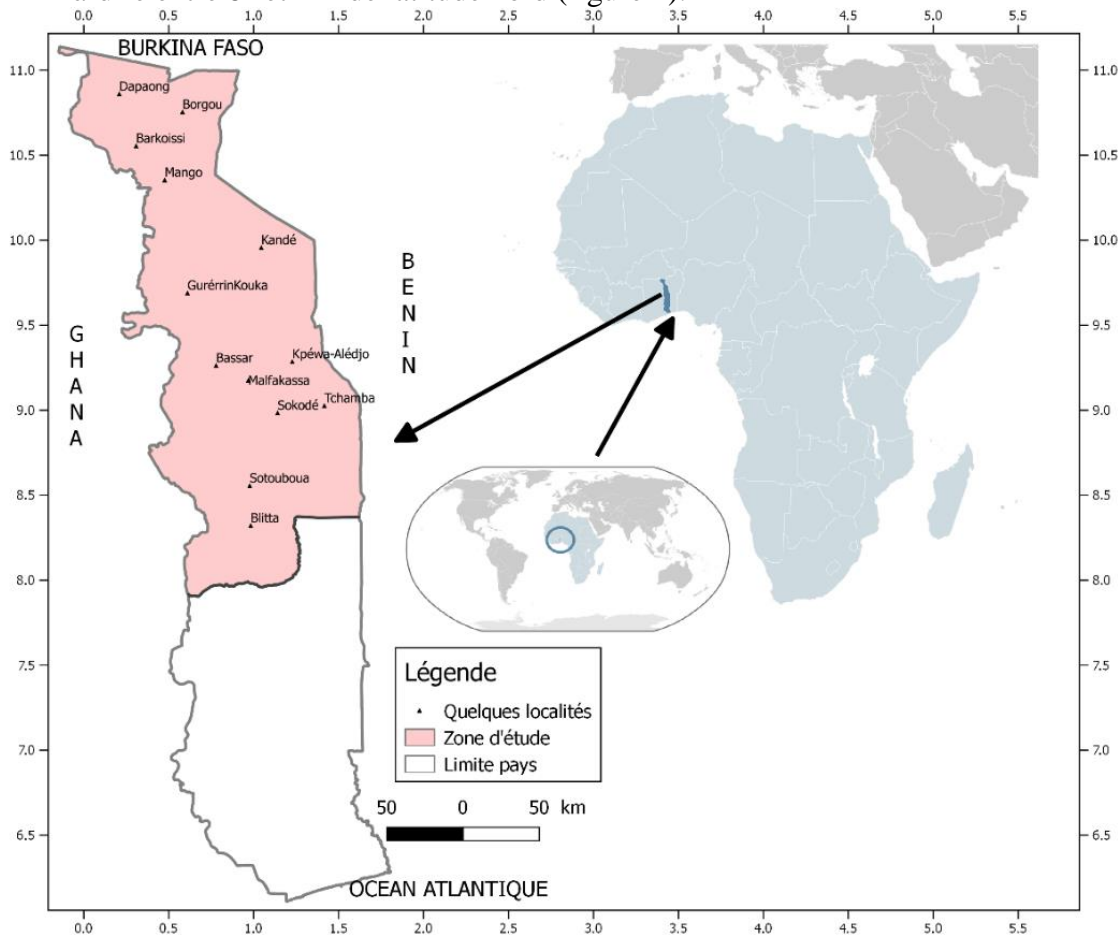


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude

La grande partie de cette zone est dominée par le bassin de la Volta drainé par des rivières comme Oti, Kéran, Koumongou, Kara et Mò ; puis une petite partie (dans la région centrale), drainé par le bassin du Mono ou le Mono nord. Il est compris entre  $-0^{\circ}14'$  et  $1^{\circ}65'$  de longitude est et entre  $7^{\circ}90'$  et  $11^{\circ}14'$  de latitude nord. La région septentrionale du Togo occupe une superficie de  $33\,727\text{ km}^2$ .

### 1.2. Données

Les différentes dates de début et de fin de saison de pluies sont calculées à partir des données journalières de 1950 à 2015 pour Dapaong, Mango, Kara, Sokodé et Sotouboua ; 1950 à 2015. Ces données ont été collectées auprès de la Direction Générale de la Météorologie Nationale au Togo.

### 1.3. Méthodes

Le début de la saison des pluies comme étant une succession significative de jours de pluies (qui offre une disponibilité en eau pour l'agriculture) aux mêmes conditions atmosphériques dont les effets (reprise du cycle végétatif des plantes) sont perceptibles au niveau de la végétation. Le début intervient quand 2 jours consécutifs cumulent 20 mm non suivis d'une séquence de 7 jours sans pluie durant 20 jours (Lahuec, 1991 ; Sivakumar et Awesso, 1996 ; Tchiadeuet al., 1999 ; Samba et al., 1999 ; Adéwiet al., 2010 ; Dekoulaet al., 2018 ; Pilabina, 2019). La fin selon ces auteurs intervient lorsque 2 jours consécutifs reçoivent un total pluviométrique de moins 6 mm et suivis d'une période d'au moins 6 jours sans pluie, ou quand

leur total est inférieur à 10 mm. Pour le compte de cette étude, la date de début des pluies se situe après le 1<sup>er</sup> mars alors que la date de la fin des pluies intervient après le 1<sup>er</sup> octobre.

## 2. Résultats

### 2.1. Date probable de début et de fin de saison des pluies

L'enjeu consiste à déterminer pour différentes régions, le début, la fin et éventuellement la longueur de la saison des pluies avec une marge d'erreur minimum. Dans le cadre de cette étude, l'analyse se porte essentiellement sur la pluviométrie et la méthode agronomique. Les graphiques de début et de fin de saison de pluies (figures 4) présentent de grandes variations interannuelles.

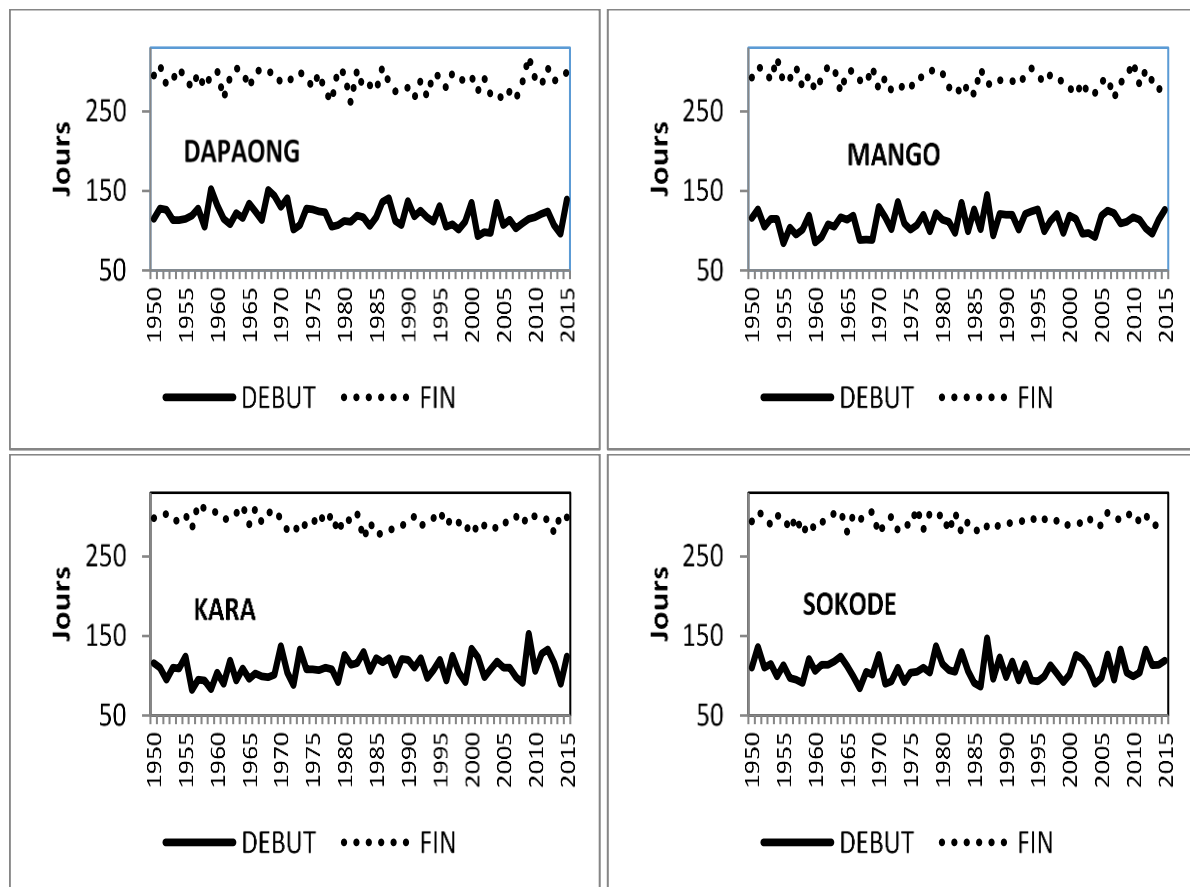


Figure 2 : Variabilité interannuelle des dates de démarrage et de fin de la saison des pluies

Source : Pilabina, à partir du traitement de données de la DGMN (2017)

Au regard de ces graphiques, la saison des pluies débute le plus souvent dans la troisième décennie du mois d'avril et prend fin en octobre dans la deuxième et troisième décennie dans les stations du nord (Dapaong et Mango). Pour Kara qui est au centre, la saison débute plus fréquemment dans la deuxième décennie et s'arrête au cours de la troisième décennie. À Sokodé qui est plus au sud, la saison débute dans la première décennie du mois d'avril et finit dans la troisième décennie au mois d'août. Globalement, le début de la saison des pluies varie entre mars, avril et mai voire même juin tandis que la fin de la saison pluvieuse s'observe au cours des mois de septembre, octobre et novembre. Le tableau 1 fait ressortir les occurrences du début et de la fin de saison de pluies au cours des différentes décades.

### 2.2. Longueur de la saison des pluies

La longueur de la saison des pluies est aussi variable que le début et la fin de la saison des pluies. Elle est de 5 à 6 mois à dans la zone d'étude (tableau2).

Tableau 1 : Occurrence du démarrage et de fin de saison des pluies

Stations	Décade	Début de saison			Fin de saison		
		mars	avril	mai	sept	oct	nov
Dapaong	1		9,1	19,7		24,6	1,5
	2		25,8	13,6	4,6	29,2	
	3		27,3	4,5	9,2	30,8	
Mango	1		22,7	13,6		22,7	7,6
	2		18,2	3,0		36,4	1,5
	3	7,6	33,3	1,5	10,6	21,2	18,2
Kara	1		22,7	15,2		16,7	9,1
	2		30,3	6,1		27,3	1,5
	3	9,1	15,2	1,5	1,5	43,9	
Sokodé	1		27,3	9,1		16,7	6,1
	2		24,2	6,1		37,9	
	3	9,1	22,7	1,5		39,4	

Source : Pilabina, à partir du traitement de données de la DGMN (2017)

Tableau 2 : Date de démarrage et de fin de la saison des pluies

Stations	Début		Fin		Durée (mois)
	Nb de jours	Date	Nb de jours	Date	
Dapaong	118	27-avr	288	14-oct	5,7
Mango	110	19-avr	289	15-oct	6,0
Kara	110	19-avr	295	21-oct	6,2
Sokodé	108	17-avr	294	20-oct	6,2

Source : Pilabina, à partir du traitement de données de la DGMN (2017)

Ainsi, sur l'ensemble du Togo central et septentrional, la saison des pluies commence au 109e jour, soit le 18 avril et prend fin au 293e jour, soit le 19 octobre. Ainsi, déjà en avril les vents de mousson couvrent l'ensemble de la région et se retirent au mois d'octobre.

### 2.3. Corrélation entre début, fin et longueur avec les latitudes et les longitudes

La corrélation entre les trois paramètres (longueur, début et fin de saison) a été calculée dans l'optique de déterminer si un début précoce ou tardif des pluies a un impact d'une part, sur la longueur de la saison des pluies et d'autre part sur les dates de fin de saison (tableau 2).

Tableau 2 : Corrélation entre début, fin et longueur de la saison des pluies

Corrélation	Dapaong	Mango	Kara	Sokodé
Début/Fin	0,3	0,0	-0,2	0,1
Début/Longueur	-0,6	-0,8	-0,9	-0,8

Source : Pilabina, à partir du traitement de données de la DGMN(2017)

Au regard du tableau, de fortes valeurs de corrélations ( $>|0,7|$ ) sont relevées entre le début et la longueur de la saison des pluies. Cela traduit le fait que les débuts tardifs de pluies entraînent un raccourcissement de la durée de saison et inversement pour les débuts précoces. En revanche,

les faibles corrélations entre le début et la fin de saison des pluies montrent l'indépendance des deux paramètres.

### **3. Discussions**

Dans le Togo central et septentrional, la campagne agricole est affectée par une instabilité pluviométrique multiforme. Il s'agit des démarrages tardifs et des fins précoces des pluies, préjudiciables aux activités agricoles. Ces observations concordent avec les résultats de Diop (1996), Sane *et al.* (2008), Sarret *et al.* (2011) et Mahaman (2011) qui ont fait les mêmes constats dans plusieurs pays de l'Afrique de l'Ouest. Pour ces auteurs, depuis les années 1970 à la faveur des sécheresses qui ont marqué la sous-région, la saison pluvieuse présente une variabilité accentuée qui compromet la mise en œuvre des activités agricoles dont les calendriers sont calqués sur les conditions pluviométriques moyennes. Au Bénin, les travaux de Yabi et Boko (2008), Zakari *et al.* (2012), Allé (2013) et Yabi (2013) ont abouti aux conclusions presque identiques. Selon ces auteurs en effet, la qualité des saisons agricoles s'est sérieusement dégradée depuis quelques décennies dans la mesure où les longueurs des saisons agricoles se raccourcissent de plus en plus sans oublier les faux départs et des interruptions de pluies au cœur de la saison. Selon Balme *et al.* (2005), les dates de démarrage de la saison des pluies calculées ponctuellement sont très dispersées dans l'espace et dans le temps. Suivant le critère choisi, la saison des pluies varie ainsi de 105 jours (critère agronomique) à 157 jours (critère hydrologique) sur la période 1990-2001. Ces résultats sont presque identiques à ceux obtenus dans le Togo central et septentrional. Cependant, en moyennant chaque année les dates de démarrage agronomique sur la zone d'étude, l'on s'aperçoit qu'on peut définir le début d'une période assez stable où la mousson est bien établie et qui représente, en termes d'apports pluviométriques, 90 % du cumul saisonnier (Balme *et al.*, 2005).

Contrairement aux totaux pluviométriques qui se sont améliorés à partir des années 1990, les longueurs de la saison agricole et les hauteurs saisonnières de pluie sont restées faibles en comparaison aux valeurs de la période d'avant les années 1970. Ces constats posent le problème de la répartition temporelle des pluies qui est un aspect important en agro-climatologie où les totaux pluviométriques sont moins déterminants pour la réussite d'une campagne agricole. De même, ces observations suggèrent que les pluies extra-saisons sont de plus en plus importantes et amènent à mieux réfléchir sur les possibilités de mobilisation de ces eaux pluviales à des fins agricoles (Issa, 2012 ; Yabiet *et al.*, 2013).

### **Conclusion**

Le Togo central et septentrional est logé dans la partie intertropicale caractérisée par des températures chaudes tout au long de l'année. L'analyse des données de précipitations révèle que les plus importantes précipitations commencent en avril pour finir en octobre. Au cours de ces mois, le sud du Togo central et septentrional est toujours plus arrosé que le nord avec une variation pluviométrique des isohyètes moyennes mensuelles qui montre le découpage de l'année en deux grandes périodes : une saison humide (avril-octobre) et une saison sèche ou moins arrosée (novembre-mars). Il est remarqué que la latitude est le paramètre le plus déterminant de la répartition des dates de démarrage de la saison des pluies. Dans la plupart des cas, la saison des pluies débute dans la dernière décade du mois d'avril soit la première ou deuxième décade du mois de mai. Avec la fin de ces pluies constatée surtout dans la dernière décade du mois de mars fait observer un raccourcissement de la saison des pluies obligeant les populations à définir des mesures adaptatives.

## Références bibliographiques

- Adewi E., 2002. *Les stratégies agricoles de la gestion de la crise climatique*. Mémoire de DEA en Géographie, Université de Lomé-Togo, 75 p.
- Afouda F., Salako M. A. et Yabi I., 2014. Instabilité intra-saisonnière des pluies de la grande saison agricole dans la commune de Kétou au Bénin. In *Revue de Géographie du Laboratoire Leïdi (RGLL) « Dynamiques des territoires et Développement »*, pp 26-47.
- Badjana H. M., Renard B., Helmschrot J., Edjamé K. S., Afouda A. and Wala K., 2017. Bayesian trend analysis in annual rainfall total, duration and maximum in the Kara River basin (West Africa). *Journal of Hydrology*, pp 255–273.
- Balame M., Galles S. et Lebel T., 2005. Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique analysée à partir des données EPSATNiger. *Sécheresse*, pp 15-22.
- Balme M., Galle S. et Lebel T., 2005. Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger. *Sécheresse*, 16(1), 15-22.
- Dalouba G., 2004. *Le réchauffement de la planète et son impact sur les ressources en eau dans la région de la Kara (nord Togo)*. Mémoire de maîtrise en Géographie, Université de Lomé-Togo, 136 p.
- Diop M., 1996. À propos de la durée de la saison des pluies au Sénégal. *Sécheresse*, 7, 7-15.
- Lémou F., 2014. *Dynamique climatique et production agricole dans la Région de la Kara (Nord-Togo)*. Thèse de doctorat, Université de Lomé, 308 p.
- Marteau R., 2010. Cohérence spatiale et prévisibilité potentielle des descripteurs intrasaisonniers de la saison des pluies en Afrique Soudano-Sahélienne : application à la culture du mil dans la région de Niamey. Histoire. Université de Bourgogne, 243 p.
- Marteau R., Sultan B., Moron V., Baron C., Seydou Traoré B., 2010. Démarrage de la saison des pluies et date de semis du mil dans le sud-ouest du Niger. XXIIIe colloque de l'Association Internationale de Climatologie. Risques et changement climatique, Sep 2010, Rennes, France. pp.379-384. hal-00514811
- Sane T., Diop M. et Sagna P., 2008. Étude de la qualité de la saison des pluieuses en Haute-Casamance (Sud Sénégal). *Sécheresse*, pp 23-28.
- Sarr B., Kafando L. et Atta S., 2011. Identification des risques climatiques de la culture du maïs au Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, pp 1659-1675.
- Sivakumar M. V. K. et Awesso T., 1996. *L'analyse pluviométrique du Togo pour une planification à long terme*. Centre sahélien de l'ICRISAT, 158 p.
- Yabi I. et Boko M., 2008. Recherche sur le démarrage de la saison pluvieuse dans le Département du Borgou au Bénin (Afrique de l'Ouest). *Actes du XXIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Montpellier, France, pp 673-678.
- Yabi I., 2013. Incidences de la variabilité de la durée de la seconde saison agricole sur laproductionde l'arachide dans la commune de Savalou au Bénin. *Revue de géographie du laboratoire Leïdi n° 11*, Saint Louis, Sénégal, pp 58-74.
- Yabi I., Afouda F., Boko G. J. et Boko M., 2013. Évolution récente de la pluviométrie pendant la grande saison humide dans le Sud-Bénin. *Actes de la Deuxième Conférence Internationale de WAQUA*, Cotonou, pp 54-66.
- Zakari S., Yabi I. Ogowale E. et Boko M., 2012. Analyse de quelques caractéristiques de la saison des pluies dans le Département du Borgou (Bénin, Afrique de l'Ouest). *Actes du XXVème Colloque de l'AIC*, Grenoble, France, pp 693-698.

# SÉCURITÉ ALIMENTAIRE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE EN RÉGION AMORON'I MANIA MADAGASCAR

Randriamifidison R.F.A. <sup>(1)</sup>, Tsiavahananahary T.J. <sup>(2)</sup>, Rejo-Fienena F. <sup>(3)</sup>, Rene de Rolland L.A. <sup>(4)</sup>, Andriamampihantona F. <sup>(5)</sup>

(1) Institut Supérieur de Technologie d'Ambositra, Madagascar. rindrarandriamifidison@yahoo.fr

(2) Faculté des Sciences de Technologie et Environnement, Université de Mahajanga, Madagascar. ttjorlin@yahoo.fr

(3) Ecole Doctorale de Biodiversité et Environnement Tropicaux Toliara, Madagascar. rejofelicite@yahoo.fr

(4) The Peregrine Fund Madagascar, lilyarson@yahoo.fr

(5) Ecole Doctorale ENS Toliara (Laboratoire de Recherche Interdisciplinaire sur la société, Dynamique des populations et Environnement, famato@tandavanala.org

**Résumé :** Cette étude porte sur l'analyse des liens éventuels entre sécurité alimentaire et changement climatique dans la Région Amoron'i Mania, dans le but d'orienter les stratégies d'adaptation aux perturbations des paramètres climatiques pour les maillons des filières agricoles alimentaires, depuis la production jusqu'à la consommation finale. Comme approche méthodologique, nous avons opté pour la typologie des étapes nécessaires pour aboutir à la sécurité alimentaire selon la FAO : disponibilité, accès, acquisition, consommation, digestion. La Région Amoron'i Mania est fortement affectée par l'insécurité alimentaire, malgré la disponibilité des terres cultivables et des conditions édapho-climatiques favorables. Cette étude vise de ce fait à trouver des stratégies adaptées pour assurer la sécurité alimentaire de la Région Amoron'i Mania, tenant compte des paramètres climatiques actuelles et futurs avec une projection sur 20 ans avec 16 modèles issus du scénario RCP 4.5.

**Mots clés :** Amoron'i Mania, Sécurité alimentaire, variabilité climatique, filière agricole

**Abstract :** This study focuses on the analysis of links between food security and climate change in the Amoron'i Mania Region, with the aim of providing adaptation strategies to the climate change parameters for the agricultural food system, from production to final consumers. As a methodological approach, we have opted for the typology of the steps necessary to achieve food security according to the FAO: availability, access, acquisition, consumption, digestion. The Amoron'i Mania Region is strongly affected by food insecurity, despite the availability of arable land and a favorable edapho-climatic condition. This study will therefore attempt to find adapted strategies to ensure food security in the Amoron'i Mania Region, taking into account current and future climate parameters with a 20-year projection using 16 models from the RCP 4.5 scenario.

**Keywords :** Amoron'i Mania, food security, climate variability, agricultural supply

## 1. INTRODUCTION

La Région Amoron'i Mania, fait partie intégrante de la zone méridionale des Hautes Terres Centrales de Madagascar, c'est une région à vocation rurale à plus de 80% de l'occupation du sol. L'agriculture est l'artisanat sont les principales activités de la population. La région en présente d'ailleurs une très grande potentialité, du point de vue édapho-climatique et ressources. Pourtant, malgré une capacité de production agricole importante, la Région Amoron'i Mania figure au premier rang des Régions dont le taux de malnutrition est très élevé (ORN AMM, 2020). Elle dispose de 270 000 ha de superficie cultivable mais seulement 44,12% sont cultivées. L'insécurité alimentaire est fortement ressentie surtout pendant les périodes de soudure (Selon la FAO, cela correspond à Madagascar à la transition entre période de plantation et de récolte du riz). Parmi les objectifs spécifiques de développement rural de la Région, il est prévu d'«améliorer la sécurité alimentaire et d'augmenter la production et la transformation» pour aller vers une sécurisation alimentaire et un développement durable.

## 2. Matériels et méthodes



## **2.1. Spécificités de la zone de recherche**

Situé sur les hautes terres centrales de Madagascar, la Région Amoron'i Mania se situe sur l'axe de la Route Nationale 7, et présente une grande diversité tant sur les écosystèmes que sur les conditions édapho-climatiques de chaque zone. Le Schéma Régional d'Aménagement du Territoire d'Amoron'i Mania prévoit de délimiter 6 sous-zones selon les caractéristiques socio-économiques et écologiques des sites

## **2.2. Concept et cadrage international**

Selon Goossens, 1997, la sécurité alimentaire peut être définie comme l'accès pour tout le monde et à tout moment, à une nourriture suffisante ; l'étude de la sécurité alimentaire comprend la chaîne alimentaire dans son entier, depuis la production jusqu'à la consommation en passant par la commercialisation (Gordon, 1994). La FAO mise sur 5 points relevant de la mise à disposition d'une alimentation suffisante, l'accès individuel à une alimentation suffisante et adéquate; une alimentation suffisante et adéquate pour chaque individu, la digestion de l'alimentation consommée.

Concernant la sécurité alimentaire et le changement climatique, le Comité de sécurité alimentaire mondiale prévoit dans ses cinq (5) axes stratégiques une considération particulière des systèmes liés à l'agriculture par une adaptation et une révision des pratiques et le renforcement des collectes et partages d'informations, tenant compte de la Convention des Nations Unies sur le Changement Climatique (CNUCC) et de l'implication de tous les acteurs ; Ce qui va cadrer la logique de cette étude.

## **3. Approche méthodologique**

### **3.1. Données climatiques**

La démarche adoptée par Randriamifidison 2019 a été utilisée, vu que Ambositra ne dispose d'aucune station météorologique. En effet, les données historiques et de projection utilisées sont issues du «portail de connaissances sur le changement climatique pour les acteurs du développement et les décideurs» du Groupe de la Banque Mondiale. Pour cette étude, les données du portail de la Banque Mondiale couvrent ainsi les périodes entre 1991-2016 et 2020 à 2039, avec une résolution spatiale d'environ 50 km et une résolution temporelle de 30 min (www.cmip.edu). (Randriamifidison, 2019). Les données pour 2020 à 2039, c'est à dire les projections climatiques, font l'objet de calcul de médiane pour les 16 modèles disponibles sur le site de World Bank Group. ( bcc\_csm1\_1, bcc\_csm1\_1\_m, ccs4, cesm1\_cam5, csiro\_mk3\_6\_0, fio\_esm, gfdl\_cm3, gfdl\_esm2m, giss\_e2\_h, giss\_e2\_r, ipsl\_cm5a\_mr, miroc\_esm, miroc\_esm\_chem, miroc5, mri\_cgcm3, noresm1\_m ).

### **3.2. Pour les ressources en eau**

L'eau constitue une ressource stratégique pour l'agriculture et l'alimentation. Cette étude traitera ce point en particulier pour savoir si l'eau disponible est suffisante ou pas, malgré le changement climatique. Pour cette étude, le système d'aide à la décision «Water Evaluation And Planning (WEAP)» du Stockholm Environment Institute a été utilisé pour modéliser les ressources et les besoins en eau dans le Bassin versant de l'Isaha.

### 3.3. Pour l'analyse de la sécurité alimentaire

À part les données issues du MAEP (Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage) pour chaque Région de Madagascar, des enquêtes ont été conduites auprès de la population, de l'ordre de 160 ménages issus des 4 Districts d'Amoron'i Mania, Ambositra (chef lieu), Fandriana, Manandriana, Ambatofinandrahana. Des documents techniques et des personnes ressources ont ainsi apporté leur contribution dans la constitution des informations

## 4. Résultats

### 4.1. Variabilités des paramètres climatiques dans la Région Amoron'i Mania

Pour le cas de la Région Amoron'i Mania, sur les hautes terres de l'île, une zone à forte vocation agricole ; les projections climatiques prévoient en effet une anomalie de la précipitation mensuelle des hautes terres pour l'horizon 2039 allant jusqu'à -22 mm (avec le scénario de projection climatique RCP 4.5), ainsi qu'une hausse de température de plus de 1,2°C.

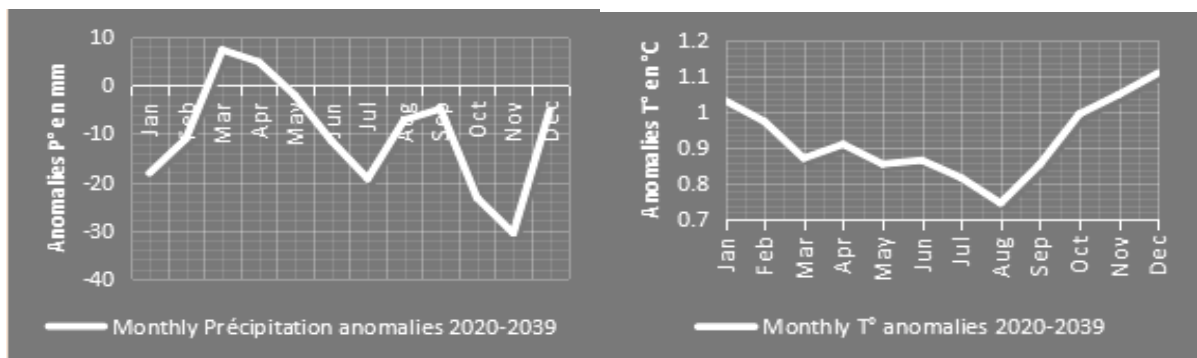


Figure 2,3 : Anomalies de précipitation (P°) et de Température (T°) de 2020 à 2039 pour la Région Amoron'i Mania relativement à la référence 1975-2015 avec le Scénario RCP 4.5 (WBG, 2021)

### 4.2. Perte des ressources en eau non utilisées convenablement

Le bassin versant de l'IsahaAmbositra a fait l'objet d'une analyse, étant donné que la population y est plus dense. Les résultats ont démontré que l'eau peut satisfaire largement les besoins de la population et de l'agriculture, la ressource en eau est largement suffisante pour Ambositra, la demande est satisfaite (Demande non satisfaisante = 0 m<sup>3</sup>). Prenons en exemple pour le mois de Novembre (période de repiquage pendant laquelle le besoin en eau est le plus important pour l'agriculture), l'eau disponible est estimée à 8,9 millions de m<sup>3</sup>, alors que l'agriculture n'utilise que 1,63 millions de m<sup>3</sup>. La modélisation annuelle donne au total un débit

entrant de. 169,95 millions de m3, mais que seulement 14,64 millions de m3 sont utilisés par la population et par l'agriculture.

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Sum
<b>Débâts entrant dans l'aire (Million Mètre cube)</b>													
En dessous de IsahaDébit de tête	29,38	26,47	29,73	16,30	9,91	6,74	6,43	5,92	4,38	4,18	8,09	22,42	169,95
<b>Débâts sortant de l'aire (Million Mètre cube)</b>													
Demande agri	0,00	0,10	0,18	0,20	0,00	0,00	1,10	1,97	1,11	1,19	1,63	1,30	8,78
Demande pop	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
En dessous de Demande agri Retour	29,38	26,37	29,55	16,10	9,91	6,74	5,33	3,95	3,27	2,99	6,46	21,12	161,17
Sum	29,38	26,47	29,73	16,30	9,91	6,74	6,43	5,92	4,38	4,18	8,09	22,42	169,95
<b>Demande non satisfaite (Mètre cube)</b>													
Demande agri	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Demande pop	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sum	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Exigence distribution (avec pertes, recycl., GSD) (Million Mètre cube)</b>													
Demande agri	0,00	0,17	0,30	0,33	0,00	0,00	1,83	3,29	1,85	1,98	2,71	2,17	14,64
Demande pop	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sum	0,00	0,17	0,30	0,33	0,00	0,00	1,83	3,29	1,85	1,98	2,71	2,17	14,64

Tableau1 : Données de référence moyennes mensuelles sur l'eau disponible et utilisée

Source :Randriamifidison & al , 2020

#### 4.3. *Situation nutritionnelle de la population de la Région Amoron'i Mania*

Ce tableau résume la situation de la Région Amoron'i Mania en terme d'alimentation

Le riz reste la base de l'alimentation des malgaches, dont la population de la Région Amoron'i Mania qui en a produit 184 740 t en 2020 (DRAEP AMM, 2020). Les enquêtes ont démontré que le riz cultivé par les ménages ne subvient pas à leur besoin annuel, c'est le cas de 74% de la population du District d'Ambositra, de 69% du District de Fandriana, de 49% du District d'Ambatofinandrahana et de 54% du District de Manandriana. Ainsi comme mentionné dans le tableau 2, pour compenser le déficit en riz pendant la période de soudure, 87,5% des ménages cultivateurs de la Région Amoron'i Mania utilisent le manioc comme produit de substitution du riz. Les Districts de Manandriana et d'Ambatofinandrahana produisent en grande quantité le manioc, l'arachide, l'haricot, et le soja car la température peut aller jusqu'à 32°C sur cette partie ouest de la Région et le sol est fertile. La culture maraîchère est très pratiquée principalement dans le Districts d'Ambositra, les deux ayant un microclimat favorable à cette culture. Le sol à Fandriana est généralement moins fertile culminant à une altitude plus élevée que les 3 autres District, et la température y est plus basse, pouvant descendre jusqu'à 3°C; laissant place aux plantes résistantes au froid, pommier, kaki, pomme de terre, etc., faisant la renommée de la région car ils en produisent des tonnes chaque année. Cependant, les enquêtes ont révélé que malgré les productions importantes en légumineuses, cultures maraîchères et en fruits de saison, la population de la Région Amoron'i Mania reste parmi celles avec un taux de malnutrition plus important par rapport aux autres Régions de Madagascar, avec 64% de la population (ORN AMM, 2020). Parmi les raisons principales à cette situation contradictoire, la vente non équitable des produits, 84% des produits sont

commercialisés localement, avec une vente à perte car le prix est largement moins élevé que le coût de production. Un ménage cultivant des laitues peut ne pas consommer de laitue pendant l'année, un ménage qui pratique l'élevage aviaire peut ne pas consommer aucune viande de volailles pendant toute l'année sauf en cas de force majeure (maladie, accouchement). Ils préfèrent vendre à un prix dérisoire pour pouvoir acheter du pétrole pour avoir de la lumière, pour du café (95% des ménages enquêtés en consomment quotidiennement) ou des produits de première nécessité; et pour d'autres besoins spécifiques pour chaque ménage.

**Tableau 2: Substitution du riz dans la Région Amoron'i Mania par rapport au moyenne de Madagascar**

Territoire	Maïs	Manioc	Patatedouce	Autres (tarot, légumes, tubercules, etc)
Amoron'i Mania	<b>57,6%</b>	<b>87,5%</b>	<b>66,5%</b>	<b>29%</b>
Madagascar	<b>42,3%</b>	<b>87,6%</b>	<b>45,6%</b>	<b>21,3%</b>

Source: INSTAT, 2020

## 5. Discussions

Paradoxalement, les ressources en eau disponibles annuellement sont suffisantes malgré les perturbations de la précipitation et de la température ; ce qui nous amène à faire des analyses par rapport à la situation réelle et à réorienter nos stratégies. En effet, la gestion de l'eau est non maîtrisée car des problèmes d'irrigation se font ressentir de plus en plus au niveau des rizières et des zones cultivées. L'eau de pluie n'est pas valorisée convenablement par l'agriculture. La valeur du débit de retour pour l'utilisation par la population (quantité non consommée après utilisation) étant nulle, seule l'utilisation à des fins agricoles présente une quantité très importante d'eau non utilisée (débit sortant d'environ 155 millions de m<sup>3</sup>). Cela s'explique par le fait que les agriculteurs utilisent systématiquement le calendrier cultural classique, malgré les variabilités climatiques. Si bien que l'eau de pluie n'est même pas utilisée en totalité comme il faudrait, par contre elle n'est pas disponible lorsque le besoin est le plus important. Les agriculteurs, voire la population pensent que «disponibilité en eau» signifie «tombée de pluie». Ce qui devrait être rectifiée, car nous devrions valoriser l'eau disponible, par l'amélioration de la gestion et la maîtrise de l'eau, ainsi que par une révision de notre système d'irrigation. Cette situation, étant généralisée, doit tirer la sonnette d'alarme pour les politiques intersectorielles dans le développement de l'agriculture ; sachant que cela constitue une condition sine qua non pour l'essor économique et de l'autosuffisance alimentaire de la Région, voire du Pays.

Les départs maximum de feu se situent essentiellement entre le mois d'Août et Octobre, périodes correspondantes à la préparation des terres pour la culture et pour le renouvellement du pâturage (Randriamifidison, 2018). La zone ouest de la Région qui est la plus soumise au feu correspond aussi à la zone la moins arrosée de la Région et la plus chaude ; ce qui entrave l'irrigation et la productivité agricole, la culture y est moins diversifiée de ce fait. Cependant la monoculture s'oppose à la pérennisation de la fertilité du sol et entraîne des maladies des cultures.

## 6. Conclusion et Suggestions

Au final, notre étude montre que l'insécurité alimentaire dans la Région Amoron'i Mania résulte de plusieurs paramètres : la non maîtrise des variabilités climatiques, le renforcement

des activités destructrices de la couverture végétale, la non maîtrise de l'irrigation ainsi qu'un manque de connaissance sur la diversification des produits, la transformation aggravée par un fort attachement aux pratiques ancestrales et un partage inéquitable des ressources.

Ce résultat implique la mise en pratique de l'utilisation des canaux de rétention au niveau des parcelles, l'arrosage des cultures par système de goutte à goutte; l'adaptation des calendriers culturaux en fonction de la variabilité, voire le recours à l'utilisation de la nappe phréatique dans l'agriculture (système de pompage). Il faudrait aussi encourager les systèmes de rotations de cultures pour entretenir le sol et éviter qu'il soit compacté au labour et retenir l'eau souterraine, en utilisant des légumineuses telles que le Soja ou de l'arachide, cela permet d'ailleurs de fixer l'azote dans le sol par la présence de l'association symbiotique au niveau de leurs racines. La promotion de l'agriculture urbaine et l'agriculture verticale constitue une priorité pour maximiser l'autosuffisance alimentaire avec un espace limité. Ce résultat ne sera pas atteint sans une conscientisation massive de la population de la Région sur les enjeux du changement climatique, les effets, et les mesures de luttés à l'instar de la pratique de l'agroécologie qui réduit l'effet de la forte température, l'ensoleillement, le vent. La restauration forestière passive et active est aussi fortement recommandée pour maintenir les couvertures forestières qui serviront à éviter l'assèchement et favoriser l'infiltration de l'eau dans le sol. Le développement de la pratique de la riziculture pluviale combinée à la sylviculture doit aussi être encouragé sachant aussi d'ailleurs que les rizières irriguées émettent une grande quantité de gaz à effet de serre (méthane) qui contribue encore à perturber le climat (FAO, 2020). Pour accompagner ces stratégies, il est impératif de sensibiliser et rendre accessibles les informations météorologiques pour chaque site pour permettre aux paysans de prévoir, d'anticiper les variabilités. Par ailleurs, aucune station météorologique n'est en fonction sur plusieurs sites à Madagascar, ce qui conduit à utiliser des données extérieures moins fiables et assez théoriques.

## **Bibliographie**

DRAEP Amoron'i Mania. 2018; Unité Regionale de la Statique Agricole, *Monographie Régionale Amoron'i Mania*

Goossens F. 1997 Rôle de la Sada dans la sécurité alimentaire de Kinshasa. Aliments dans les villes. *Programme Alimentaire mondiale. FAO*

Gordon C.. 1994. Une agriculture durable pour la sécurité alimentaire mondiale. *Montpellier : CIRAD-GERDAT*, 38 p. ISBN 2-87614-183-3

Randriamifidison R.F.A., Tsiavahananahary T.J., Rakotoarisoa D., Andriamampihantona F., 2019; La Région Amoron'i Mania Madagascar Face Au Changement Climatique: Réalités, Adaptation, Projections Et Orientations Stratégiques Pour Un Développement Durable. *22 ème Colloque de l'AIC Grèce*

Randriamifidison R.F.A., Tsiavahananahary T.J. Rakotoarisoa D. Razanajatovo D. 2019, Analyse cartographique du feu dans la Région Amoron'i Mania : enjeux écologiques et socio-économiques, Acte de Colloque de Géosciences, *Académie des Sciences, Madagascar 2019*

FAO, 2020. Sécurité alimentaire et changement climatique. Disponible sur <http://www.fao.org>

# CONTRIBUTION A L'ETUDE DES AMBIANCES THERMIQUES NOCTURNES EN SAISON CHAUDE DANS LA TUNISIE DU NORD

Riahi Mustapha

Université de Jendouba,  
Laboratoire Géomatique des Géosystèmes  
[riahimostapha@gmail.com](mailto:riahimostapha@gmail.com)

**Résumé :** En été, diverses activités qu'elles soient économiques ou de plaisances s'activent particulièrement. Leur déroulement tient souvent à l'adoucissement des températures nocturnes ce qui procure à l'organisme humain un certain répit réparateur. Cependant l'advection de l'air chaud peut altérer ce répit nocturne et expose, sans cesse, l'organisme à un stress insupportable en saison chaude. Ces ambiances nocturnes, certes, sont occasionnées essentiellement par la température mesurée, néanmoins, la prise en considération des autres paramètres d'ambiance tels que l'humidité de l'air et la vitesse du vent permet d'affiner la perception de la chaleur nocturne. L'étude des ambiances thermiques nocturnes sera appréhendée à partir de données tri-horaires couvrant la période 1997-2014 et d'indices bioclimatiques. Ces données concernent des stations météorologiques représentatives de topoclimats de la Tunisie du nord.

**Mots clés :** ambiances nocturnes, saison chaude, Tunisie du nord.

**Abstract:** Contribution to the study of nocturnal thermal atmospheres in the hot season in northern Tunisia. In summer, various activities, whether economic or recreational, are particularly active. Their development is often due to the cooling of night temperatures, which provides the human body with a certain restorative respite. However, the advance of hot air can alter this nocturnal respite and constantly exposes the body to unbearable stress in the hot season. These nocturnal atmospheres, of course, are caused mainly by the measured temperature, however, taking into account other ambient parameters such as air humidity and wind speed makes it possible to refine the perception of nighttime heat. . The study of nocturnal thermal atmospheres will be based on three-hourly data covering the period 1997-2014 and bioclimatic indices. These data relate to meteorological stations representative of topoclimate in northern Tunisia.

**Keywords:** nocturnal atmospheres, hot season, northern Tunisia.

## Introduction

En été, diverses activités qu'elles soient économiques ou de plaisances s'activent particulièrement la nuit. Leur déroulement tient souvent au rafraîchissement des températures nocturnes et explique leur persistance jusqu'à tard. L'importance de ce confort nocturne tient au fait qu'il succède à une chaleur diurne souvent pesante pour le confort de la population. C'est, particulièrement, en ce moment que les mécanismes défensifs de l'organisme se trouvent le moins sollicités ce qui procure à l'organisme une sensation de repos très souhaitée. Cela explique également, en partie, le charme et l'attrait de cette saison.

L'ensemble de ces motifs nous ont incités à examiner les ambiances thermiques en saison chaude pendant la nuit surtout qu'en Tunisie, certains aspects du confort thermique nocturne n'ont pas été suffisamment décortiqués et méritent, donc, plus d'attention.

Dans son étude sur le répit thermique nocturne en Tunisie en 2007 l'accent a été mis par Alouane T sur l'ampleur de l'écart entre l'IAT diurne et l'IAT nocturne de la même journée. Plus récemment, Ben Boubaker H en 2018 a abordé dans son étude sur les nuits tropicales les risques thermiques majeurs en Tunisie en s'appuyant sur l'indicateur des températures minimales quotidiennes comme révélateur de degrés de confort/inconfort.

Dans le présent travail, l'étude du confort thermique est basée sur la notion des ambiances nocturnes. Certes, elles sont occasionnées essentiellement par la température mesurée, néanmoins, elles ont l'avantage d'intégrer d'autres paramètres d'ambiance tels que l'humidité de l'air et la vitesse du vent ce qui va nous permettre d'affiner la perception de la chaleur nocturne. Cela va nous permettre d'atteindre notre objectif qui consiste en l'étude de la

fréquence des ambiances thermiques nocturnes et d'envisager l'ampleur de leur variation intra-nocturne.

## 1. Données et méthodes

### 1.1 Données

L'étude des ambiances thermiques nocturnes sera appréhendée à partir de données tri-horaires couvrant la période 1997-2014. Ces données concernent la température de l'air (°C), l'humidité relative de l'air (%) et la vitesse du vent (m/s). Les relevés nocturnes retenus sont ceux de 21h, 00h et 03h concernant deux stations météorologiques à savoir Tunis-Carthage située sur la côte orientale et Tabarka située sur la côte septentrionale à l'extrême nord-ouest de la Tunisie.

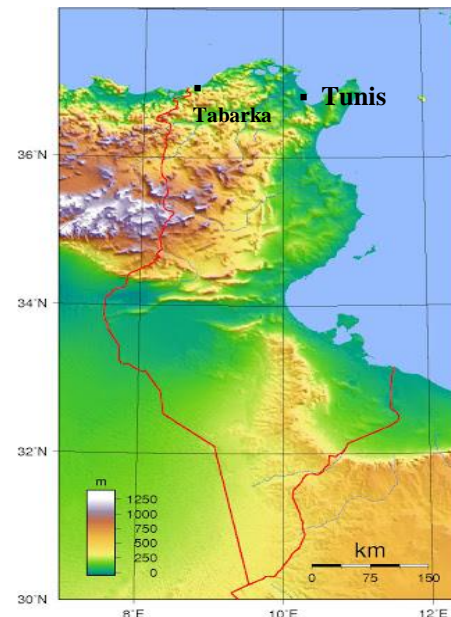


Figure 1. Carte de localisation

### Méthode

La caractérisation des ambiances thermiques nocturnes a été faite à partir de l'indice des ambiances thermiques I.A.T proposé par Henia et Alouane (1999). Il résulte de la combinaison des résultats des deux indices de bioclimatologie humaine couramment utilisés par les chercheurs. Il s'agit de :

- l'indice de confort thermique THI (Temperature Humidity Index) de THOM qui combine la température de l'air en °C avec l'humidité relative de l'air en%.
- l'indice K de Sipple et Passel ou le Cooling power qui associe la température de l'air en °C et la vitesse du vent en m/s.

L'IAT nocturne est la somme de la combinaison des deux indices de THI et de K aux heures précédemment indiquées de la nuit.

Tableau 1. Classes d'ambiances thermiques déterminées selon les indices THI, K et IAT

THI	2	3	2	1	0
Classes	Frais	Confortable	Chaud	Très chaud	Torride
Limites	13 à 14,9°C	15 à 19,9°C	20 à 26,4°C	26,5 à 29°C	> à 29°C
K	2	3	2	1	0
Classes	Tonique	Relaxant	Hypotonique	Atonique	Endothermique
Limites	899 - 600	599 - 250	249 - 150	149 - 0	< à 0
IAT= code THI+K	4	6	4	2	0
Classes	Confortable	Très confortable	Confortable	Inconfortable	Très Inconfortable
Limites	899 - 600	599 - 250	249 - 150	149 - 0	< à 0

Source : Henia L. et Alouane T., 2007

L'IAT journalier est donc la moyenne des trois relevés de l'IAT tri-horaire.

Tableau 2. Classes de l'IATJ.

Classes ATJ	Très confortable	confortable	Modéré	Inconfortable	Très Inconfortable
Valeurs de l'IATJ	< à 1,2	1,2 – 2,3	2,4 – 3,6	3,7 – 4,8	> à 4,8

Nous avons examiné, ensuite, l'ampleur des variations des ambiances thermiques au niveau de chaque nuit et ce à partir des valeurs l'IAT tri-horaire. Pour cela nous avons subdivisé la nuit en deux moitiés ; la première allant de 21h à 00h et la seconde de 00h à 03h. Pour chaque moitié nous avons dégagé les types de variations suivants :

- stabilité : persistance de la même ambiance thermique
- faible variation : entre deux classes consécutives
- moyenne variation : entre deux classes séparées par une seule classe
- forte variation : lorsque la variation se fait entre deux classes et plus

Les trois dernières variations peuvent s'effectuer soit dans le sens d'amélioration ou inversement dans le sens de dégradation.

## 2. Résultats

### 2.1 Répartition des ambiances thermiques nocturnes en saison chaude

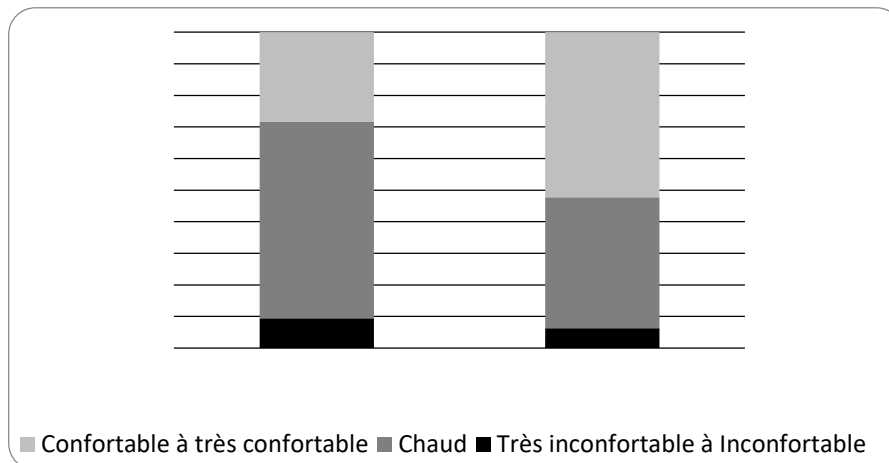


Figure 2. Fréquence moyenne des ambiances thermiques nocturnes en saison chaude(1997-2014)

En saison chaude, la répartition des ambiances nocturnes, dans les deux stations, présente des divergences dans leurs fréquences. A Tunis, l'ambiance chaude est prédominante avec un score caractérisant près de 2/3 des nuits. Cette ambiance, malgré son caractère plus ou moins supportable le jour, sa présence au cours de la nuit correspond au manque de fraîcheur et empêche au corps de se régénérer complètement. A Tabarka, bien qu'importante, sa fréquence baisse sensiblement jusqu'à 41,5% des nuits. Les ambiances inconfortables à très inconfortables sont plus fréquentes à Tunis avec près de 10% des nuits contre 6,2% à Tabarka. Cela permet de confirmer que les ambiances nocturnes sont nettement plus stressantes à Tunis comparativement à Tabarka. Enfin, les ambiances confortables à très confortables se montrent majoritaires à Tabarka avec plus de la moitié des nuits de la saison chaude. Elles représentent presque le double des ambiances enregistrées à Tunis.

### 2.2 Variabilité mensuelle de la fréquence des ambiances nocturnes



Dans la ville de Tunis, les nuits de juillet et août sont quasiment chaudes à inconfortables voire très inconfortables. Elles totalisent respectivement pour les deux mois 88% et 95,2%. Cette chaleur nocturne trouve son origine dans la conjugaison de plusieurs facteurs dont notamment l'îlot de chaleur urbain inhérent à des facteurs radiatifs, la forte humidité nocturne qui contrebalance la baisse relative de la température, mais aussi l'advection d'air tropical chaud dans un contexte de circulation méridienne (Benzarti et Al.2004). Ce flux tropical chaud provenant du Sahara prend le nom de siroccos'il emprunte une trajectoire continentale, du sud à sud-ouest (Henia, 1980). Il est nommé *Chlouks*'il emprunte une trajectoire maritime, en abordant la Tunisie par le sud-est (Ben Boubaker, 2008). De ce fait, Tunis, vu sa position sur la côte orientale, est plus exposée qu'à Tabarka qui échappe relativement, grâce à sa position en latitude, notamment, des influences du *Chlouk*. Cela explique, d'abord, la chute des ambiances inconfortables à très inconfortables à Tabarka jusqu'à environ la moitié des fréquences enregistrées à Tunis (respectivement 16,2% et 31,3%) et ce pour l'ensemble des deux mois de juillet et août. Les ambiances chaudes sont, certes, dominantes mais elles le sont moins nettement qu'à Tunis. Les pourcentages dépassent pour les deux mois la moitié des nuits mais les possibilités de réémissions demeurent bien présentes grâce à la présence, très souhaitée au cours de cette saison, des ambiances confortables dont les fréquences dépassent le 1/3 des nuits d'août et 41% des nuits de juillet.

Le mois de juin est incontestablement le plus confortable dans les deux stations. Cependant le mois de septembre rappelle plus le mois de juin à Tabarka alors, qu'à Tunis, il est le prolongement du cœur stressant.

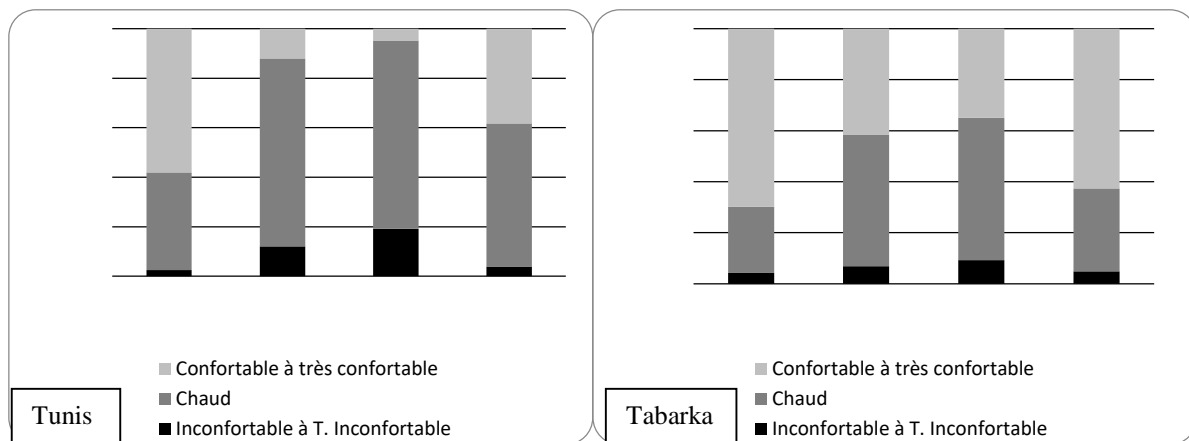


Figure 3. Variabilité mensuelle des ambiances thermiques nocturnes (1997 – 2014)

### 2.3 Persistance et variations des ambiances thermiques nocturnes

Au cours de la nuit, l'ambiance peut se dégrader, s'améliorer ou rester stable. Dans les deux stations, les situations de stabilité sont nettement dominantes et dépassent souvent la barrière de 50%. Elles culminent à Tunis avec un taux près de 70% entre 21h et 00h (Figure 4). L'importance de ces situations s'explique par l'existence, dans chaque station, de deux types d'ambiances dont l'une est dominante. Il est à signaler qu'à Tabarka près de 2/3 des situations de stabilité se fait dans la plage thermique confortable alors qu'à Tunis, ces situations se font plutôt dans la plage thermique chaude avec environ 60% des cas (Figure 5).

Concernant les types de variations, il est à signaler que les situations d'améliorations prennent nettement le dessus, dans les deux stations sur les situations de dégradations. Elles sont

comprises entre 40% et 35% à Tabarka respectivement entre 21h-00h et 00h-03h (Figure 4). Elles diminuent relativement à Tunis pour varier entre le 1/3 (00h – 03h) et 28% (21h – 00h).

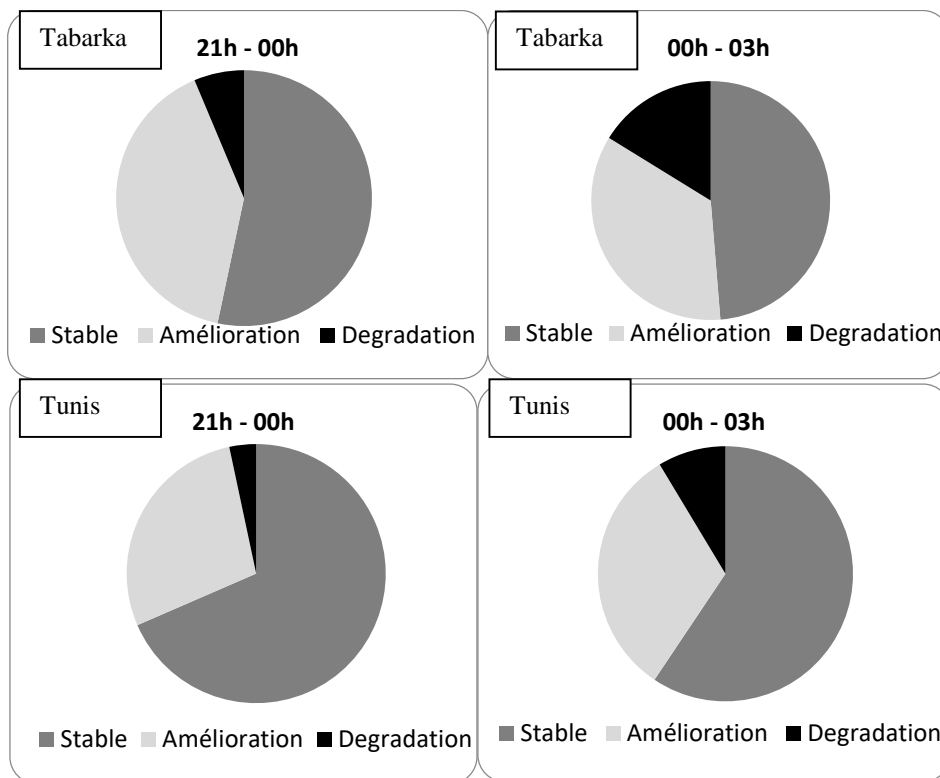


Figure 4. Types de variations des ambiances thermiques nocturnes (1997-2014)

La majorité de ces améliorations sont des variations faibles et s'effectuent de la plage thermique chaude à la plage confortable. Elles représentent près de 70% à Tabarka et environ 90% à Tunis du total des améliorations (Figure 6). Il est à signaler que les améliorations moyennes à importantes (Très chaud au confortable voire très confortable) caractérisent surtout la station de Tabarka avec 31% des cas contre 11% seulement à Tunis. Ce sont, particulièrement, ces types de variations qui procurent à l'organisme les meilleurs moments de répit ce qui permet à la population de récupérer, notamment, de la contrainte thermique du jour.

Enfin, les dégradations, (tout types confondus) s'observent surtout à Tabarka durant la deuxième moitié de la nuit avec 16% des cas et chutent à Tunis jusqu'à 3% entre 21h et 00h.

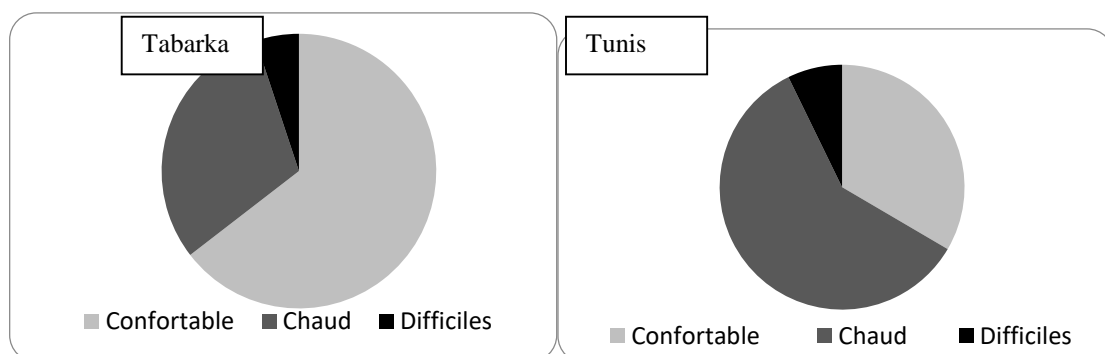


Figure 5. Stabilité des ambiances selon les classes de confort(1997-2014)

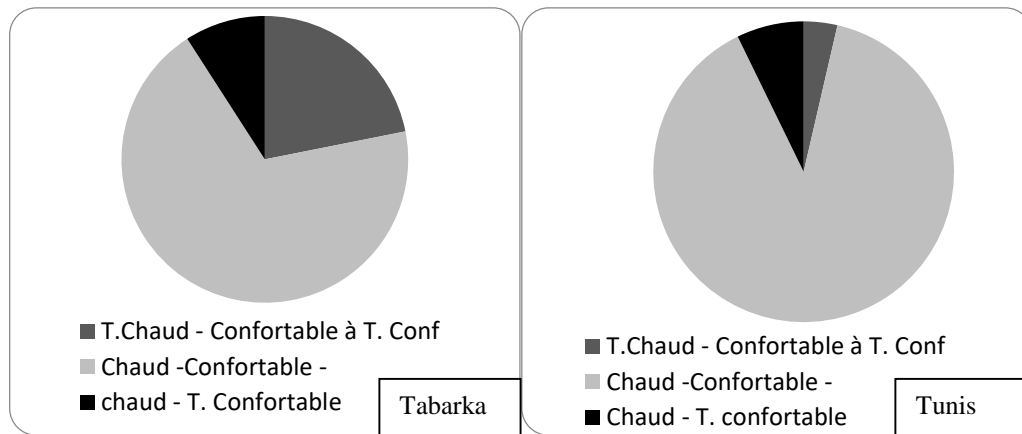


Figure 6. Améliorations des ambiances selon les classes de confort (1997 – 2014)

## Conclusion

L'étude des ambiances thermiques nocturnes a été menée à partir de l'indice IAT qui a l'avantage d'intégrer les trois paramètres d'ambiance à savoir la température de l'air en °C, l'humidité relative de l'air (%) et la vitesse du vent en m/s. Il ressort de cette étude que les nuits, dans l'agglomération de Tunis, sont souvent stressantes et parfois très insupportables. Même l'ambiance chaude, qualifiée de modérée, son hégémonie nocturne est fâcheuse et les possibilités de répit sont alors rares. L'inconfort est donc généralisé sur la majeure partie des nuits de cette saison et le recours à la climatisation est le seul « refuge » pour la population ce qui influence le coût de la facture énergétique. A Tabarka la situation est, sensiblement, différente puisque, même au plus fort de la saison chaude, les fréquences des ambiances confortables ne sont pas négligeables et favorisent davantage les possibilités de réémissions pour la population. Elle semble, donc, propice pour développer plusieurs activités dont notamment le tourisme alternatif surtout que la ville bénéficie du dynamisme du tourisme balnéaire déjà en place.

## Bibliographie

- Henia L., et Alouane T., 1999 : Les ambiances thermiques à l'île de Djerba (Tunisie). *Publications de l'AIC*, vol.12, pp. 17- 25.
- Alouane T., 2007: Le répit thermique nocturne de la saison chaude en Tunisie. Publication de l'AIC, Carthage, pp. 75-80.
- Ben Boubaker H., Chehaieb S., et Aguerbi-Jaouadi H., 2018 : Les nuits tropicales, révélatrices d'un risque thermique majeur en Tunisie : approche méthodologique. *Publication de l'AIC*, Nice, pp. 68-73.
- Ben Boubaker H., 2008: Le flux de Sud-Est maritimisé (*Chlouk*) et ses ambiances bioclimatiques en Tunisie. *Bioclimatologie et topoclimatologie*. Publication F.L.A.H. Manouba. p. 151-172.
- Benzarti Z., Ben Boubaker H. et Henia L., 2004: Circulation atmosphérique méridienne et extrêmes pluviométriques en Tunisie. In " *Climat, Mémoire de temps* ", *Publications de l'AIC*, Caen, pp. 117-121
- Hammami K., 2018 : variation inter-journalière du confort thermique au cours de la saison chaude et la saison froide dans le centre tunisien. *Publication de l'AIC*, Nice, pp. 325-330.

# ATTRIBUTION D'ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES : DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE ET PARTICIPATION À UN PROTOTYPE DE SERVICE D'ATTRIBUTION

Yoann Robin\*, Agathe Drouin\*, Lola Corre\*, Aurélien Ribes\*\*, Pascal Simon\*

\* Météo-France, Direction de la Climatologie et des services climatiques, 42 av Coriolis 31057 Toulouse

\*\*Centre National de Recherches Météorologiques, Université de Toulouse, Météo France, CNRS 42 avenue Coriolis 31057 Toulouse

**Résumé** : Dans l'objectif d'estimer l'influence du changement climatique d'origine anthropique sur l'occurrence et les caractéristiques des événements climatiques extrêmes, le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM, Robin, Y. et Ribes, A.) a développé une nouvelle méthode statistique d'attribution. Cette méthode utilise les modèles climatiques (ensembles CMIP5 ou CMIP6) et des observations pour estimer la probabilité d'occurrence de ces événements dans un monde factuel (tous les forçages, i.e., notre monde) et contrefactuel (uniquement les forçages naturels, i.e., un monde sans forçage anthropique). La comparaison de ces deux mondes permet de quantifier un changement de fréquence attribuable aux activités humaines. Un calcul similaire est fait pour évaluer les changements d'intensité des événements. Cette méthode permet de traiter le cas d'une loi normale (pour la température moyenne) ou d'une loi GEV (loi d'extremum généralisée), ce qui permet de considérer les maxima (ou les minima) d'une variable. L'intégration de données de modèles et d'observations se base sur une analyse bayésienne, qui considère les modèles climatiques comme une connaissance a priori de la réalité, puis estime une distribution posterior sachant les observations. Cette nouvelle approche a été appliquée à plusieurs événements extrêmes (extrêmes de température, extrêmes de précipitations). De plus, le service C3S-62 du projet européen Copernicus Climate Change Services propose, en collaboration avec le KNMI, l'université d'Oxford, le Met Office, le Deutscher Wetterdienst, et le Netherlands Science Center, un prototype de service rapide d'attribution d'événements extrêmes qui utilise plusieurs méthodes, dont celle développée au CNRM, ainsi que la méthode développée au KNMI. Dans le cadre de ce service, plusieurs exercices d'attribution ont été menés en 2020, certains exercices ont été réalisés sur des événements passés (e.g., canicule européenne 2018) d'autres sur des événements en temps réel (e.g., canicule de Sibérie de juillet 2020).

**Mots-clés** : attribution au changement climatique; événements extrêmes; changement climatique; services climatiques

**Summary** : Attribution of extreme events: development of a method and participation in an attribution service prototype. In order to estimate the influence of anthropogenic climate change on the occurrence and characteristics of extreme climate events, the "Centre National de Recherche Météorologique" (CNRM, Robin, Y. and Ribes, A.) has developed a new statistical attribution method. This method uses climate models (CMIP5 or CMIP6 ensembles) and observations to estimate the probability of occurrence of these events in a factual world (all forcings, i.e. our world) and a counterfactual world (only natural forcings, i.e. a world without anthropogenic forcing). The comparison of these two worlds allows us to quantify a change in frequency attributable to human activities. A similar calculation is made to evaluate changes in event intensity. This method allows to treat the case of a normal law (for the mean temperature) or a GEV (Generalized Extremum Value law), which allows to consider the maxima (or minima) of a variable. The integration of model data and observations is based on a Bayesian analysis, which considers the climate models as a priori of reality, and then estimates a posterior distribution knowing the observations. This new approach has been applied to several extreme events (temperature extremes, precipitation extremes). In addition, the C3S-62 service of the European Copernicus Climate Change Services project proposes, in collaboration with the KNMI, the University of Oxford, the Met Office, the Deutscher Wetterdienst, and the Netherlands Science Center, a prototype of a rapid extreme event attribution service that uses several methods, including the one developed at the CNRM, as well as the method developed at the KNMI. Within the framework of this service, several attribution exercises were conducted in 2020, some exercises were performed on past events (e.g., European heatwave 2018) others on real-time events (e.g. Siberian heatwave of July 2020).

**Key words** : climate change attribution; extreme events; climate change; climate services

## Introduction

En ce début de 21<sup>e</sup> siècle, la France a déjà connu 16 événements de canicule. Ces événements ont un impact sanitaire majeur, mais également des conséquences importantes sur les écosystèmes (production agricole, ressources en eau). L'Europe connaît également de plus en plus d'événements extrêmes.

L'attribution d'événements extrêmes a pour objectif d'estimer l'influence du changement climatique d'origine anthropique sur la probabilité d'occurrence et sur l'intensité de ces événements. Pour cela, il faut calculer la probabilité d'occurrence dans un monde *factuel* (notre

monde) et *contrefactuel* (sans influence humaine). Le ratio de ces deux valeurs définit le *changement de risque* (Probability Ratio, PR) qui mesure l'influence des changements d'origine anthropique. De la même manière, le *changement d'intensité* est défini comme la différence d'intensité de l'évènement entre les mondes factuel et contrefactuel, à probabilité d'occurrence fixée. Pour estimer ces indicateurs, le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) a développé une nouvelle méthode statistique d'attribution d'événements extrêmes basée sur une analyse Bayésienne qui mélange les modèles climatiques et les observations.

Quantifier l'influence du changement climatique sur les événements extrêmes est une question récurrente de la part de médias et du grand public. Toutefois, tous les services météorologiques nationaux ne sont pas en mesure de développer leurs propres méthodes et outils d'attribution des événements extrêmes. C'est pourquoi le CopernicusClimate Change Services a lancé en 2019 un service prototype d'attribution d'événements extrêmes. Météo France y participe en tant que service météorologique national pour la France, mais également en proposant l'utilisation de sa méthode d'attribution d'événements extrêmes.

## 1. Méthode statistique d'attribution de Météo-France

La méthode d'attribution est ici illustrée à travers l'exemple de la canicule de Juillet 2019 en France métropolitaine. Celle-ci est représentée par la variable  $TM_{x3d}$  (maximum annuel de la température moyenne sur 3 jours). Les détails techniques et les justifications des hypothèses sont détaillés dans Robin et Ribes (2020) et Ribes et al. (2020).

Dans le cas d'une canicule, nous pouvons supposer que les maximums annuels suivent une loi dite GEV (*Generalized Extreme Value*) qui admet trois paramètres  $\mu$  (similaire à la moyenne),  $\sigma$  (similaire à l'écart type) et  $\xi$  (la forme). Le but est de trouver les valeurs de  $\mu$ ,  $\sigma$  et  $\xi$  qui correspondent le mieux aux observations. Comme le climat est modifié au cours du temps (que ce soit par des forçages naturels ou anthropiques), les trois paramètres  $\mu$ ,  $\sigma$  et  $\xi$  peuvent aussi changer au cours du temps. Ceci nous amène à l'hypothèse suivante :  $\mu$  et  $\sigma$  dépendent linéairement du réchauffement climatique moyen, tandis que  $\xi$  reste constant. Dans le monde factuel, tous les forçages externes agissent : les naturels (comme les volcans) et ceux d'origine anthropique. Dans un monde contrefactuel, seuls les forçages naturels influencent  $\mu$  et  $\sigma$ , ce qui nous permet de le définir. La réponse aux forçages servira donc de co-variable.

Nous cherchons donc à calculer les paramètres de deux lois GEV ainsi que les forçages qui s'appliquent sur le système climatique. La quantité d'observations disponibles étant très faible devant la dimension du problème, nous allons utiliser les modèles climatiques. Notre approche est la suivante : estimer les lois GEV ainsi que leurs incertitudes (avec une procédure de bootstrap) dans un grand nombre de modèles climatiques, les synthétiser en une loi unique qui traduit la dispersion des modèles physiques, puis contraindre les résultats par les observations disponibles. Cette approche est dite *bayésienne*, dans le sens que nous partons d'un *a priori* de la réalité (les modèles climatiques) pour ensuite utiliser les observations pour contraindre cet *a priori*.

Pour estimer la réponse aux forçages, nous partons de la température moyenne sur l'Europe que nous décomposons comme la somme de la réponse aux forçages naturels, de la réponse aux forçages anthropiques (lisse en temps), et d'un terme aléatoire représentant la variabilité interne. En appliquant cette décomposition à plusieurs modèles (une vingtaine), puis en les synthétisant au sein d'une distribution multi-modèles, on obtient un *a priori* sur le réchauffement passé et futur, dont les observations sont supposées être une réalisation possible. Ensuite, les observations sont utilisées pour réduire l'incertitude et ne garder que les trajectoires

compatibles avec ce qui a été effectivement observé. Cette opération permet de réduire l'incertitude modèle, à la fois dans le monde factuel et dans le monde contrefactuel.

En parallèle, une fois que les variations de températures sont connues pour chacun de nos modèles, nous pouvons estimer les paramètres  $\mu$ ,  $\sigma$  et  $\xi$  pour chacun d'entre eux. Avec une procédure sensiblement similaire, ces paramètres sont synthétisés dans une distribution multi-modèle. Finalement les observations sont utilisées pour réduire l'incertitude sur  $\mu$ ,  $\sigma$  et  $\xi$  : partant de l'a priori, l'analyse Bayésienne permet d'estimer les paramètres des lois GEV qui sont compatibles avec les observations, et d'exclure ceux qui semblent très improbables.

## 2. Application à la canicule française de juillet 2019

La canicule française de juillet 2019 a atteint son maximum sur 3 jours du 23 au 25 juillet 2019, avec des températures atteignant localement jusqu'à 20°C au-dessus de la moyenne estivale de la période 1961-1990, comme montrée sur la Fig. 1. À l'échelle de la France, elle détient le record sur l'intensité avec 27.7°C de température moyenne observée. Les maximales ont atteint 43,4°C. Les nuits étaient tropicales, avec des minimales qui ont atteint 25°C.

Les probabilités d'occurrence d'une telle canicule et les durées de retour associées sont représentées sur la Fig. 2a. Nous pouvons voir que la probabilité augmente à partir des années 90 jusqu'à la fin du 21ème siècle. En monde contrefactuel, les probabilités sont quasi constantes, à l'exception des périodes de volcanisme du 20ème siècle. En 2019, nous trouvons une durée de retour de 70 ans (20 - 400 ans) en monde factuel, et de au moins 300 ans en monde contrefactuel, indiquant un changement de probabilité très net. En 2040, la durée de retour est de de 8 ans (3 - 30 ans). Remarquons que les probabilités en monde factuel et contrefactuel peuvent être nulles, surtout pendant la première moitié du 20ème siècle. En conséquence, nous ne pouvons pas écarter que la canicule de 2019 ait été un événement impossible dans un passé proche, qui est désormais rendu possible par le changement climatique d'origine anthropique.

Analysons le PR sur la Fig. 2b. Remarquons que comme le PR est une division de deux probabilités qui peuvent être nulles. Des précautions doivent être prises avant son calcul. Si la proportion de 0/0 est supérieure à 5% (car nous cherchons à calculer un intervalle de confiance à 95%), alors le PR est indéterminé et son intervalle de confiance couvre toutes les valeurs possibles. Ceci est représenté par une zone barrée. Jusque dans les années 90 le PR est indéterminé, traduisant une probabilité d'occurrence possiblement nulle. Ensuite le PR augmente. En 2019 le risque de cette canicule a été multiplié par au moins 10. En 2040 il a même été multiplié par au moins 20. Le calcul du FAR donne une fraction de risque attribuable au changement climatique d'au moins 93% en 2019, et d'au moins 98% en 2040.

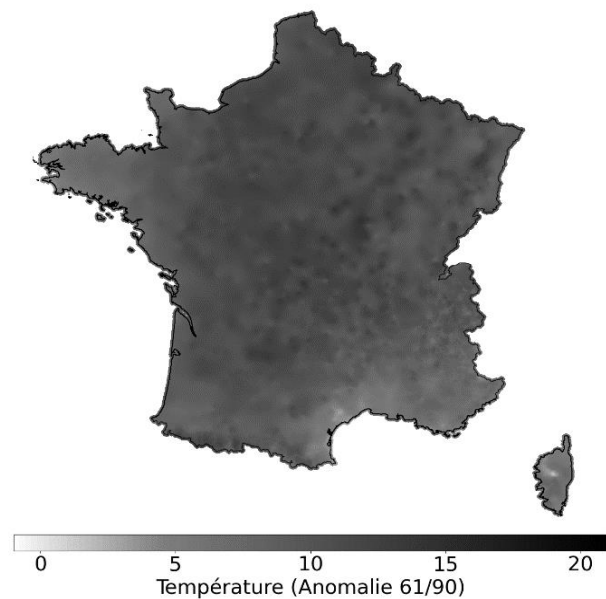


Figure 1. Température moyenne sur 3 jours du 23 au 25 juillet 2019 en anomalie 1961-1990.

Intéressons-nous maintenant aux températures sur la Fig. 2c,d. Nous retrouvons les mêmes résultats que pour les probabilités, à savoir une augmentation franche dans le monde factuel. Les températures sont quasi constantes dans le monde contrefactuel, excepté après des éruptions volcaniques majeures. Nous voyons qu'en 2019 l'augmentation de la température par rapport à l'ère pré-industrielle est de  $1.9^{\circ}\text{C}$  ( $1,2^{\circ}\text{C} - 2,6^{\circ}\text{C}$ ). Ces valeurs sont cohérentes avec l'intensité du changement climatique enregistré en France en été cette dernière décennie, autour de  $+2^{\circ}\text{C}$ . En 2040, nous estimons une augmentation de  $3,3^{\circ}\text{C}$  ( $2^{\circ}\text{C} - 4,4^{\circ}\text{C}$ ).

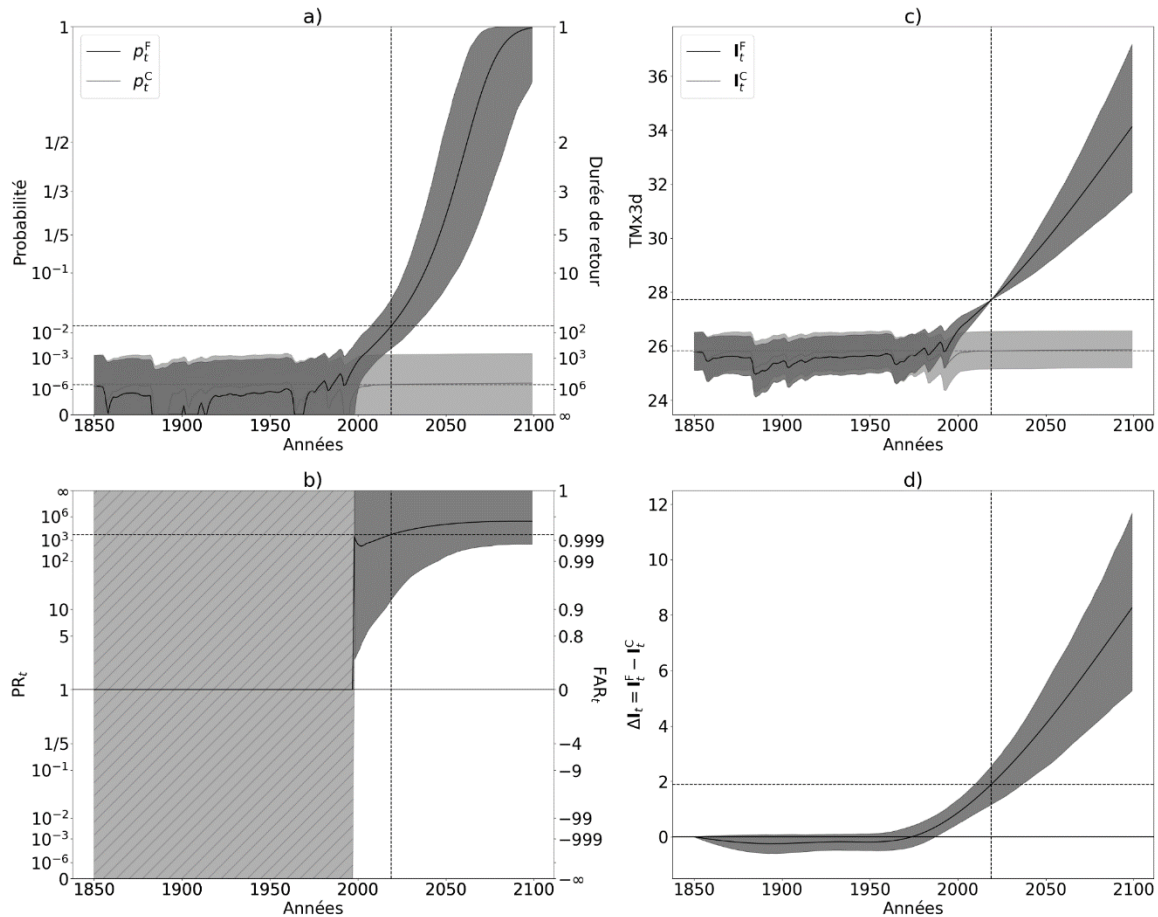


Figure 2. Les zones remplies correspondent à l'intervalle de confiance à 95%. a) Durée de retour en monde factuel (noir) et contrefactuel (gris) de la canicule de juillet 2019 pour la variable  $\text{TMx3d}$ . b) Changement de risque, la zone barrée correspond à un intervalle de confiance infini. c) Intensité en monde factuel (noir) et contrefactuel (gris). d) Changement d'intensité.

### 3. Participation au Service C3S-62

Le CopernicusClimate Change Services a financé sur une durée de 24 mois le développement d'un prototype de service rapide d'attribution d'événements extrêmes. Ses principaux objectifs étaient :

- de développer la capacité à réaliser des études d'attribution d'événements extrêmes pour les services météorologiques nationaux n'étant pas dotés de cette capacité ;
- de mettre à disposition les méthodes, données et outils permettant de réaliser ces études d'attribution ;

- de proposer des modes de communication efficaces sur les événements extrêmes afin de faciliter le travail à mener à chaque événement.

Ce service regroupe différents partenaires ayant des compétences complémentaires : scientifiques spécialistes des méthodes d'attribution, services météorologiques nationaux, services de communication scientifique. Il est coordonné par le KNMI avec la collaboration de l'université d'Oxford, le Met Office, le Deutscher Wetterdienst, Météo France et le NetherlandseScience Center.

Ce service s'appuie sur le protocole d'attribution développé par le KNMI (Philip et al, 2020) et met à disposition via le Climate Data Store<sup>17</sup> ses outils développés initialement au travers du Climate Explorer<sup>18</sup>. Il est aussi possible d'utiliser d'autres méthodes que celle du KNMI dès lors que les méthodes sont publiées et peuvent s'appliquer en suivant le protocole défini. La méthode Robin et Ribes (2020) a donc été mise en œuvre dans ce cadre.

Le protocole d'attribution définit trois principaux rôles dans la réalisation des études d'attribution ainsi qu'un ensemble de tâches à réaliser pour chacun des rôles. Il est utilisé comme une check-list pour la réalisation de l'étude, et permet à chaque participant même avec peu d'expérience de réaliser toutes les étapes d'une étude d'attribution. Les principaux rôles définis sont : une équipe scientifique en charge des tâches d'analyse des observations, d'évaluation de la pertinence de modèles de climat pour le type d'événements considérés, et de production des résultats d'attribution ; une équipe communication en charge de la production des éléments de communication non strictement scientifique ; et les experts locaux qui apportent leurs connaissances des phénomènes locaux, des bases de données observées, et des impacts de l'événement considéré. Ce sont également eux qui peuvent être demandeurs de l'étude.

Durant les 24 mois du projet, l'équipe du C3S-62 a réalisé 2 études d'attribution en temps différé, une sur la canicule de l'été 2018 en Europe, une sur les précipitations intenses ayant provoqué les crues du Danube et de l'Elbe au printemps 2013 ; 2 études d'attribution en condition de temps réel, dont une sur l'épisode de douceur au mois de novembre 2020 en Europe du Nord ; ainsi que l'étude de la canicule de juin 2020 de Sibérie en temps réel<sup>19</sup>. Chacune de ces études a permis au fur et à mesure de l'avancement du projet de tester les différentes ressources élaborées par les partenaires du projet pour aider à la réalisation d'une étude d'attribution : le protocole d'attribution, le protocole de communication, le descriptif des méthodes scientifiques utilisées et le manuel d'utilisation des outils.

Pour chacune des études réalisées, un rapport scientifique et un « web summary » ont été produits. Durant chaque étude, les différentes ressources ont été mises à l'épreuve et amendées; l'objectif étant de disposer de ressources éprouvées permettant de généraliser ce service.

## **Conclusion**

Afin d'attribuer les événements extrêmes récents au changement climatique, nous avons développé une nouvelle méthode d'attribution basée sur l'analyse Bayésienne mélangeant les modèles et les observations. Elle permet de calculer les changements de risques et d'intensité

---

<sup>17</sup> <https://cds.climate.copernicus.eu>

<sup>18</sup> <https://climexp.knmi.nl>

<sup>19</sup> <https://www.worldweatherattribution.org>



au cours du temps, et de voir les évolutions dans le futur en fonction du scénario. Elle a déjà été appliquée à des événements récents en France, comme la canicule de juillet 2019.

De plus, Météo-France participe à l'élaboration d'un service d'attribution en temps réel avec plusieurs partenaires Européens. Plusieurs études ont déjà été produites, dont une sur un événement récent : la canicule de Sibérie de juin 2020.

Nous travaillerons dans le futur à appliquer notre méthode à d'autres variables que la température, ainsi qu'à l'utilisation des modèles CMIP6 à la place des modèles CMIP5 actuellement utilisés.

## **Bibliographie**

Philip, S., Kew, S., van Oldenborgh, G. J., Otto, F., Vautard, R., van der Wiel, K., King, A., Lott, F., Arrighi, J., Singh, R., and van Aalst, M., 2020. A protocol for probabilistic extreme event attribution analyses. *Adv. Stat. Clim. Meteorol. Oceanogr.*, **6**, 177–203, doi:10.5194/ascmo-6-177-2020

Ribes A., Thao S., Cattiaux J., 2020. Describing the Relationship between a Weather Event and Climate Change: A New Statistical Approach. *J. Clim.*, **15**, 33, 6297 - 6314. doi: 10.1175/JCLI-D-19-0217.1

Robin Y., Ribes A., 2020. Nonstationary extreme value analysis for event attribution combining climate models and observations. *Adv. Stat. Clim. Meteorol. Oceanogr.*, **6**, 205–221, doi: 10.5194/ascmo-6-205-2020

## **Remerciements**

Les travaux présentés dans cet article ont été réalisés dans le cadre du contrat copernicus C3S-62<sup>20</sup>, du projet “Convention Services Climatiques”<sup>21</sup> soutenu par le Ministère de la Transition Écologique, et du projet EUPHEME, qui fait partie d'ERA4CS, une initiative ERA-NET de JPI Climate et cofinancée par l'Union Européenne (subvention n°690462).

---

<sup>20</sup> <https://climate.copernicus.eu/c3s62-prototype-extreme-events-and-attribution-service>

<sup>21</sup> <https://convention-services-climatiques.lsce.ipsl.fr/>

# LA RELATION ENTRE LA STABILITÉ ATMOSPHERIQUE (MODELE PGT) ET L'ÎLOT DE CHALEUR A FLORIANOPOLIS (BRESIL)

Rocha G. <sup>1</sup>, Dubreuil V. <sup>2</sup>, MENDONÇA F. <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboclima, UFPR, Curitiba, Brésil, geisarochageo@gmail.com

<sup>2</sup> LETG-COSTEL, UMR 6554 CNRS, Université Rennes 2, France, vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr

<sup>3</sup> Laboclima, UFPR, Curitiba, Brésil, chico@ufpr.br

**Résumé :** Cette étude caractérise l'îlot de chaleur urbain (ICU) dans l'agglomération de Florianópolis-SC sur la base des conditions synoptiques favorables à la stabilité atmosphérique. La relation est établie entre ces conditions et les variables utilisées dans la classification des jours avec des types de temps stables et / ou instables. Pour connaître le degré de stabilité atmosphérique quotidienne, le modèle appelé PGT (Pasquill-Gifford-Turner) a été appliqué, dans lequel la classification est faite à partir des paramètres du rayonnement solaire, du vent moyen et de la nébulosité pour le jour et la nuit. Le suivi a été effectué à partir de 15 points de mesure répartis sur la zone d'étude d'août 2018 à juillet 2019. 22 « jours-type » ont été trouvés selon la classification PGT. Les résultats montrent que les jours avec les classes qui indiquent une plus grande stabilité atmosphérique sont ceux qui présentent l'occurrence de l'ICU avec une plus grande intensité. La corrélation linéaire multiple obtenue entre les paramètres utilisés et la magnitude de l'îlot de chaleur était  $r = 0,65$ , la nébulosité nocturne étant la composante ayant le plus grand poids dans la relation.

**Mots clés :** Îlot de chaleur urbain; Modèle Pasquill-Gifford Turner; Ville côtière; Florianópolis-SC.

**Summary:** THE RELATIONSHIP BETWEEN ATMOSPHERIC STABILITY (PGT MODEL) AND THE HEAT ISLAND AT FLORIANOPOLIS (BRAZIL). This study is dedicated to characterize the urban heat island (UHI) in the conurbated area of Florianópolis-SC based on synoptic conditions favorable to atmospheric stability. The relationship is established between these conditions and the variables used in the classification of days with stable and/or unstable weather types. To know the degree of daily atmospheric stability, the model called PGT (Pasquill-Gifford-Turner) was applied, in which the classification is made from the parameters of solar radiation, average wind and cloudiness in day and night periods. The monitoring was done from 15 measurement points distributed by the study area during 1 year, from August 2018 to July 2019. 22 "days-type" were found according to the PGT classification. The results show that the days with the classes that indicate greater atmospheric stability were the ones with the highest intensity of UHI. The multiple linear correlation found from the parameters used and the magnitude of the heat island was  $r = 0.65$ , with cloudiness at night being the component with the greatest weight in the relationship.

**Key words:** Urban heat island; Pasquill-Gifford Turner model; Seaside town; Florianópolis-SC.

## Introduction

Le phénomène de l'îlot de chaleur urbain (ICU) a été étudié dans plusieurs villes du monde. Depuis la révolution industrielle, au XIXe siècle, ces études sont devenues de plus en plus nombreuses. Au Brésil, l'intérêt pour le thème et la recherche sur la ville et le climat ont commencé à émerger à partir du moment où la population urbaine l'emporte sur la population rurale, c'est-à-dire dans la décennie 1960.

Cependant, au début, la recherche sur les ICU était centrée sur les grandes agglomérations telles que São Paulo (Lombardo, 1985). Au fil du temps, les petites et moyennes villes ont également commencé à être étudiées, y compris les villes côtières, où se trouve la majeure partie de la population du pays (Amorim *et al.*, 2015; Gomes *et al.*, 2017).

Comme beaucoup de villes côtières, Florianópolis (une ville de taille moyenne d'environ un demi-million d'habitants) connaît des situations favorables à la présence d'un îlot de chaleur urbain (ICU) dont la magnitude peut atteindre près de 8°C pendant la saison froide (Rocha *et al.*, 2019 ;2020). Le climat de la région appartient au domaine subtropical de l'hémisphère sud (type Cfa selon la classification de Köppen, avec une distribution régulière des précipitations tout au long de l'année (Dubreuil *et al.*, 2019). Les caractéristiques climatiques avec des étés chauds et des hivers frais résultent des dynamiques saisonnières des masses d'air polaires (mPa) et tropicales de l'Atlantique (mTa) (Mendonça, 2002).

Dans les villes côtières ou même insulaires, comme Florianópolis, les effets de la proximité de la mer doivent être inclus dans l'analyse du comportement de l'ICU et de son intensité. L'attention aux conditions atmosphériques régnant lors du développement de l'ICU doit également être soulignée. Selon Oke (1990) la meilleure observation du phénomène se produit les jours sans nuages et avec des vents légers; cependant, d'autres caractéristiques peuvent être incluses pour une meilleure interprétation.

Par conséquent, l'étude propose de caractériser l'ICU dans l'agglomération de Florianópolis en fonction de la stabilité atmosphérique, telle que définie par la méthode PGT (Pasquill-Gifford-Turner) (Turner, 1970). Il s'agit de comprendre comment les caractéristiques d'une atmosphère instable ou stable sont corrélées aux variations thermiques observées dans le climat urbain local, en identifiant également les variables météorologiques les plus pertinentes dans ce processus.

## 1. Données et méthodes

### 1.1 Base de données

Le suivi des variables météorologiques a été réalisé sur une période d'un an, d'août 2018 à juillet 2019. Il est à noter que, par rapport à la climatologie (normale 1981-2010), la période analysée a été plus sèche, avec 1554,8 mm de précipitations accumulées, contre 1768,6 mm en moyenne. Pour la température, la période analysée était en moyenne de 0,9°C plus élevée que la normale.

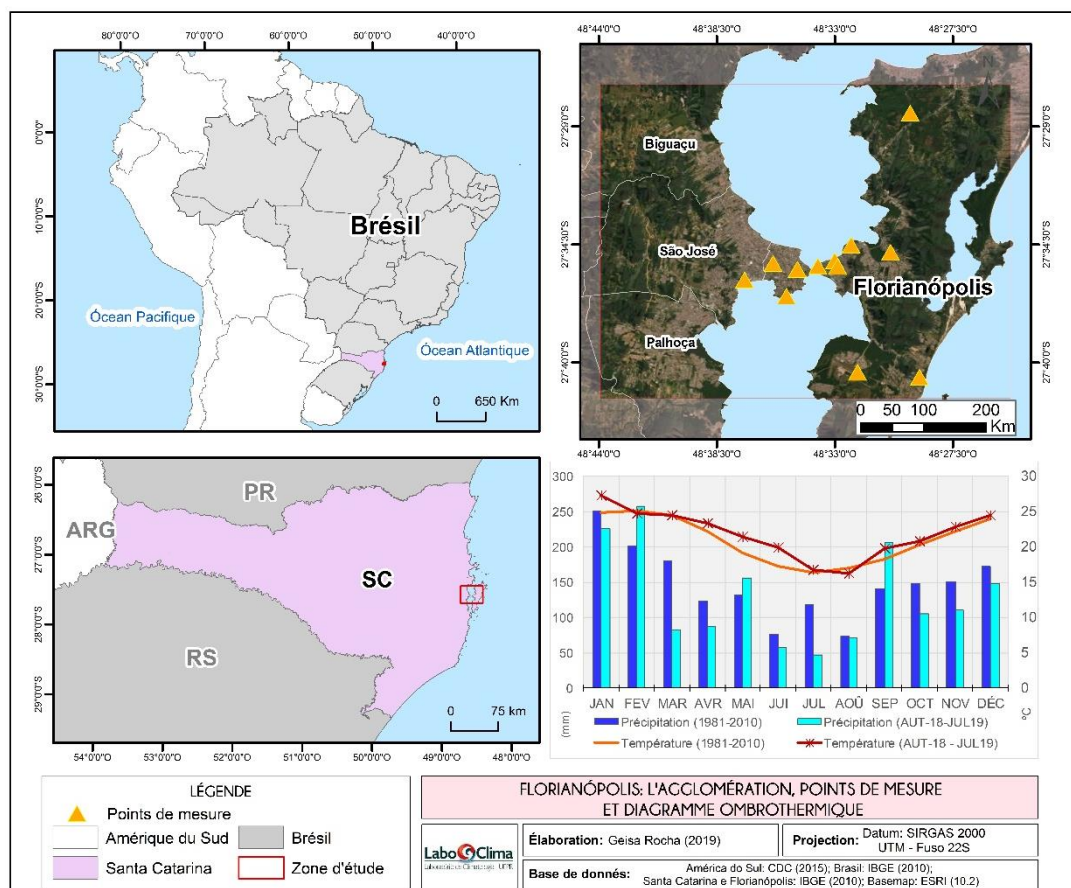


Figure 1. Florianópolis: L'agglomération, points de mesure et diagramme ombrothermique (1981-2010, août-2018 à juillet-2019).

Pendant cette année, 15 points de suivi de l'ICU ont été utilisés. Six stations automatiques Davis Vue et cinq capteurs TinyTag ont été installés, en plus des stations existantes appartenant à des organismes institutionnels. Cinq points de mesure sont situés sur le continent et dix dans

la partie insulaire de l'agglomération (figure 1). La distribution des capteurs et des stations météorologiques a pris en compte les facteurs locaux qui interfèrent avec le climat local, tels que les différentes utilisations des terres et l'occupation des sols (Rochaet al., 2019).

Pour analyser les caractéristiques de l'ICU, deux stations de référence ont été choisies, l'une insérée dans un environnement majoritairement urbain et l'autre en milieu rural. Ainsi, pour calculer l'intensité de l'ICU, les valeurs minimales de température journalière du point de référence de l'environnement rural ont été soustraites aux valeurs de température minimale du point urbain, c'est-à-dire  $\Delta T = \text{Urbain} - \text{Rural}$ . L'échelle d'intensité ICU définie par Fernández García (1996) a été utilisée (tableau 1).

Tableau 1. Classification de l'intensité de l'ICU.

Classe	Intervalle d'intensité (°C)
Faible	0 a 2°C
Moyenne	2 a 4°C
Forte	4 a 6°C
Trèsforte	>6°C

### 1.2 Classification des jours selon les classes de la méthode Pasquill-Gifford-Turner (PGT)

La classification de la stabilité atmosphérique par la méthode PGT a été initialement proposée par Pasquill & Gifford (1961), qui ont établi six classes ; par la suite, la révision de Turner (1970) a ajouté une classe supplémentaire soit sept au total : A-Très instable, B-Modérément instable, C-Légèrement instable, D-Stabilité neutre, E-Modérément stable, F-Extrêmement stable et G-Conditions de nuit extrêmement stables avec faible vitesse du vent.

La méthode formulée par les trois auteurs consiste à séparer les observations entre le jour et la nuit (tableau 2). Ensuite, la combinaison des paramètres climatiques est utilisée pour la classification de la stabilité atmosphérique : pour la journée, la vitesse du vent et l'irradiance solaire sont prises en compte, tandis que pour la nuit, le degré de stabilité prend en compte la nébulosité, en plus de la vitesse du vent.

Tableau 2. Les classes de stabilité atmosphérique de la méthode PGT.

Vitesse du vent (m/s)	Jour				Nuit		
	Irradiance solaire (W/m <sup>2</sup> )				Nébulosité		
	Forte (>600)	Modérée (300 - 600)	Faible (<300)	Couvert	0 - 3	4 - 7	8
<2	A	A-B	B	C	G-F	F	D
2,0 - 3,0	A-B	B	C	C	F	E	D
3,0 - 5,0	B	B-C	C	C	E	D	D
5,0 - 6,0	C	C-D	D	D	D	D	D
> 6,0	C	D	D	D	D	D	D

La combinaison entre les classes observées pendant les deux périodes (le jour et la nuit) est appelée dans cet article « Jour-type » ; par conséquent, le nombre de jours-type est déterminé par les combinaisons de classes possibles qui sont établis tout au long de la période observée : 32 combinaisons jour-nuit sont théoriquement possibles à partir des 8 types pour le jour et 4 pour la nuit.

Pour l'analyse de la relation entre les paramètres utilisés par le modèle PGT et l'ICU, la corrélation de Pearson ( $r$ ) a été utilisée. De plus, des calculs de fréquences ont été effectués pour chaque classe de magnitude d'ICU et pour chaque classe de PGT pour la stabilité atmosphérique.

## 2. Résultats

L'intensité moyenne de l'ICU sur une période d'un an était de 2,4 °C, présentant une valeur plus élevée pendant les mois d'hiver et d'automne. Le mois d'août avait la moyenne la plus élevée de l'ICU, 3,6 °C, intensité maximale des douze mois étudiés. La magnitude moyenne la plus faible a été enregistrée en octobre avec 1,3 °C.

22 jours-type ont été observés (tableau 3), la fréquence la plus élevée étant celle du jour-type de type 10, avec 36 jours de classe de jour C (peu stable) et de classe de nuit F (extrêmement stable), correspondant à 9,9% des jours. L'intensité moyenne de l'ICU de ce jour-type a été 1,9 °C. Les résultats montrent que 34 de ces 36 jours ont présenté un  $\Delta T < 4$  °C (ICU faibles et moyens) et seulement 2 jours avec des  $\Delta T$  considérés comme situation de fort ICU. Le « jour-type » le plus fréquent en termes de stabilité à Florianópolis n'est donc pas favorable à la formation des ICU.

Tableau 3. Classification des jours selon le modèle PGT et les intensités d'ICU.

Jour-type	Jour	Nuit	Quantité de jours	%	$\Delta T$ ICU moyen (°C)	0 - 2°C		4 - 6°C		$\Delta T \geq 4$ °C
						$\Delta T$ Faible	$\Delta T$ Moyenne	$\Delta T$ Forte	$\Delta T$ Très forte	
1	A-B	G-F	2	0,5	1,8	1	1	0	0	0
2	B	G-F	34	9,3	3,5	8	13	9	4	13
3	B-C	G-F	28	7,7	3,3	6	13	9	0	9
4	C	G-F	13	3,6	3,1	4	5	4	0	4
5	C-D	G-F	2	0,5	5,3	0	0	2	0	2
6	D	G-F	2	0,5	2,8	0	2	0	0	0
7	A-B	F	2	0,5	3,4	0	1	1	0	1
8	B	F	27	7,4	2,8	10	11	5	1	6
9	B-C	F	29	7,9	2,8	12	11	3	3	6
10	C	F	36	9,9	1,9	23	11	2	0	2
11	C-D	F	4	1,1	3,0	1	2	0	1	1
12	D	F	8	2,2	3,2	3	2	2	1	3
13	B	E	26	7,1	2,0	15	9	2	0	2
14	B-C	E	29	7,9	2,2	17	9	0	3	3
15	C	E	30	8,2	2,0	14	14	2	0	2
16	C-D	E	15	4,1	2,9	7	4	2	2	4
17	D	E	6	1,6	2,3	2	3	1	0	1
18	B	D	8	2,2	1,0	7	1	0	0	0
19	B-C	D	17	4,7	1,4	13	4	0	0	0
20	C	D	29	7,9	1,1	26	2	1	0	1
21	C-D	D	8	2,2	2,0	5	3	0	0	0
22	D	D	10	2,7	1,3	8	1	1	0	1
TOTAL			365	100	2,5	182	122	46	15	61

En ce qui concerne la moyenne d'intensité de l'ICU la plus élevée, celle-ci a été observée pour le jour-type 5 (5,3 °C), soit la classe C-D pour le jour et G-F pour la nuit : cependant, ce jour-type ne s'est produit que deux fois dans l'année.

Au total, ont été enregistrés 304 jours pour lesquels l'intensité de l'ICU était comprise entre 0 et 4 °C (ICU d'intensité faible et moyenne), soit 83,3% de la période totale. Le reste, 61 jours (16,7%) ont présenté un ICU supérieur à 4 °C, en particulier 46 jours avec un  $\Delta T$  entre 4 et 6 °C et 15 jours au-dessus de 6 °C. Parmi ces journées, les jours-types 2, 3, 8 et 9 sont les plus fréquents et représentent 55% des cas. Il s'agit majoritairement de conditions diurnes et nocturnes avec des vitesses de vents faibles et une couverture nuageuse peu importante. Pendant ces journées de fort ICU, il n'y a que deux occurrences dans la classe de nuit la moins stable (c'est-à-dire la classe D). Ces observations corroborent donc la théorie classique de l'îlot de

chaleur urbain, favorisé par des conditions de stabilité atmosphérique nocturne avec des vents et nébulosité faibles.

La figure 2 montre l'intensité de l'ICU de manière décroissante selon les jours-type (classification jour et nuit) ainsi que les autres paramètres : rayonnement, vent nocturne et couverture nuageuse. Pendant la journée, la relation avec la stabilité n'est pas si évidente, la classe la moins instable (D) apparaît en cinquième position avec la magnitude moyenne la plus élevée de l'ICU (jour-type 12), alors que pour la période nocturne, elle ne se manifeste qu'en 16e position d'intensité d'ICU (jour-type 22).

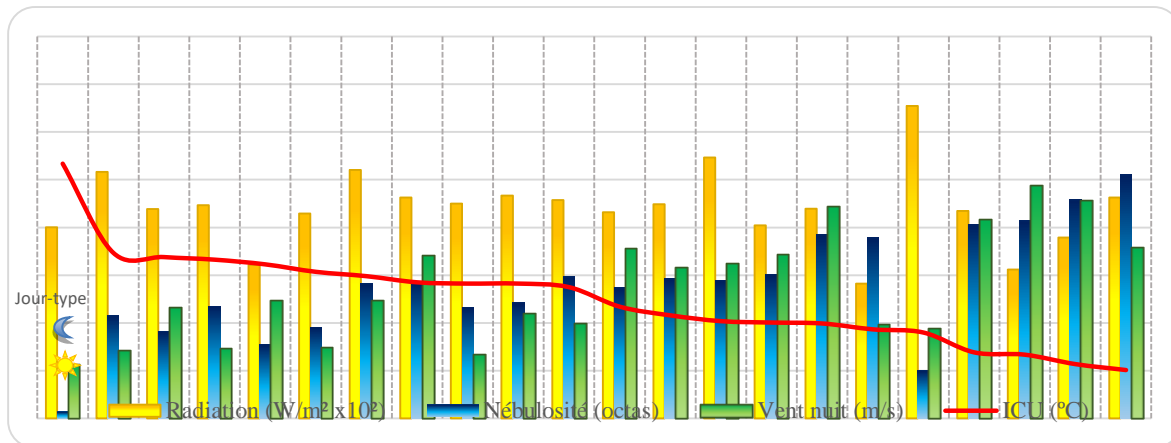


Figure 2. Intensité de l'ICU x paramètres de classification PGT.

Les résultats obtenus à partir de la corrélation statistique (tableau 4) expriment que la vitesse du vent pendant la journée qui précède a une contribution pratiquement nulle à l'intensité de l'ICU ( $r = 0,03$ ) ; l'autre variable considérée, le rayonnement, a également une participation très faible ( $r = 0,24$ ). En revanche, c'est la nuit que les corrélations sont les plus élevées ; pour la nébulosité, cette valeur est de  $-0,60$ , ce qui signifie que plus la couverture nuageuse est élevée, plus la magnitude de l'ICU a tendance à être faible. Pour le vent pendant la nuit, la même relation inverse est observée, mais avec une corrélation nettement plus faible ( $r = -0,25$ ). Le niveau de signification des corrélations est de 95% (en gras dans le tableau 4).

Tableau 4. Résultat de la corrélation entre l'intensité de l'ICU et les variables utilisées dans le modèle PGT.

	Paramètre	Corrélation de Pearson (r)	Coefficient de détermination ( $r^2$ )
Jour	Radiation	+0,24	0,06
	Vitesse du vent	+0,03	0,00
Nuit	Nébulosité	<b>-0,60</b>	<b>0,36</b>
	Vitesse du vent	<b>-0,25</b>	<b>0,07</b>

A partir d'une régression linéaire multiple (FOISSARD et al., 2011), la relation entre l'intensité de l'ICU et les paramètres de jour et nuit utilisés dans le modèle PGT peut être définie par l'équation :

$$ICU = 4,40 + 7,55 * Ra + 1,29 * Vd - 0,5 * Nb - 0,3 * Vn$$

Où: ICU est l'ampleur de l'îlot de chaleur urbain; Ra : Radiation quotidienne; Vd est le vent moyen de la journée; Nb est la nébulosité nocturne; Vn est le vent moyen de la nuit. Les résultats de la régression linéaire multiple ont montré une corrélation multiple ajustée de 0,65 et un coefficient de détermination ajusté de 0,42 ; ainsi, le modèle n'explique que 42% des variations

de l'intensité de l'ICU. Si les conditions stables pendant la nuit sont nécessaires pour la formation de l'ICU, elles ne sont donc pas suffisantes pour expliquer le phénomène dans son ensemble.

## Conclusions et Discussion

L'intensité de l'ICU est reliée aux caractéristiques atmosphériques, les situations dites radiatives (vent et nébulosité faibles) étant a priori les plus favorables. La méthode PGT qui établit des classes de stabilité atmosphérique montre que cela a tendance à se vérifier également à Florianópolis : la corrélation entre l'ICU et les paramètres jour/nuit utilisés pour la classification a montré que les variables de nuit ont plus de poids que les caractéristiques du jour précédent. Si les conditions stables pendant la nuit sont nécessaires pour la formation de l'ICU, elles ne sont cependant pas suffisantes pour expliquer le phénomène dans son ensemble. En outre, les jours standards établis par la classification PGT, n'expliquent pas la variation des températures intra-urbaines et rurales. Il convient donc de rester prudent avant de l'utiliser comme un outil pour prévoir et anticiper l'intensité de l'ICU dans l'agglomération de Florianópolis.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la CAPES (Coordination de l'amélioration du personnel de niveau supérieur) pour la bourse de doctorat, EPAGRI-CIRAM pour les données de la station rurale ainsi que le Projet CAPES-COFECUB, CiCIAMEn, Sh 941/19 (*Cities, Climate And vegetation: Modeling and Environmental public policies*).

## Bibliographie

- Amorim M. C.C. T., Dubreuil V., 2017: Intensity of Urban Heat Islands in Tropical and Temperate Climates. *Climate*, **5**, 91.
- Amorim M.C.C.T., Dubreuil V., Cardoso R., 2015 : Modelagem espacial da ilha de calor urbana em Presidente Prudente (SP), Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*. **16**, 29-45.
- Dubreuil V., Fante K.P., Planchon O., Sant'anna Neto J.L., 2019: Climate change evidence in Brazil from Köppen's climate annual types frequency. *International Journal of Climatology*. **39**, 1446-1456.
- Foissard X., Quenol H., Dubreuil V., 2011: L'influence de la variabilité des facteurs météorologiques sur l'occurrence et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain à rennes en 2010. *Actes du 24e Colloque de l'AIC*, Rovereto, Italie. 261-266.
- García F.F., 1996: *Manual de Climatologia Aplicada: Clima, Medio Ambiente y Planificación*. Editorial Síntesis: Madrid, Spain, **2**, 285.
- Gomes W. P., Amorim, M. C. De C. T., Dubreuil, V., 2017 : Modelagem da Ilha de Calor Urbana Aplicada ao Ambiente Litorâneo - Ubatuba/Brasil. *Revista do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo*, **34**, 82-94.
- Krüger E., Emmanuel R, 2013: Accounting for atmospheric stability conditions in urban heat island studies: The case of Glasgow, UK. *Landscape and Urban Planning*, **117**, 112-121.
- Lombardo M. A., 1985 : *Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo*. São Paulo, **1**, 244.
- Mendonça M., 2002 : *A dinâmica tempo-espacial do clima subtropical na região conurbada de Florianópolis*. Tese (Doutorado em Geografia Física) Programa de Pós Graduação em Geografia Física. Universidade de São Paulo, 384p.
- Oke T., 1990: *Boundary layer climates*. Londres: Routledge, 464p.
- Rocha G. S., Dubreuil V., Mendonça F.A., 2019 : Résultats préliminaires de l'étude de l'îlot de chaleur urbaine Florianópolis (Brésil). *XXXIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, **1**, 353-358.
- Rocha G. S., Dubreuil V., Mendonça F.A., 2020 : Caractéristiques horaire et saisonnière de l'îlot de chaleur urbain de Florianópolis (sud du Brésil). *XXXIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, **1**, 589-594.
- Rocha G. S., Dubreuil V., Mendonça F.A., 2020 : A estabilidade atmosférica e a ilha de calor urbana na área conurbada de Florianópolis-SC. *Revista Brasileira de Climatologia*, **27**, 900-918.
- Turner D. B., 1970. *Workbook of atmospheric dispersion estimates*. Office of Air Program Pub. Environmental Protection Agency, USA, **1**, 92.

# VARIABILITE DES PRECIPITATIONS PRINTANIERES EN RELATION AVEC L'ENSO EN MILIEUX OASIENS MAROCAINS

Sadiki A.<sup>1</sup> & Hanchane M.<sup>2</sup>

(1) Laboratoire Dynamique, espace, patrimoine et développement durable, USMBA Fès.

(sadiki.abderrazzak.geo@gmail.com);

(2) Laboratoire Territoire, Patrimoine et Histoire, USMBA Fès, Maroc (mohamed.hanchane@usmba.ac.ma).

**Résumé :** Cette étude a pour objectif d'étudier les conditions atmosphériques pluvieuses de la saison printanière en milieux oasiens marocains en relation avec la température de la surface océanique du Pacifique en saison hivernale (indice NINO3). En effet, le lien entre la variabilité de l'indice NINO3 et la pluviométrie moyenne printanière standardisée (indice SAI), a permis de constater que lors des phases chaudes de l'ENSO, la pluviométrie printanière des oasis diminue ; elle coïncide avec le prolongement zonal de la dorsale anticyclonique des Açores sur le Maroc qui est favorable à l'établissement d'une phase NAO+. En revanche, les phases froides sont concomitantes avec l'allongement de la dorsale anticyclonique des Açores vers le nord-est de l'Atlantique et on assiste à une baisse de la pluviométrie printanière. On assiste aussi, lors de cette phase humide printanière, à un creusement de la dépression saharienne en comparaison avec la phase sèche de la même saison.

**Mots clés :** Milieux oasiens marocains ; précipitations printanières ; l'ENSO, ONA.

**Summary :** *Variability of spring precipitations in relation to ENSO in morrocan oasis.* The purpose of this work is to study the rainy atmospheric conditions of the spring season in Moroccan oasis in relation to the temperature of the oceanic surface of the Pacific in the winter season (NINO3 index). Indeed, the link between the variability of the NINO3 index and the standardized mean spring rainfall (SAI index), has shown that during the warm phases of the ENSO, the spring rainfall of the oasis decreases; it coincides with the zonal extension of the Azores high pressure ridge over Morocco which is favorable to the establishment of a NAO + phase. On other hand, the cold phases are concomitant with the lengthening of the high pressure ridge of the Azores towards the northeast of the Atlantic and there is a decrease in spring rainfall. During this wet spring phase, we also witness a deepening of the Saharan depression in comparison with the dry phase of the same season.

**Key Words :** Moroccan oasis; spring preipitations; ENSO ; ONA.

## Introduction

Les milieux oasiens sud-atlasiques marocains, occupent une superficie importante du pays, et sont drainés par plusieurs oueds (Guir, Ziz, Rheris, Draa...) à régime temporaire. Il s'agit de milieux caractérisés par la rareté des pluies. Outre les chutes de neige sur les montagnes du Haut Atlas et de l'Anti-Atlas, la disponibilité en eau dépend également des épisodes pluviométriques brefs et d'une forte intensité. Le climat de ces milieux est du à des conditions atmosphériques marquées par la présence de l'anticyclone des Açores et de la dépression saharienne auxquelles s'ajoute l'effet orographique. Cependant, des conditions atmosphériques en couplage avec la température de la surface océanique ont été soulevées pour expliquer certains épisodes pluvieux en ces milieux subdésertiques (Knippertz et al. 2003b). Généralement, l'alternance d'années humides et sèches au Maroc est expliquée par l'Oscillation Nord Atlantique qui connaît deux phases : ONA+ et ONA-. Son influence, assez nette dans le nord-ouest du Maroc, est modifiée par l'effet orographique sur les précipitations au niveau des régions arides et subsahariennes qui sont situées au sud de l'Atlas (Knippertz, 2004). Dans ces régions, le transport d'humidité en provenance de l'océan Atlantique le long du flanc sud de l'Atlas, associé aux dépressions à l'ouest du Maroc et de la péninsule ibérique, peut être identifié comme un facteur décisif des précipitations (Knippertz et al., 2003a). Ainsi, les régions subsahariennes ne montrent aucune dépendance distincte vis-à-vis de la trajectoire des dépressions dans l'Atlantique Nord et de la NAO et les mécanismes de génération de précipitations semblent plus complexes (Knippertz et al., 2003a). Si les recherches climatologiques ont accordées une grande importance à la variabilité des précipitations hivernales en relation avec la NAO (Lamb and Pepler, 1987), peu d'études ont abordé la question de cette variabilité avec la phénomène ENSO (Knippertz et al., 2003b; Rodo et al., 1997; Oldenborgh et al., 2000; Van Loon et Madden, 1981). Ce lien entre la variabilité ENSO en hiver boréal représenté par l'indice NINO3, à savoir les anomalies de température de surface de l'océan Pacifique Est et les conditions météorologiques au printemps en Europe et en Afrique



du Nord-Ouest a été examiné par Knippertz et al (2003b). Ceci nous a amenés à s'intéresser à la vérification de cette relation au niveau des milieux oasiens du Maroc.

## 1. Données utilisées et méthodologie

Les données climatiques utilisées correspondent aux précipitations mensuelles, aux champs de pression et aux températures de la surface océanique TSO du Pacifique. Les précipitations mensuelles de la période 1970-2000, relatives aux 12 stations représentatives des milieux oasiens sud-atlasiques (figure 1). A partir de ces données mensuelles issues des Agences des Bassins Hydrauliques: Guir-Ziz-Rhèris et Souss-Massa-Darâa, on a extrait les cumuls printaniers (MAM : mars-avril-mai). Les données des réanalyses utilisées correspondent :

- aux champs de pression en surface (28°N-80°N; 60°O-30°E) (source : <http://www.esrl.noaa.gov/psd/> ; Kalnay et al., 1996);
- à l'indice NAO (MAM) avec comme pression au sud celle des Açores et de Gibraltar et la pression Nord, celle du sud-ouest de l'Islande (source : [www.esrl.noaa.gov/psd/gcos\\_wgsp/Timeseries/NAO/](http://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/NAO/); Jones et al. 1997);
- à l'indice NINO3 de l'Océan Pacifique Est (<http://climexp.knmi.nl/start.cgi>) et cartes d'anomalies de la TSO (5°N et 5°S; 80°O et 150°E) (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>) (figure 2) pour les mois de décembre-janvier-février qui correspondent à la période pendant laquelle le phénomène ENSO est à son état extrême.

Après extraction des données saisonnières de printemps, on a calculé l'indice d'anomalies standardisées (SAI: Katz et al. 1986) pour l'ensemble des stations :

$$SAI = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(x_{ij} - \bar{x}_i)}{\sigma_i} \right]$$

avec,  $n$ : nombre d'années d'observations;  $x_{ij}$ : le cumul pluviométrique printanier pour la station  $i$  et l'année  $j$ ;  
 $\bar{x}_i$  : moyenne spatiale des précipitations printanières cumulées pour l'année  $i$ ;  $\sigma_i$ : écart-type pour la station  $i$ .

La significativité de la tendance du SAI printanier est évaluée à l'aide du test de Mann-Kendall (Sneyers, 1975). Le résultat de toutes les augmentations et les diminutions est la valeur finale de  $S$ . Une forte valeur non nulle de  $S$  indique l'existence d'une tendance. Cependant, pour trancher vis-à-vis de la significativité de la tendance on calcule la probabilité associée à  $S$  et  $n$  (Taille d'échantillon). Ceci est effectué à l'aide de la statistique  $Z$  qui suit une loi normale de moyenne 0 et d'écart-type 1. L'hypothèse nulle est rejetée si la probabilité est supérieure au seuil  $\alpha\%$  (p-value). Cela signifie que la tendance a moins de  $\alpha\%$  de chance d'être obtenue par un simple hasard. Elle est donc statistiquement significative à "100-  $\alpha\%$ ". Il s'agit ici de tester l'absence de la tendance. La p value ( $\alpha$ ) est comprise entre 0.001 et 0.1.

Le calcul des coefficients de corrélation entre l'indice SAI (MAM) et les indices NINO3 (DJF), NAO-Açores et NAO-Gibraltar (MAM) a été effectué au seuil de significativité  $\alpha=0.05$ . Il permet de montrer à quel point l'ONA et la TSO du Pacifique Est influent sur les précipitations printanières. Des composites, issues des réanalyses, ont été extraites pour montrer le lien entre le SAI printanier et les anomalies de pression de l'Atlantique Nord (ONA) et les anomalies de la TSO du Pacifique Est. Ces anomalies correspondent aux différences de valeurs météorologiques entre une situation observée et la période de référence 1981-2010.

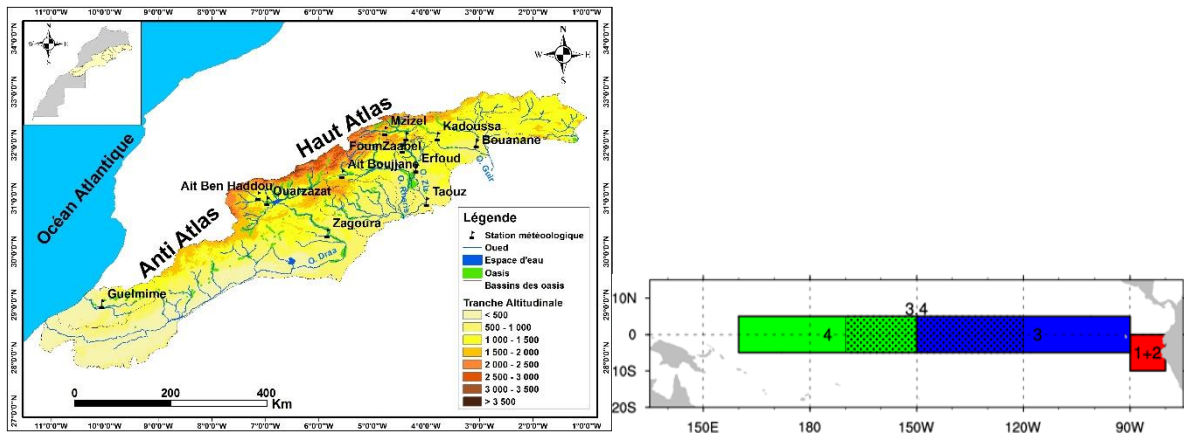


Figure 1 et 2: (à gauche) Position géographique des stations pluviométriques utilisées; à droite: Régions utilisées pour divers index Nino et position de l'indice NINO3 mesurant les anomalies de la température de la surface océanique (5N-5S, 150W-90W) (source: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>).

## 2. Résultats

### 2.1. Descriptions des régimes pluviométriques mensuels probables

Selon les stations ont été choisies pour décrire le régime pluviométrique mensuel probable (fig. 3). En année normale à humide (Q3), le maximum pluviométrique est situé en novembre à Guelmime, en octobre à Ouarzazate et en avril pour Erfoud et Er-achidia. En année très humide, exprimée par le Q3, on enregistre un maximum en octobre pour Ouarzazate et Er-Rachidia et en décembre à Erfoud et Guelmime. En années exceptionnellement humides, des pluies extrêmes, dépassant les 3/4 des pluies annuelles peuvent être enregistrées en hiver (janvier pour Er-Rachidia et Erfoud et février pour Ouarzazate), au printemps, notamment en avril pour Ouarzazate, Er-Rachidia et Erfoud, en automne (octobre à Ouarzazate, Er-Rachidia et Erfoud et novembre pour Guelmime). Il ressort de ces résultats une certaine similitude des régimes pluviométriques des stations continentales subdésertiques qui se distinguent du régime probable de Guelmime à influence océanique (Fig.1). Les précipitations printanières sont surtout importante en avril pour les stations d'Er-Rachidia, d'Erfoud et d'Ouarzazate.

### 2.2 Tendance de l'indice SAI printanier

Selon le test de Mann-Kendall, l'indice SAI relatif aux précipitations printanières montre une tendance significative vers la diminution avec une rupture significative dès l'année 1977 (Fig. 3). Ainsi, la région a connu une persistance de la sécheresse printanière ; les années 1978 et 1998 ont connu les sécheresses les plus aigues. Cette période de sécheresse a été interrompue par des périodes relativement humides (1982, 1988, 1995, 1996), sans pour autant dépasser les épisodes humides des années 1974 et 1975.

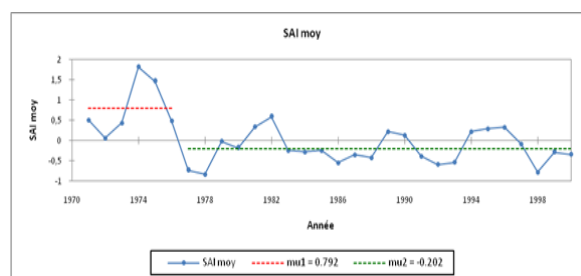


Figure 3: Tendance de l'Indice SAI (MAM) pendant la période 1970-2000.

### 2.3. Corrélation de l'indice SAI printanier avec les indices NAO et l'indice Nino3

La corrélation entre le SAI printannier et les indices de l'ENSO (indice NINO3-DJF), de la NAO-G (MAM) et la NAO-Az (MAM) montre que la pluviométrie printanière est hautement significative au seuil  $\alpha=0.05$  avec l'indice de l'indice NINO3. Cette corrélation de signe négative indique que les périodes sèches printanières sont associées aux phases chaudes ENSO de DJF. Par ailleurs, une amélioration de la valeur de corrélation entre SAI printanier et NAO-G (MAM) est enregistrée, sans qu'elle soit pour autant significative (Tab. 1).

Variables	MoyDJF_NINO3	NAO MAM Az	SAI moy	NAO MAM -G
MoyDJF_NINO3	1	-0.117	<b>-0.409</b>	0.179
NAO MAM Az	-0.117	1	-0.243	<b>0.675</b>
SAI moy	<b>-0.409</b>	-0.243	1	-0.341
NAO MAM -G	0.179	<b>0.675</b>	-0.341	1

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification  $\alpha=0,05$

Tableau 1: Matrice de corrélation des indices NAO-G (MAM), NAO-Z (MAM) et Nino3 (DJF) avec l'indice SAI (MAM) (période de référence 1970-2000).

La corrélation négative et significative au seuil  $\alpha=0.05$  entre l'indice SAI (MAM) et l'indice Nino3 nous permet de déduire que les périodes printanières sèches sont associées aux phases chaudes de l'ENSO et inversement (Fig. 4). L'association "indice SAI (MAM) négatif (période sèche) et NINO3 positif" est à remarquer pour les années 1983, 1987, 1992 et 1998. L'inverse est discernable surtout pour les années 1974, 1975 et 1976.

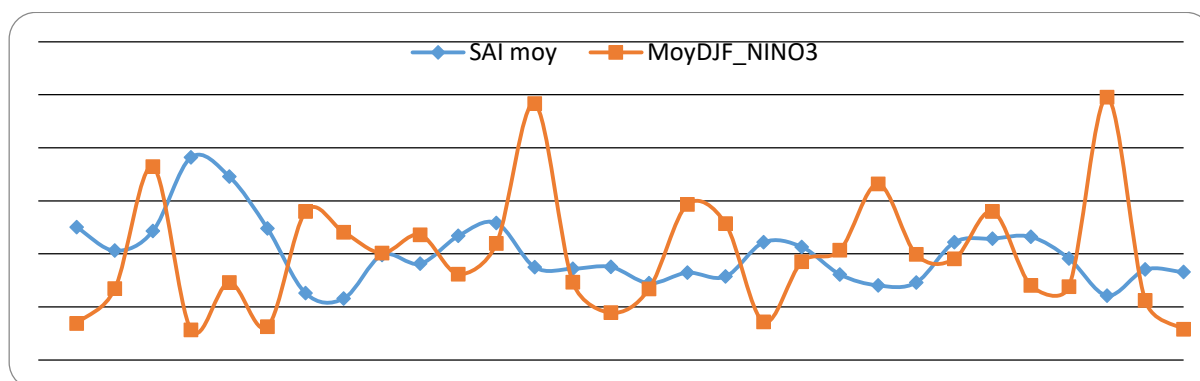


Figure 4: Evolutions de l'indice SAI printanier et l'indice NINO3 (DJF) durant la période 1970-2000.

En identifiant les années traduisant cette association, nous avons représenté les cartes d'anomalies de l'indice NINO3 qui les caractérisent. Les exemples des saisons printanières 1975 et 1998 sont éloquentes à cet égard (Fig. 5&6). En effet, la période humide du printemps 1974 a été marquée par une anomalie positive de la température de la surface océanique à l'est et au centre du Pacifique alors que c'est l'inverse qui s'est produit en phase sèche printanière de l'année 1998 (fig.5). Dans le premier cas (période humide de 1974), on assiste à un prolongement de la dorsale anticyclonique des Açores vers le nord-est et l'enregistrement de basses pressions relatives au sud-est du pays (1013 à 1010 hPa). Dans le second cas (période sèche de 1998), la dorsale anticyclonique est marquée par un prolongement vers l'est du pays avec l'établissement de pressions relativement élevées au sud-est du Maroc (1014 à 1016 hPa) (Fig. 6). La dépression saharienne est plus creuse et prend une position septentrionale en phase humide par rapport à la phase sèche.

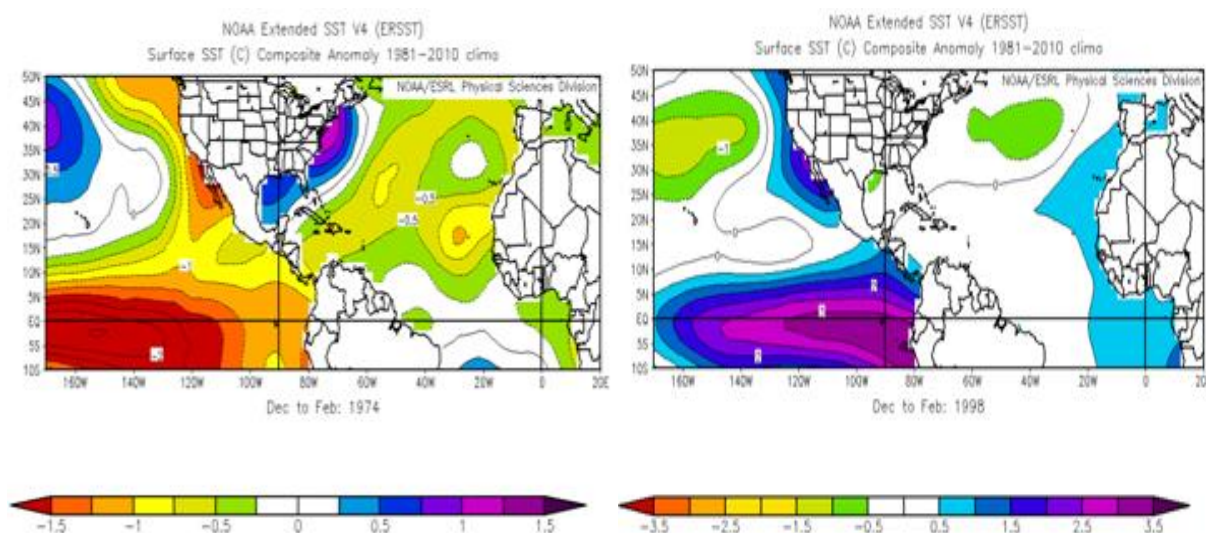


Figure 5: Anomalies de la température de la surface océanique (SST) de DJF sur le Pacifique en deux saisons printanières ayant marqué les milieux subdesertiques marocains; à gauche: saison humide de l'année 1975; à droite: sèche de l'année 1998 (période de référence: 1981-2010).

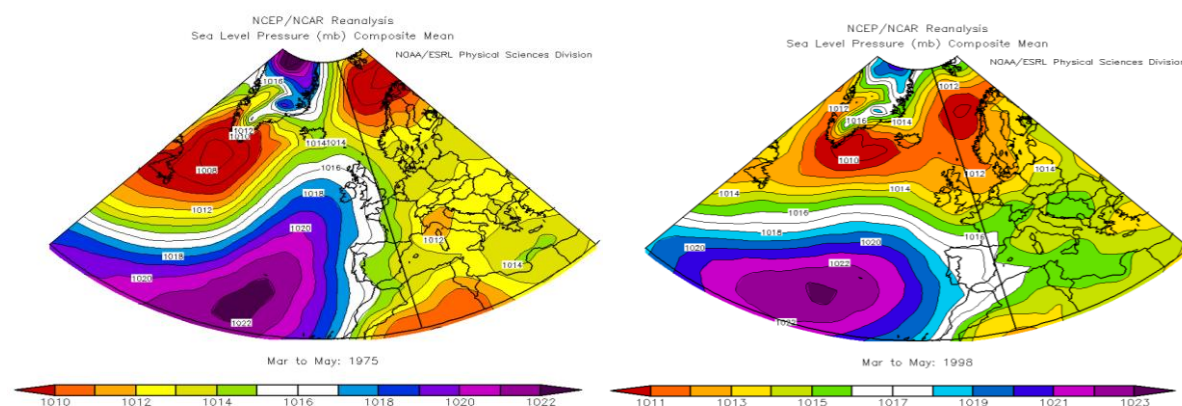


Figure 6 : Champs de pression en surface de la saison printanière en deux périodes ayant marqué les milieux subdesertiques marocains; à gauche: saison humide de l'année 1975; à droite: sèche de l'année 1998.

### 3. Conclusion

Le lien entre la variabilité des précipitations printanières en milieux oasiens marocains et l'ENSO est examiné. On a constaté lors de la période 1970-2000 que les valeurs positives de l'indice NINO3 sont associées à une réduction des précipitations dans les oasis. Ce résultat confirme celui obtenu par Knippertz et al. (2003b). Il semble que les phases chaudes de l'ENSO coïncident avec le prolongement zonal de la dorsale anticyclonique des Açores sur le Maroc alors que les phases froides sont concomitantes avec l'allongement de la dorsale anticyclonique des Açores vers le nord-est de l'Atlantique. On assiste, lors de la phase humide printanière à un creusement de la dépression saharienne en comparaison avec la phase sèche de la même saison. Cependant, on note une corrélation insignifiante entre l'ENSO et la NAO. Il ressort de ces résultats une incidence des SST hivernales dans le Pacifique Est sur les précipitations printanières des oasis marocains. Les études climatiques en milieux oasiens restent rares et les mécanismes de la dynamique atmosphériques en couplage avec l'océan qui sont responsables de la formation des pluies ne sont pas assez bien élucidés par les climatologues. Cette compréhension est essentielle pour la gestion pérenne des eaux oasiennes.

## **Bibliographie**

- Cassou C. 2004. Du changement climatique aux régimes de temps : l'Oscillation Nord Atlantique. *La Météorologie* - n° 45 - mai 2004. 21-32.
- Jones P.D., Jonsson T., Wheeler D. 1997. Extension to the North Atlantic oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland. *Inter. J. of Climatology*. Vol. 17: 1433–1450.
- Kalnay E. and Coauthors, 1996. The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- Katz R.W., Glantz M.H. 1986. Anatomy of a rainfall index. *Monthly Weather Review*. Vol. 114. 764-771.
- Knippertz P. 2004. A Simple Identification Scheme for Upper-Level Troughs and Its Application to Winter Precipitation Variability in Northwest Africa. *Jour. of climate*. Vol. 17. 1411-1418.
- Knippertz P., Christoph M., Speth P.. 2003a. Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Meteor. Atmos. Phys.* 83, 67–88 (2003) DOI 10.1007/s00703-002-0561-y.
- Knippertz P., Ulbrich U., Marques F., Corte-Real J. 2003b. decadal changes in the link between El Niño and springtime North Atlantic Oscillation and European-North African rainfall. *Int. J. Climatol.* 23: 1293–1311. DOI: 10.1002/joc.944.
- Lamb P.J., Pepler R.A. 1987. North Atlantic Oscillation: concept and application. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* Vol. 68, n° 10. 1218-1225.
- Oldenborgh G.J., Burger G., Tank A.K. 2000. On the El Niño teleconnection to spring precipitation in Europe. *International Journal of Climatology*. Vol. 20. 565–574.
- Rodo X., Baert E., Comin F.A. 1997. Variations in seasonal rainfall in southern Europe during the present century: relationship with the North Atlantic oscillation and the El Niño–southern oscillation. *Climate Dynamics*. Vol. 13. 275–284.
- Sneyers R. 1975. Sur l'analyse statistique des séries d'observations. Note technique n°143 de l'Organisation Météorologique Mondiale, Genève, Suisse, 192 p.
- Van Loon H., Madden R.A. 1981. The southern oscillation I: global associations with pressure and temperature in northern winter. *Monthly Weather Review*. Vol. 109. 1150–1162.

# EVALUATION OF SOLAR RADIATION DATA IN THE MOROCCAN CAPITAL CITY

Zaim Salma <sup>a,b</sup>, Arbaoui Asmae <sup>c</sup> And Barhdadi Abdelfettah <sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> *Research Team in Semiconductors Physics and Solar Energy (PSES), Energy Research Center, Ecole Normale Supérieure.*

<sup>b</sup> *Thermodynamic energy laboratory (LTE), Faculty of Sciences, Mohammed V University in Rabat, Morocco.*

<sup>c</sup> *Research Team in Matter and Radiation Science (ESMAR), Faculty of Sciences, Mohammed V University in Rabat, Morocco.*

\* *Corresponding author: [abdelfettah.barhdadi@um5.ac.ma](mailto:abdelfettah.barhdadi@um5.ac.ma)*

**Résumé :** *La pollution atmosphérique est l'un des problèmes les plus critiques causés et traités par la civilisation industrielle. C'est aussi, entre autres, une préoccupation majeure pour la conversion de l'énergie solaire. En effet, le rayonnement solaire, qui est le moteur du processus de production d'électricité propre, subit une atténuation importante avant même d'atteindre la surface du panneau solaire, en raison de son interaction avec les aérosols et autres polluants atmosphériques qui varient selon la zone d'exposition. Pour bien étudier ce phénomène nous avons récemment installé une nouvelle station météorologique performante au sein de notre laboratoire de recherche. Cependant, pour s'assurer de la fiabilité des données et de la crédibilité des mesures, nous avons décidé de mettre cette nouvelle station à l'épreuve. Dans un premier temps, nous avons comparé les résultats qu'elle fournit avec ceux obtenus par une autre station déjà testée et approuvée, puis avec ceux d'une base de données fournie par un logiciel solaire dédié. Cette approche, basée sur l'établissement d'une analyse comparative, nous a permis à la fois de garantir la reproductibilité des mesures expérimentales, et de nous projeter sur une base solide dans le suivi de nos recherches. Dans ce papier, nous présentons les premiers résultats de cette étude comparative ainsi que les principales conclusions que nous avons pu en tirer.*

**Mots clés :** *Production d'électricité propre, Rayonnement solaire, Logiciel SolarGis.*

**Abstract :** *Air pollution is one of the most critical problems caused and addressed by industrial civilization. It is also, among other things, a major concern for solar energy conversion. Indeed, solar radiation, being the driving force behind the process of clean electricity production, undergoes significant attenuation even before reaching the surface of the solar panel, due to its interaction with aerosols and other atmospheric pollutants that vary depending on the area of exposure. In order to carry out this research work, we first installed a new and efficient meteorological station in our laboratory. However, in order to ensure the reliability of the data and the credibility of the measurements, we decided to put this new station to the test. First, we have compared the results it provides with those obtained by another station already tested and approved, and then with data from a database provided by solar software. This approach based on the establishment of a comparative analysis will allow us both to guarantee the reproducibility of the experimental measurements but also to project ourselves on a solid basis in the follow-up of our research. In this paper, we present the first results of this comparative study and the main conclusions we were able to draw.*

**Key words:** *Clean electricity production, Solar radiation, SolarGis software.*

## 1. Introduction

The world's main energy sources are non-renewable and include mainly fossil fuels, which are major contributors to the ongoing problem of global warming due to CO<sub>2</sub> emissions. The eminent problems of depletion and pollution of the above-mentioned energy sources are leading the international community to turn its attention to alternative energy sources, especially solar energy, which seems very promising. It is widely believed that solar energy will be an important part of the future energy mix and will help reduce the carbon footprint (Kabir et al. 2017). However, the current state of the climate system doesn't work in its favor, especially with the levels of pollution the planet has experienced in recent decades. Indeed, due to the continuous increase in environmental pollution, the high concentration of particles in the air has significantly reduced the amount of solar radiation that can reach the Earth, and this reduction has a direct effect on the use of solar energy (Peters et al. 2020).

Solar radiation, also known as global radiation or insolation, is the driving force behind any type of solar energy production system and is the sum of the direct and diffuse components. According to statistics published by the International Energy Agency (IEA), the sun provides us with a considerable amount of approximately 885 million terawatt hours (TWh) reaching the

Earth's surface in one year. In other words, the amount of energy deposited per unit area perpendicularly exposed to sunlight is 1368 watts per square meter (W/m<sup>2</sup>). This measurement is called the solar constant or total solar irradiance. However, sunlight at the surface of our planet is attenuated by the Earth's atmosphere, so less power reaches the surface, about 1000 W/m<sup>2</sup> on a clear day when the sun is near its zenith (International Energy Agency.2011).

Actually, simulations of solar radiation have become increasingly common in recent years due to the rapid development and deployment of solar energy technologies worldwide. A major challenge in estimating solar radiation is its variability. Several studies have observed alternating rates of increase and decrease in solar radiation at the Earth's surface. The study of spatial and temporal changes in solar irradiance requires a database collected over many years (Sun et al. 2016). On the other hand, scientific research continues to evolve in the sense of mastering the measurement of meteorological parameters. This is remarkable by the development of measurement tools that are found on the market and which are more and more efficient. It is also significant because of the implication of numerical aspect where studies are carried out to improve the climatic models by the insertion of new magnitudes which will have an impact on the improvement of the forecast of solar radiation.

The importance of solar radiation data in the study of its attenuation by air pollution justifies the interest of this paper, which proposes a preliminary study comparing measurements of incident global irradiance from a station recently installed in our laboratory with those of another previously tested station belonging to the same site. The correlations of the global solar irradiance measurements will be analyzed monthly and compared with a database from the SolarGis software. The overall objective of the paper is to test the data provided by the solar software, in order to have a backup database in case of missing measurements due to technical problems that the sensor could encounter as any other experimental tool.

## 2. Material and method

### 2.1. Location of the study site

The two weather stations to be compared are sited at PSES Solar Energy Platform located at ENS-Mohammed V University in Rabat, with latitude of 33°9'79106" and longitude of -06°8'27483 (figure 1).

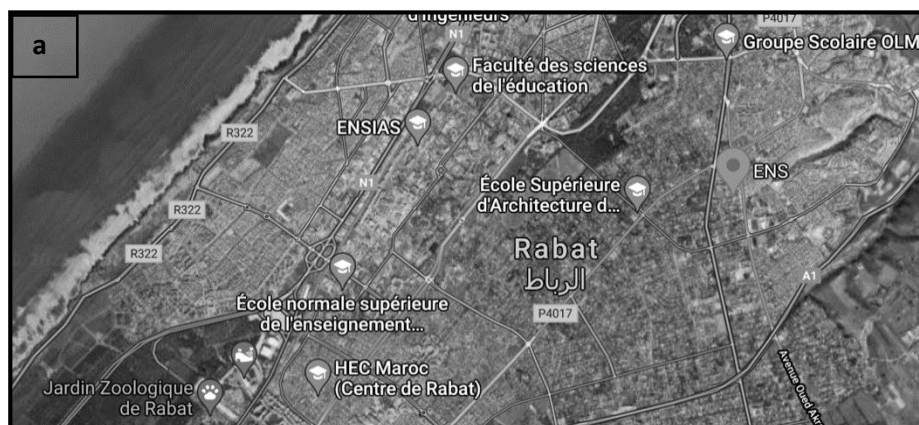




Figure 1. Location of the two weather stations from Google Maps{<https://bit.ly/3uGFiaC>):  
 a. Location of the ENS establishment in Rabat. b. Location of the two meteorological stations inside the ENS.

## 2.2. Study equipment

The first station in question is composed mainly of a SOLYS2 solar tracker which is the most widely used solar tracker in the world for solar energy and meteorology applications. It has the performance and reliability levels of the reference surface radiation network. The solar monitoring system is composed of a CHP1 pyrheliometer for the estimation of direct solar radiation (CHP1 Pyrheliometer, Kipp&Zonen n.d.), and two CMP10 pyranometers, the first for global solar radiation and the second shaded for diffuse solar radiation (CMP10 pyranometer, Kipp&Zonen n.d.). The system has a range of values up to 4000 W/m<sup>2</sup>, with an operational temperature range from -40°C to 80°C.

The second station is a Davis Vantage Pro2 plus weather station rated 'VP2+' that was installed in 2019, featuring a suite of outdoor integrated sensor suite (ISS), an anemometer, a pyranometer, a UV sensor, 24-hour active ventilation and then an LCD screen console with power supply. The link between the external sensors (ISS) and the console is done by radio waves with a range of 300 meters at sight (Vantage Pro 2 Plus, meteo station n.d.). The station allows the measurement of weather conditions in real time and to archive them. The measured weather parameters are as follows: indoor/outdoor temperature, indoor/outdoor humidity, atmospheric pressure, heat index, dew point, precipitation, felt temperature, wind speed, wind direction, evapo-transition, global solar radiation, UV index, UV dose. The solar sensor has a range of values from 0 to 1800 W/m<sup>2</sup> with an accuracy of  $\pm 5\%$  of the total scale.

For this phase, the study focus on the global solar irradiance data known by GHI which is measured every day with a step of 30 minutes from January to December of 2020. It is worth noting that our two stations have been installed according to the standards of orientation and calibration by experts in the field. They have both a visual monitoring for the verification of time and measures either by the console or by the acquisition software: WeatherLink for the station Davis Pro2+ and LoggerNet for the new station. They have also an integrated automated monitoring for the detection of failures and anomalies that could occur at the sensors.

## 3. Results and interpretations

### 3.1. Correlation between experimental data from the two stations

As shown in the different graphs of figure 2, the analysis of daily solar radiation data for the year 2020 from the two stations shows a good agreement in general.

The results of the correlation coefficient from January to October, varying between 0.97 and 0.99, reflect a good correspondence between the measurements of the two stations. However,



we notice that the correlation coefficient takes lower values during the month of November and December reaching a minimum of 0.76. This can be attributed, according to our version of analysis, to the trajectory of the Sun in relation to the Earth, where it is in its lowest position during the month of December. This does not allow the sensor of the VP2+ to capture the effective irradiation during this month due to the type of dome of the sensor which includes slightly convex terminals while the dome of the new station has a field of view of 180°.

We also add that the two stations are positioned opposite each other at different altitudes. The new one is at 10m height while VP2+ is at 5m. This can therefore create a shading effect for the VP2+ with the low level of the solar resource.

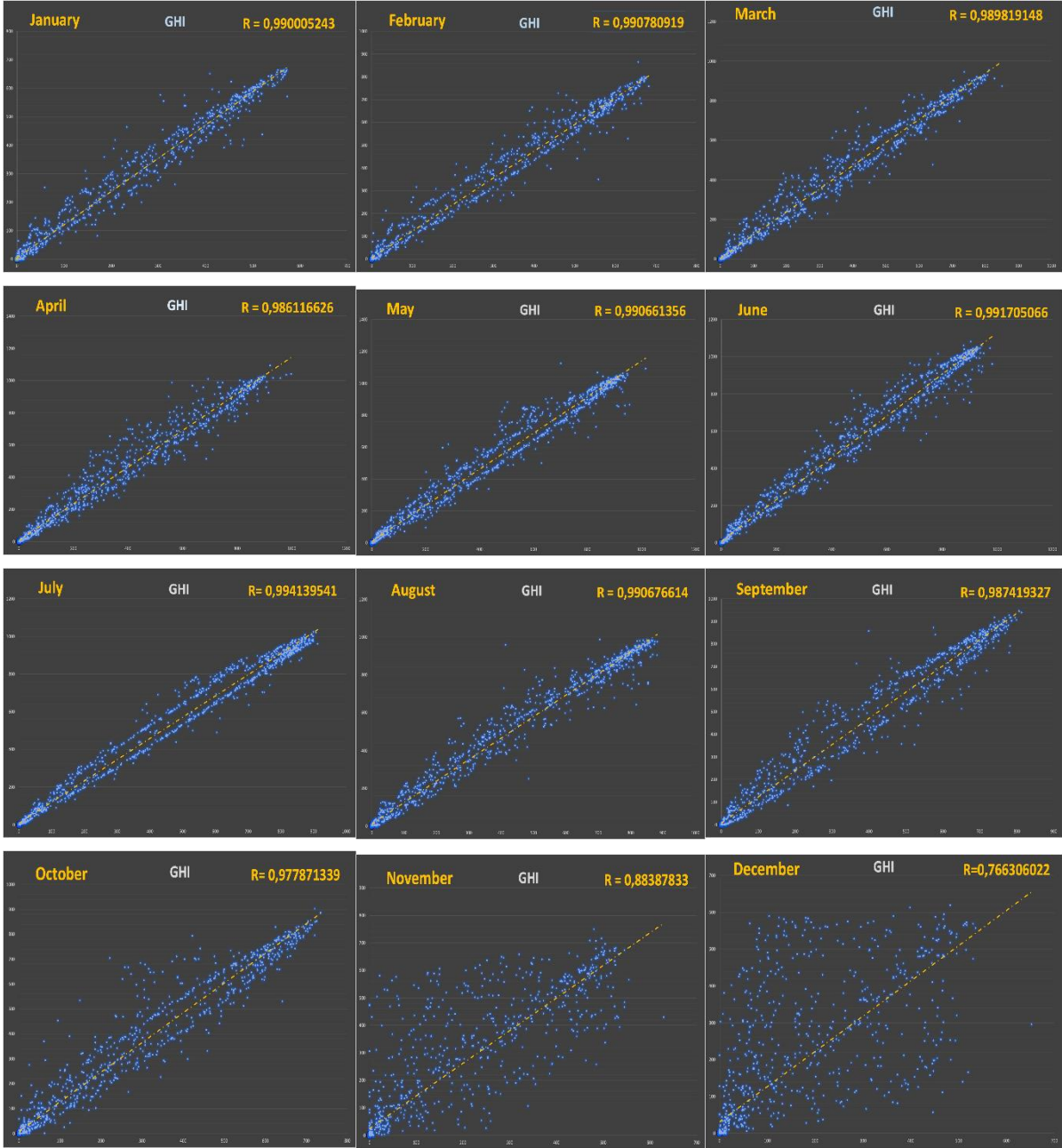


Figure 2. Monthly representation of the correlations of the daily solar irradiation data GHI (W/m<sup>2</sup>) measured by the two stations for the year 2020.

**3.2. Correlation between experimental and simulated data**

The average monthly GHI data measured in real time by the new station is compared to data simulated by the SolarGis software extracted from the Masen platform (Atlas de la Ressource Solaire au Maroc n.d.). The SolarGis software, formerly called GeoModel Solar, provides meteorological data, online tools and consulting services for accurate and efficient solar energy assessment.

The monthly average GHI data provided by this software is calculated based on 25 recent years of history (1994-2018) from atmospheric and satellite data with a time step of 15 and 30 minutes, taking into account terrain effects with a nominal resolution of 250m (Global Solar Atlas 2.0 2020).

However, due to the limited validation potential for some regional models because of the lack of high quality ground measurements, an uncertainty persists on the annual GHI estimate ranging from 4 to 6% depending on the region.

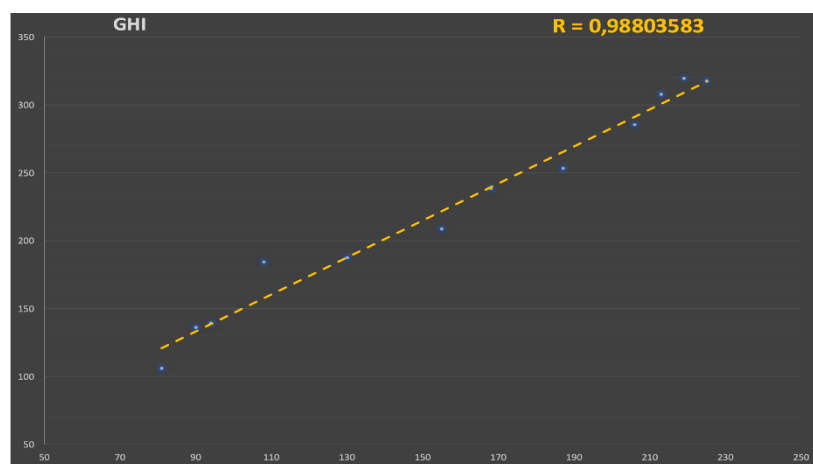


Figure 3. Correlation between experimental and software-simulated mean monthly GHI ( $W/m^2$ ) data for the year 2020.

As shown in Figure 3, there is good agreement between the experimental and simulated data, with a value of 0.998 for the correlation coefficient.

This allows us to consider that the data simulated by the cited software are sufficiently reliable and almost correspond to the data measured in real time.

#### 4. Conclusion

In this work, we compare the experimental data of the new meteorological station with those of an already tested station in order to compare the two experimental sources. The results show a good agreement of the values obtained by the two stations.

A correlation study between the experimental data and those simulated by the SolarGis software is established afterwards showing a high correspondence. This leads us to conclude that the aforementioned software could be a guarantor of an alternative source of data adapted to the real state in case of missing data, or of technical problems that the station could encounter.

#### Acknowledgements

The authors are expressing their thanks to Ms. Laarabi Bouchra, a member of the PSES team, for her permanent help for the acquisition of the experimental data.

#### References

Atlas de La Ressource Solaire Au Maroc. <https://bit.ly/3g0ldIg> (June 8, 2021).

CHP1 Pyrheliometer, Kipp & Zonen. <https://bit.ly/3pz03UR> (June 8, 2021).

CMP10 Pyranometer, Kipp&Zonen. <https://bit.ly/3zf7vsD> (June 8, 2021).

Global Solar Atlas 2.0. 2020. “Morocco\_GHI\_poster-Map.”

International Energy Agency, 2011: ed. *Solar Energy Perspectives Technologies*, 234p.

Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A., Kim, K., 2018: Solar Energy: Potential and Future Prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews***82**: 894-900.

Peters, I., Brabec, C., Buonassisi, T., Hauch, J., Nobre, A., 2020: The Impact of COVID-19-Related Measures on the Solar Resource in Areas with High Levels of Air Pollution. *Joule***4**(8): 1681–87.

Sun, H., Gui, D., Yan, B., Liu, Y., Liao, W., Zhu, Y., Lu, C., & Zhao, N., 2016: Assessing the Potential of Random Forest Method for Estimating Solar Radiation Using Air Pollution Index. *Energy Conversion and Management***119**: 121–29.

Vantage Pro 2 Plus, Meteo Station. *Wireless Weather Station with Active Fan - 6163EU - Davis Instruments*. <https://www.meteo-shopping.fr/Station-meteo/Station-meteo-Vantage-Pro-2-Plus-sans-fil-avec-ventilation-active-6163EU-Davis-Instruments> (April 15, 2021).

# L'AGRICULTURE INTELLIGENTE COMME FORME D'ADAPTATION AVEC LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU MAROC

Saloui A.<sup>1</sup> et Adidi A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Hasan II de Casablanca, Casablanca, saloui.abdelmalik@gmail.com

<sup>2</sup> Institut National d'Aménagement et d'Urbanisme, Rabat, Maroc, a2adidi@yahoo.fr

## Résumé

*Le Maroc est un pays à vocation agricole. Vu la nature de son climat sec à sub-sec, l'existence et le développement de son agriculture exigeant l'irrigation. Cette dernière est toujours conservatrice/artisanale. Elle cause une grande perte en eau. Avec le réchauffement climatique et la diminution des précipitations, l'adoption d'une irrigation dite 'intelligente' est plus que nécessaire. Elle fait l'objet d'une des meilleures alternatives pour un développement économique harmonieux et une conservation des ressources en eau assurée.*

**Mot clefs :** Maroc - agriculture intelligente – changement climatique – adaptation -

## Summary

*Morocco is an agricultural country. Given the nature of its dry to sub-dry climate, the existence and development of its agriculture requiring irrigation. The latter is always conservative / artisanal. It causes a great loss of water. With global warming and decreasing rainfall, the adoption of so-called "smart" irrigation is more than necessary. It is the subject of one of the best alternatives for harmonious economic development and assured conservation of water resources.*

**Keywords :** Morocco - smart agriculture - climate change - adaptation -

## Introduction

Le Maroc est un pays à paradoxes naturelles et économiques. Il est caractérisé par le stress hydrique (< de 800m<sup>3</sup>/h/an), par une poussée démographique galopante et par des choix de développement économiques agricoles souvent exigeant en eau.

Pour un potentiel en SAU de 8700000 hectares, l'agriculture marocaine est à la fois moderne/irriguée (1600000 h ou 21% de la superficie cultivée) et archaïque(7100000 h ou 79% de la superficie cultivée).

L'agriculture demeure un secteur économique stratégique au Maroc : le taux de croissance du pays est fortement corrélé à celui de la production agricole et, elle est le premier pourvoyeur d'emplois du pays (40 % de la population active vit de ce secteur).

Depuis les années soixante-dix, les politiques agricoles marocaines ont fait le choix de l'exportation plutôt que de l'autosuffisance. Ce choix génère une forte pression sur les ressources en eau. Ainsi, la situation de pénurie hydrique ne cesse de s'aggraver, surtout avec les impacts des changements climatiques fortement ressentis. La Direction Générale de Météorologie prévoit une régression de 20% en moyenne des précipitations d'ici la fin du siècle<sup>22</sup>.

## 1. Problématique

L'adoption de nouvelles alternatives, dans le domaine de la gestion des ressources en eau, permettrait la croissance économique, et par la suite, la stabilité sociale et politique du pays.

L'objet de cette communication est de proposer une éventuelle forme de valorisation de ces ressources, en adoptant de nouvelles techniques d'irrigation permettant la conservation, la valorisation et le développement de la ressource 'eau'.

## 2. Méthodologie

### 2.1. Création de la base des données

---

<sup>22</sup>Pour faire face aux problèmes liés au manque d'eau, le Maroc, à travers le Plan Maroc Vert a mis en place des programmes structurants tels que le Programme National d'Economie en Eau d'Irrigation (PNEEI) et le Programme d'Extension de l'Irrigation (PEI). Tous ces programmes visent la conservation de la ressource 'Eau' et son optimisation.

Le Maroc dispose de quarante-deux stations météorologiques synoptiques disposant des mesures de tous les éléments du climat. La qualité de ces mesures est jugée bonne (Saloui, 2020).

D'autres stations, climatologiques et automatiques, sont disponibles. La qualité des mesures offertes par ces dernières, souvent dirigées par un personnel peu qualifié, est jugée médiocre (Fig. 1).

Nous avons retenu la période des mesures des éléments climatiques allant de 2000 à 2019 (20 ans).

Cette base de données climatique a subi un traitement statistique pour déterminer sa représentativité et son homogénéité (Sebbar, 2013).

## **2.2. Outils d'analyse**

2.2.1. Le vent est mesuré en m/s, à une altitude de 2 mètres ;

2.2.2. La durée d'insolation est exprimée en heure / jour ;

2.2.3. L'humidité de l'aire est exprimée en %.

2.2.4. La température est exprimée en °c.

2.2.5. Les valeurs de l'ETP (en mm) sont calculées sur la base de la méthode de Penman modifié FAO ([www.legalis.net/cgi-iddn/certificat.cgi?](http://www.legalis.net/cgi-iddn/certificat.cgi?)).

2.2.6. Les tests de l'efficacité des techniques de l'irrigation étaient effectués dans les périmètres agricoles des plaines de Chaouia et de Tadla.

2.2.7. ArcMap est le logiciel utilisé pour représenter spatialement des valeurs relatives à l'ETP.

2.2.8. Les fonctions d'interpolation (pour la spatialisation cartographique) sont différentes selon le paramètre climatique en question ;

## **3. Résultats**

Le traitement statistique et, par la suite, la représentation graphique des données climatiques brutes a abouti aux résultats suivants :

**3-1- La pluviométrie annuelle :** La figure ci bas (n°. 2) présente la répartition annuelle des précipitations (mm). Il est à signaler que vu la discontinuité spatiale caractérisant les précipitations, et pour avoir une représentation aussi proche que possible de la réalité, nous avons fait appel aux mesures pluviométriques de plusieurs autres stations secondaires (117 stations).

**3-2- La tendance annuelles moyennes des précipitations :** La figure ci bas (fig. 3) représente l'état futur des précipitations annuelles moyennes (mm);

**3-3- L'évapotranspiration annuelle :** La figure ci-bas (fig. 4) représente la répartition annuelle moyenne de l'ETP de Penman modifié FAO (mm).

**3-4- les bilans hydriques et les besoins d'irrigation :** Les figures n°. 5 à 10 représentent la répartition mensuelle moyenne des valeurs des bilans hydriques dan quelques stations marocaines.

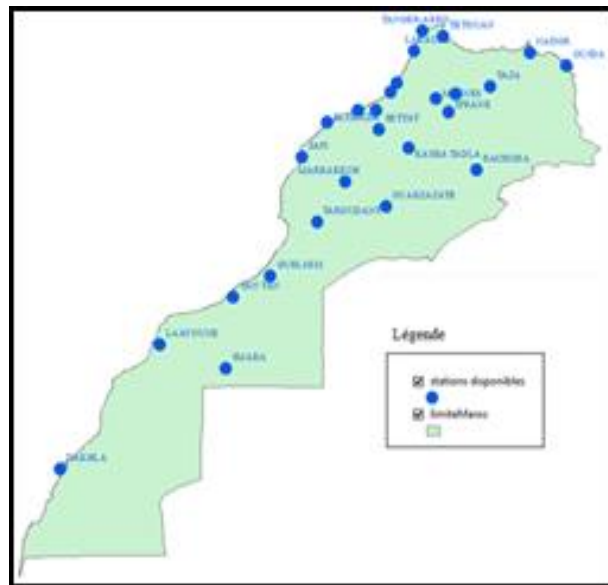


Fig. 1 : le réseau national des stations météorologiques utilisé

#### 4. Discussion

Partant de la notion de l'agriculture intelligente qui se définit comme une approche visant à transformer et réorienter le développement agricole dans le cadre des nouvelles réalités des changements climatiques (Lipper et al. 2014).

Selon les régions, la répartition des précipitations annuelles varie souvent entre 100 et 800 mm (carte 2);

Les précipitations se concentrent dans la partie N-W du pays. Partie montagneuse à faible potentiel agricole : zone des montagnes et absence des plaines agricoles ;

Les cumuls annuels de l'ETP varient entre 1500 et 5000 mm. Dans les régions agricoles du centre-ouest du pays, ils varient entre 1500 et 3000 mm ;

Considérant les périodes agricoles réelles, et par la suite l'irrigation, nous avons calculé les bilans hydriques théoriques à l'échelle mensuelle pour nous approcher des 'cycles culturaux' (fig. 5 à 10).

La bonne production agricole exige toujours l'irrigation. Ainsi, les agriculteurs, vu les faibles moyens financiers et techniques dont ils disposent, pratiquent très souvent des techniques traditionnelles de l'irrigation : le gravitaire, les rampes à vannettes, la gaine souple, les siphons tubulaires, la Robta, aspersion, localisée, ... (Yacoubi M., Soussane M. et al. 1999).

La pratique de ces techniques d'irrigation est à la base de la perte d'une quantité d'eau qui dépasse les 30 à 40 %.

Avec la poussée démographique galopante que connaît le pays, les exigences en eau pour le développement économique et le changement climatique, il est temps d'optimiser, de valoriser et de conserver la ressource déjà rare et qui le sera plus demain (l'eau d'irrigation).

Sous cette perspective, nous avons comparé les volumes d'eau d'irrigation selon les différentes techniques traditionnelles avec ceux calculés sur la base des bilans hydriques (avec l'ETP calculée selon la formule de Penman modifié FAO).

Bilan : l'utilisation des rampes à vannettes ou des siphon tubulaires a permis d'économiser 23% d'eau et de dégager une marge bénéficiaire supérieure de 43 % par rapport aux techniques d'irrigation traditionnelles. L'entretien du réseau et l'automatisation de l'irrigation (irrigation intelligente) permettraient d'économiser 50 à 55 % des eaux perdues en évaporation et en infiltration sous système d'irrigation artisanal.

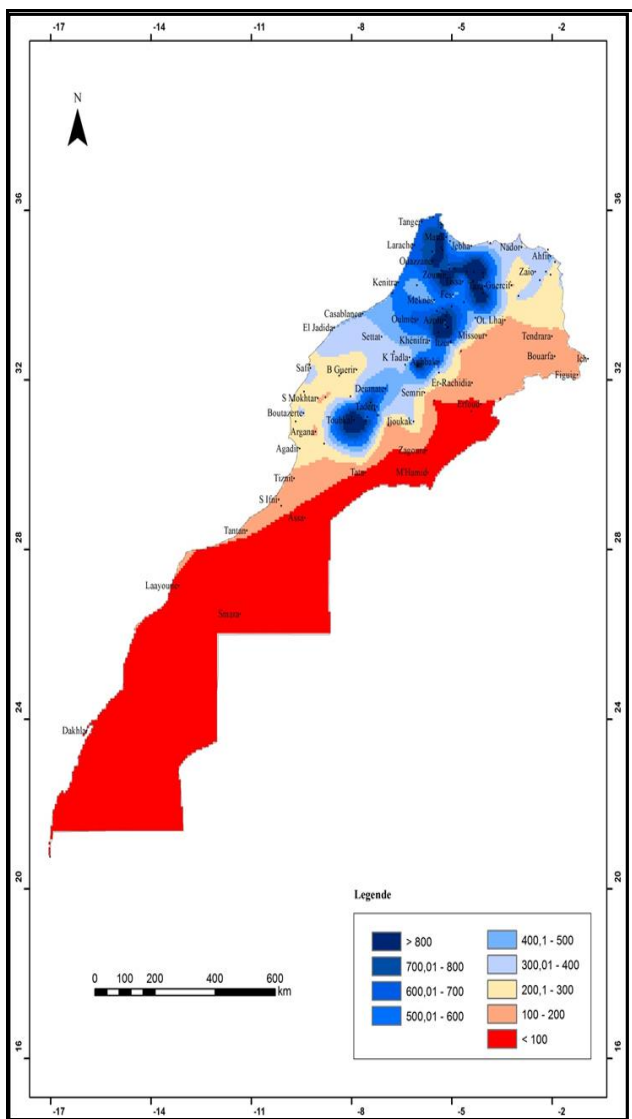


Fig. 2 : La répartition annuelle des précipitations (mm)

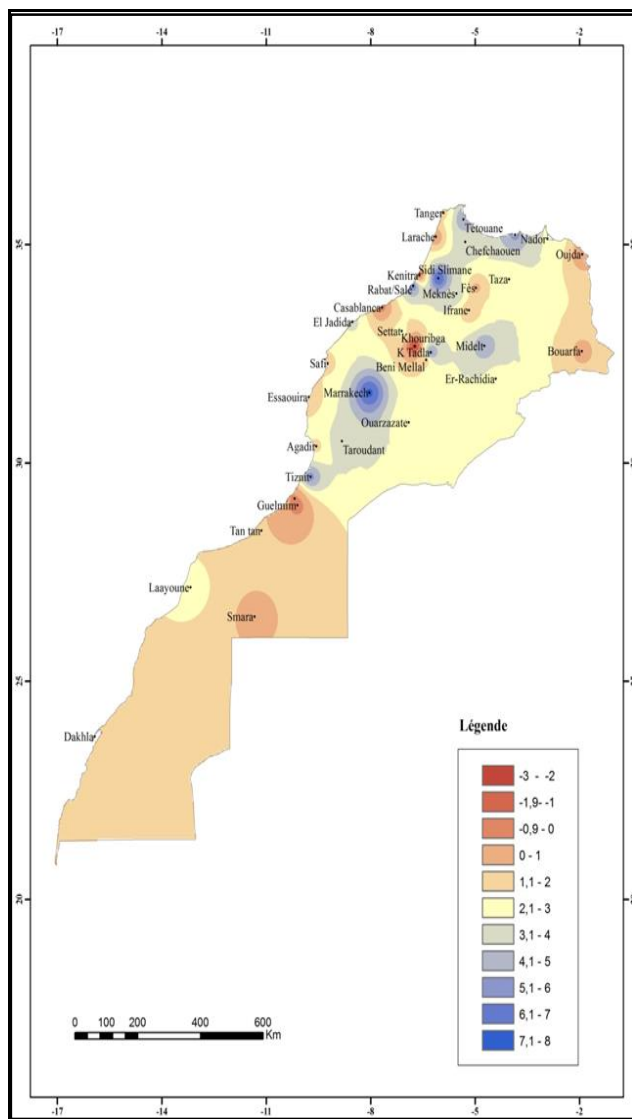


Fig. 3 : La tendance annuelle des précipitations (méthode de Kendall)

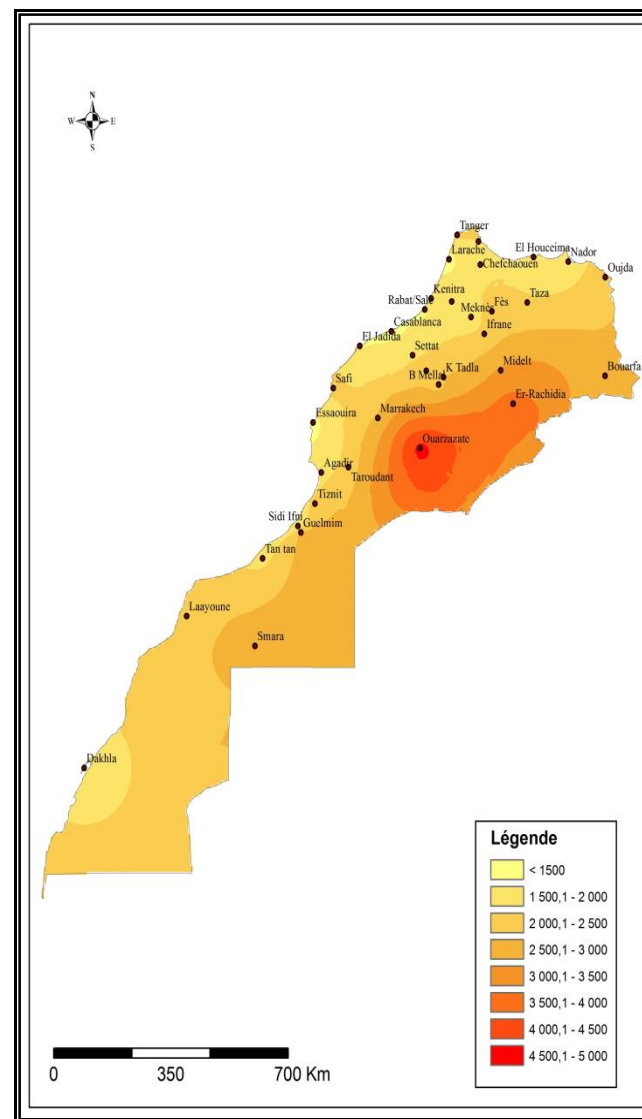


Fig. 4 : La répartition de l'ETP annuelle moyenne en (mm) (Penman modifiée FAO)

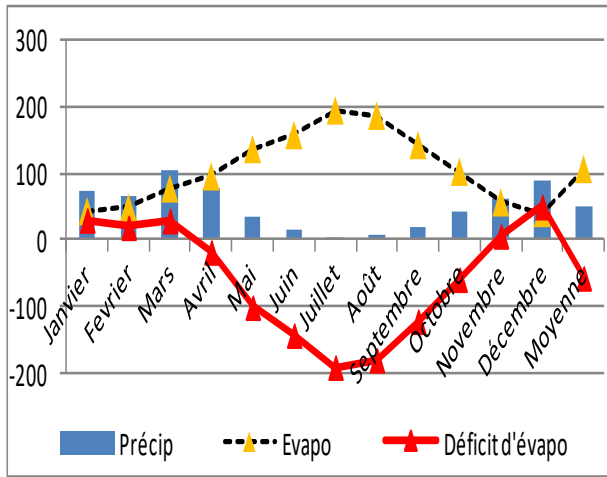


Fig. 5 : Bilan hydrique à Béni Mellal

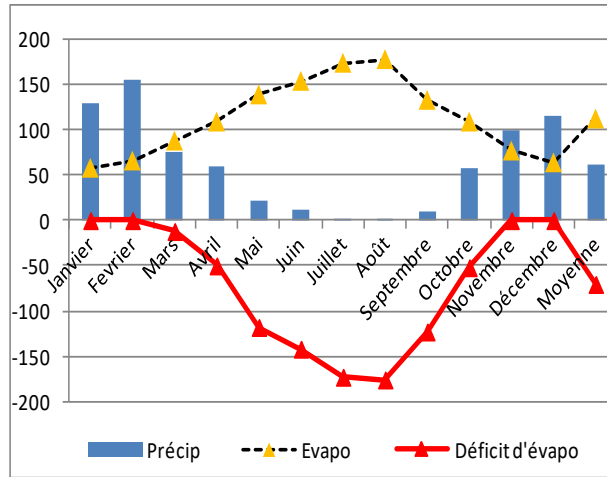


Fig. 6 : Bilan hydrique à Larache

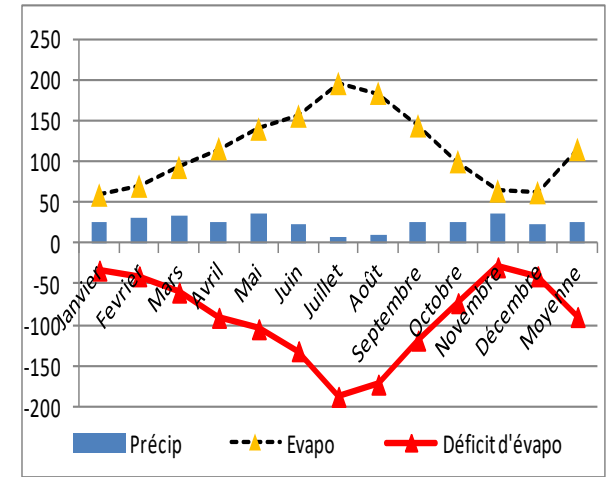


Fig. 7 : Bilan hydrique à Oujda

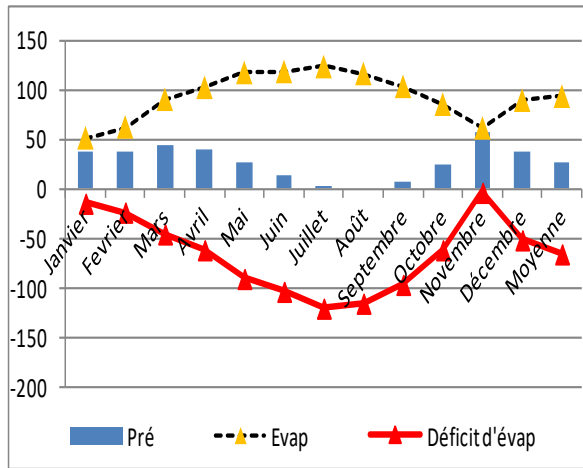


Fig. 8 : Bilan hydrique à Essaouira

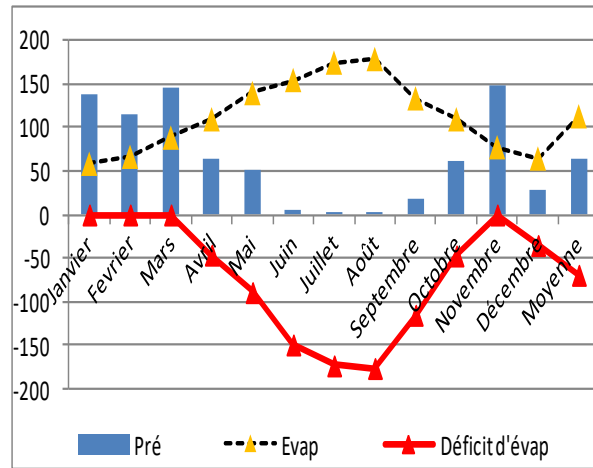


Fig. 9 : Bilan hydrique à Tanger

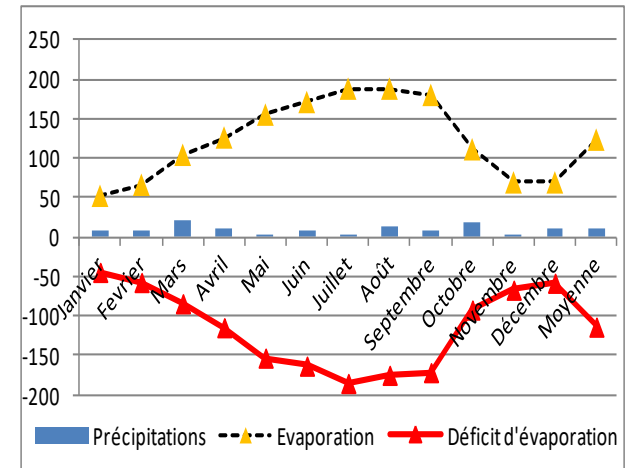


Fig. 10 : Bilan hydrique à Ouarzazate



## 5. Conclusion

Les politiques agricoles adoptées par le pays jusqu'aujourd'hui ont toujours pariés sur l'irrigation des produits agricoles à fortes valeurs ajoutées. La croissance de ces produits est souvent très exigeante en eau d'irrigation.

Les agriculteurs pratiquent souvent des techniques d'irrigation ancestrales (gravitaire, entre autres) qui causent une perte énorme en eau : entre 40 et 50 % par rapport à l'irrigation raisonnée. Des millions de m<sup>3</sup> d'eau sont perdus annuellement, avec, en termes monétaires, une perte d'environ 10 dh. /heure par station de pompage.

Il est donc de conviction que le passage du système gravitaire au système intelligent n'est plus un luxe pour réussir une conservation de la ressource 'eau' et un développement harmonieux de l'agriculture et du monde rural.

Conscient de cette situation, et à travers le Plan Maroc Vert, le pays encourage le passage des petits agriculteurs (< 5 h) à l'irrigation intelligente en prenant à 100 % en charge l'acquisition et l'installation du matériel d'irrigation intelligente.

Le Plan Maroc Vert (avec un plan de 70 à 80 milliards de dirhams<sup>23</sup> d'investissement et la création de 1,5 millions d'emplois) est loin de réaliser tous ces objectifs.

En parallèle avec l'adoption de l'irrigation intelligente, l'adaptation avec les changements climatiques au Maroc exige :

- Le respect de la vocation régionale dans le choix des variétés agricoles ;
- L'encouragement des variétés agricoles locales et la valorisation des plantes endémiques et aromatiques ;
- Le développement des ressources hydriques et énergétiques non conventionnelles ;

## Bibliographie

Grisollet (H.), Guilmet (B.), Arléry (R.). *Climatologie, méthodes et pratiques*. Gauthier – Villars, 2<sup>ème</sup> Ed. Paris, 434p.

Lipper L, Thornton P, Campbell Bm, (...), Torquebiau EF. 2014. Climate-smart agriculture for foodsecurity. *Nature Clim Change* 4 :1068-1072

Saloui A. 1986. *Etude de la variabilité des précipitations et des bilans hydriques dans la partie N-W du Maroc*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Académie des Sciences et Techniques, Faculté des Sciences et Techniques, Lille, France.

Saloui A. 2000. *Précipitations et bilans hydriques dans les plaines atlantiques marocaines*. Publication de la FLSH de Mohammedia, Série : Colloques, n°. 8 (en arabe).

Saloui A., Filali A. et Kanjaa R. . 2014. Etude du littoral 'El Jadida – Kénitra' : étude basée sur la télédétection spatiale. Travaux du 3<sup>ème</sup> Colloque des Géographes Marocains, *RGM*, n°. 1-2/2014, pp. 57-72.

Sebbar A. 2013. *Etude de la variabilité de la pluviométrie au Maroc 1935-2005 : Réactualisation de la carte de précipitations*. Thèse de doctorat, Université Hassan II Mohammedia-Casablanca, faculté des Sciences de Ben M'sik, Casablanca, 171 p.

Yacoubi S., Moumen M., Berkaoui A., Khiati D. et Najih A. 1999. Economie de l'eau d'irrigation, *Programme National de Transfert de Technologie en Agriculture (PNTTA)*. N°58/Juillet. 4p. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (<http://www.multimania.com/bamouh> ou <http://altern.org/cntta>)

---

<sup>23</sup>Un Dirham marocain est égal à 0,093 Euro

# MODELISATION DE L'ÎLOT DE CHALEUR (ICU) SUR LA VILLE DE CASABLANCA

Sebbar A.<sup>1</sup>, Hsaine M.<sup>2</sup>, Idrissi Azami Gh.<sup>2</sup>, Fougrache H.<sup>2</sup>, Hanchane M.<sup>3</sup> et Badri W.<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Direction Générale de la Météorologie. BP 8106-Casa Oasis; Bd Mohamed Taïb Naciri Hay Hassani, Casablanca. Maroc. sebbar202@gmail.com

<sup>2</sup>Laboratoire Ecologie et Environnement (LEE), Equipe Ecologie et Ecophysiologie Végétale (3EV), Faculté des Sciences Ben M'Sik- Casablanca. Université Hassan II- Casablanca. bahi\_hsain@hotmail.com

<sup>3</sup>Etudes Urbaines, USMBA-Fès, Fès, Maroc. mohamed.hanchane@usmba.ac.ma

**Résumé :** Par rapport au milieu rural, le milieu urbain est caractérisé par une forte activité industrielle et de transport. Ces activités contribuent à une modification de l'état surfacique, ainsi, une fluctuation du bilan énergétique et radiatif. En conséquence, l'apparition du phénomène d'îlot de chaleur au-dessus d'une ville. D'autre part, l'augmentation de la chaleur en milieu urbain a des impacts sur la qualité de l'air, le confort thermique et la santé de la population locale. Dans cette optique, nous nous proposons une étude qui vise à identifier la variation de la température de surface sur la ville de Casablanca par l'utilisation des imageries satellites Landsat 8. Par ailleurs, la ville de Casablanca est connue par, une forte densité du tissu urbain, une activité industrielle et par un parc auto très dense. A partir des imageries satellites Landsat 8, on a pu calculer les températures de surface sur la ville de Casablanca, pendant la journée et la nuit et les valider par les données de températures observées entre 2014 et 2017. Une cartographie, de l'occupation du sol, de la température de surface et de l'indice de végétation a été élaborée pour caractériser le phénomène d'îlot de chaleur sur cette ville par saison. Ainsi, au cours des nuits, l'effet de la chaleur émise par les composantes minérales du tissu urbain devient prépondérant dans des conditions météorologiques stables. D'où l'apparition d'îlot de chaleur accentué sur la partie urbaine de la ville. Une forte corrélation entre la température de surface et de l'air a été signalée pendant la saison d'hiver contrairement aux autres saisons. Cette relation en période d'hiver montre que toute augmentation de la température de surface engendre une augmentation de la température de l'air et inversement.

**Mots-Clés :** Casablanca, îlots de chaleur, Landsat8, NDVI.

**Abstract :** Compared to rural areas, urban areas are characterized by strong industrial and transport activity. These activities contribute to a modification of the surface state, thus, a fluctuation of the energy and radiative balance. As a result, the appearance of the heat island phenomenon over a city. On the other hand, the increase in heat in urban areas has impacts on air quality, thermal comfort and the health of the local population. With this in mind, we are proposing a study which aims to identify the variation in surface temperature over the city of Casablanca by using Landsat 8 satellite imagery. In addition, the city of Casablanca is known for its high density of water. Urban fabric, industrial activity and a very dense car park. From Landsat 8 satellite imagery, we were able to calculate the surface temperatures over the city of Casablanca, during the day and at night and validate them with the temperature data observed between 2014 and 2017. A mapping of the occupation of the soil, surface temperature and vegetation index was developed to characterize the heat island phenomenon over this city by season. Thus, during the nights, the effect of the heat emitted by the mineral components of the urban fabric becomes predominant in stable weather conditions. Hence the appearance of an accentuated heat island in the urban part of the city. A strong correlation between surface temperature and air has been reported during the winter season unlike other seasons. This relationship during the winter period shows that any increase in surface temperature causes an increase in air temperature and vice versa.

**Key words :** Casablanca, heat island, Landsat 8, climate.

## Introduction

Le milieu urbain est caractérisé par la présence des bâtiments, des matériaux artificiels, des activités humaines et une réduction continue des surfaces végétales, par rapport au milieu rurales (Roaf. S., 2005). Cette modification de l'état du sol induit une modification des paramètres météorologiques, ainsi une perturbation du bilan énergétique et radiatif du milieu urbain (Oke T. R., 1978). Cette perturbation se manifeste par une élévation localisée des températures au niveau du centre de la ville, par rapport aux environs moins urbanisés. La différence de température peut atteindre jusqu'à 10°C et est en moyenne de 1,5 à 2,5°C (Fedel.C, 2010), d'où le concept d'îlot de chaleur urbain. La formation du phénomène d'îlot de chaleur repose sur des conditions synoptiques particulières : un temps anticyclonique, une nébulosité et un vent faibles, ce qui engendre une variation saisonnière de son intensité (Fedel. C, 2010).

L'îlot de chaleur nocturne est bien marqué dans la plupart des villes que l'îlot de chaleur diurne. Ceci est due à la stabilité des conditions météorologiques pendant la nuit que le jour et à la restitution de l'énergie sous forme de chaleur par les bâtiments et les surfaces minérales (Voogt, 1997).

L'étude de la variation spatiale du phénomène d'îlot de chaleur en milieu urbain se base sur des données météorologiques, à savoir les bulletins météorologiques quotidiens (Cantat O., 2004) ou bien sur la télédétection spatiale en utilisant les capteurs thermiques installés au bord des satellites tel que NOAA-AVHRR, Landsat TM / ETM+, Terra/Aqua Terra MODIS (Aniello, 1995), (Schmid, 1991), (Rhinane, 2012).

Notre étude se base sur l'utilisation des images satellites Landsat 8 pour la détection de la variation spatio-temporelle de la température de surface. Ces images permettent à travers ses deux capteurs OLI et TIRS de donner des informations qui couvrent le territoire d'étude avec une résolution spatiale qui varie entre 30 et 100 m. en fonction de l'occupation du sol et les activités humaines. Afin de caractériser le phénomène d'îlot de chaleur au milieu urbain.

## 1. Zone d'étude

La ville de Casablanca est la capitale économique du Maroc. Elle est située sur la plaine de Chaouia et caractérisée par sa position sur la côte atlantique, au nord-ouest de l'Afrique à une latitude Nord ( $33^{\circ}35'$ ) et une longitude ouest ( $7^{\circ}25'$ ) (casablancacity.ma).



Figure 1 : Image satellite de la ville de Casablanca et découpage adapté pour l'étude de la température de surface.

Grâce à sa position par rapport à l'océan, la ville de Casablanca possède un climat méditerranéen à forte tendance océanique qui lui confère des hivers doux et relativement humides et des étés modérément chauds et sans précipitations (Sebbar et al., 2011).

La ville connaît des conditions environnementales catastrophiques, une mauvaise qualité de l'air due au transport et aux activités industrielles et du faible nombre d'espaces verts. Elle est devenue la ville la plus polluée au Maroc. Cette pollution atteindrait, selon la plupart des sources de mesure de la qualité de l'air (DGM), un seuil critique et la santé des habitants s'en retrouve parfois très sérieusement menacée (Nejjari, Tahiri, Tessier, 2016).

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Matériels

Pour cette étude, on a utilisé plusieurs produits Landsat 8 multi temporelles entre 2014 et 2017, Le satellite Landsat 8 permet, par ces 2 capteurs OLI et TIRS, la mesure de la luminance qui désigne le rayonnement directement émis par la surface du sol. Les images satellites utilisées couvrent toute la ville de Casablanca pendant la période diurne et nocturne. Ces images sont corrigées et ont une couverture nuageuse inférieure à 10%. Les produits Landsat 8 contiennent deux bandes thermiques, la bande 10 et la bande 11 qui permettent, par l'application de quelques techniques, l'extraction de la température de surface sur la ville de Casablanca.

Chaque image satellite Landsat 8 téléchargée est accompagnée par un fichier métadonnée où on trouve toutes les constantes nécessaires pour le calcul de la température de brillance et de surface.

## 2.2. Méthodologie

Le calcul de la température de surface LST (Land Surface Temperature) se fait en plusieurs étapes et en utilisant les différentes bandes spectrales des capteurs OLI et TIRS.

L'émissivité et la température de brillance sont deux paramètres importants pour le calcul de la LST. Le calcul de l'émissivité se fait à partir de la valeur de la proportion de végétation déduite de l'indice de végétation (L'INDVI), ces valeurs sont toujours inférieures à 1 et généralement supérieures à 0.9 pour la plupart des corps naturels.

Les calculs de la radiance ainsi que la température de brillance se fait en se basant sur les bandes spectrales 10 et 11 du capteur radiomètre infrarouge TIRS du satellite Landsat 8. Toutes les constantes nécessaires sont disponibles dans le fichier métadonnées qui accompagne chaque image satellite. Finalement on déduit la valeur de la température de surface en fonction de l'émissivité et de la température de brillance (USG).

## 3. Résultat et discussion

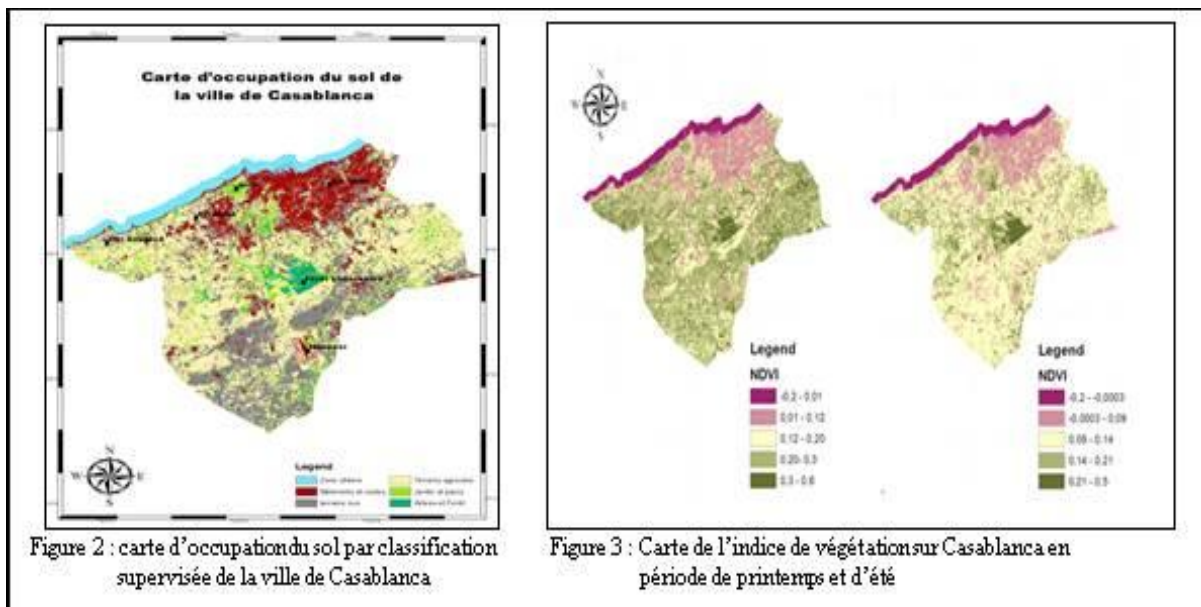
### 3.1. Carte d'occupation du sol

La carte d'occupation du sol réalisée par classification supervisée à partir d'une image satellite Landsat 8 de la ville de Casablanca, permet de manière approximative de prendre en considération la distribution spatiale de six constituants fondamentaux de la ville (fig.2).

### 3.2. L'indice de végétation (NDVI)

Les cartes d'indice de végétation calculé à partir de la composition spectrale des bandes 2, 3, 4 et 5 montrent la variation saisonnière de cet indice (fig.3). Il ressort que l'NDVI connaît une augmentation en saison de printemps (0.01 – 0.6), plus particulièrement, sur la forêt de Bousekoura (0.6). Par contre en saison d'été on remarque sa diminution sensible sur la zone d'étude suite de la diminution de la couverture végétale pendant la saison d'été (0.09 – 0.5). Cependant la zone urbaine caractérisée par une densité des bâtiments et des zones industrielles enregistre des valeurs d'NDVI relativement faibles par rapport aux zones rurales pendant toutes les saisons (0.09 en été et 0.12 en printemps) (fig.3).

Le calcul de l'indice de végétation est une étape fondamentale dans le calcul de la température de surface. En effet, l'indice de végétation va nous servir à calculer la proportion de végétation (PV) et alors l'émissivité qui diffère selon l'occupation du sol : (zones bâties, végétation, eaux...) et le cycle diurne.



### 3.3. Cartes de température de surface (LST)

#### 3.3.1. Au cours de la journée

La température de surface sur la ville de Casablanca a varié entre (26 - 33 C°) pendant la période d'automne et entre (30 - >37 C°) en période d'été en 2014 (fig.4), avec une distribution spatiale en fonction de l'occupation du sol et la localisation par rapport à l'océan.

En période d'automne la zone près de la côte connaissait encore des températures de surface modérées (26 à 30 C°) par rapport aux zones rurales où la température de surface dépassait parfois les 33 degrés, la forêt de Bousekoura est caractérisée par des températures de surface modérées grâce à la présence des arbres et d'une couverture végétale dense. La différence de la température de surface entre la forêt et les terrains nus est estimée à 4 degrés (**tab.1**).

Cependant, en période d'été une augmentation de la température sur la zone industrielle d'Ain Sbaa et le Port (40°C) a été remarquée, mais cette température reste inférieure à celle enregistrée sur les terrains nus et agricoles où la température de surface dépassait les 40°C (Tab.1). La forêt de Bousekoura a enregistré des températures de surface relativement élevées entre (30 et 35 C°) à cause de la diminution de la couverture végétale en saison d'été par rapport aux autres saisons.

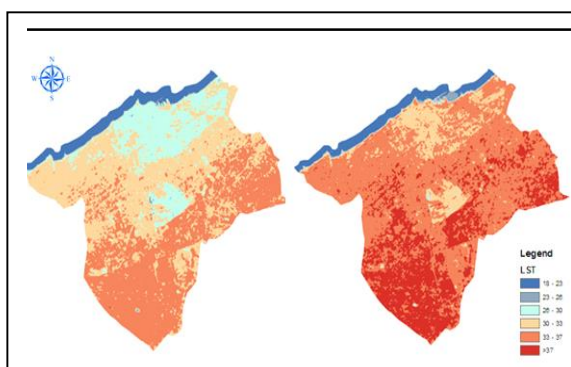


Figure 4 : Température de surface de la ville de Casablanca pendant la journée en saison d'automne le 13 septembre 2014 et d'été le 12 Aout 2014

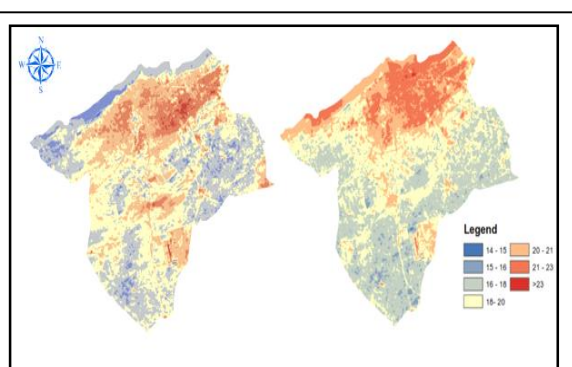


Figure 5 : température de surface sur la ville de Casablanca pendant la nuit en saison d'automne le 05 Septembre 2015 et en saison d'été le 17 juin 2015 à 22 :22.

Ces changements des valeurs de la température de surface sont dus aux fluctuations des situations météorologiques entre les saisons. En effet, les paramètres les plus influençant sur le phénomène d'îlot de chaleur sont :

- la nébulosité qui agit sur l'apport du rayonnement solaire en surface ;
- les précipitations qui agissent sur l'humidité du sol
- la force et la direction du vent qui contribuent à la modération ou à l'accentuation de la température de surface (phénomène de brise) (Cantat, 2004).

Tableau 1 : Températures de surface en (°C) sur différentes zones de la ville de Casablanca

Zone	Septembre 2014	Aout 2014
Zone bâtie (Anfa)	24	27.5
Zone industrielle (Ain Sbaa)	28	32
Forêt (Forêt de Bousekoura)	28	29
Aéroport (Nouaceur)	32	36
Terrain agricole (Errahma)	32	36
Terrain nus (Dar Bouaaza)	32	40

La ville de Casablanca est une ville côtière caractérisée par une forte densité du tissu urbain le long de la côte (**fig. 2**). Un îlot de fraîcheur et le phénomène de brise sont deux caractéristiques diurnes de la ville de Casablanca.

Pendant la journée en saison d'automne et d'été, la ville de Casablanca est caractérisée par la formation d'un îlot de fraîcheur sur la zone près de la côte qui coïncide avec une forte densité des bâtiments et des routes (**fig. 4**). Ce phénomène peut être expliqué par le faible albédo des composantes minérales en milieu urbain et l'apport du phénomène de brise pendant la journée sur la modulation des températures de surface, ces résultats concordent avec ceux obtenus par (Rhinane, Hilali, Bahi & Berrada, 2012). L'influence de la brise de mer diminue en s'éloignant de la zone côtière, et par conséquent la température de surface augmente sur les terrains nus et agricoles. Ainsi, le couvert végétal joue un rôle important dans la diminution de la température de surface en combinant les effets liés à leur ombre et leur pouvoir évaporant. Cas de la forêt de Bousekoura (**fig. 4**).

### 3.3.2. Au cours de la nuit

Inversement aux résultats obtenus pendant la journée en période d'automne et d'été, un îlot de chaleur se forme sur la zone urbaine de Casablanca. Cet îlot de chaleur est accentué sur la zone côtière (20 à 23 °C) caractérisée par une densité des bâtiments et des routes, notamment, sur la zone industrielle d'Ain Sbaa et l'aéroport de Nouaceur. Des températures de surface relativement faibles sont enregistrées sur les terrains nus, comme Dar Bouazza, avec une différence estimée de 3 degrés (**fig. 5**).

En saisons d'automne et d'été les vents sont généralement faibles alors l'influence de la nature du sol sur la température de surface devient plus prépondérante. En effet, la présence d'un ciel clair et un vent faible favorise la stagnation des masses d'air et la formation d'îlot de chaleur au milieu urbain pendant la nuit. Au contraire, la forte nébulosité et la présence des vents soutenus, bloquent la formation de l'ICU et disperse presque complètement la pellicule d'air chaud due aux activités urbaines (Cantat, 2004).

### 3.4. Etude de la relation entre la température de surface et celle de l'air

Les données utilisées pour définir la relation entre la température de surface et la température de l'air sont issues de 8 stations mesurant la qualité de l'air sur la ville de Casablanca. Après traitement des données des températures de l'air des postes de mesure, une extraction de la température de surface de ces zones à partir des images satellites déjà traitées est nécessaire pour définir la relation entre la température de surface et celle température de l'air sur Casablanca. Il ressort que le nuage de points est divisé en deux populations (**fig. 6**). La première représente des températures faibles entre 10 et 25 degrés et qui appartiennent à la saison d'hivers avec une corrélation positive de l'ordre de  $r = 0,7$ . En revanche, la deuxième signale des températures relativement élevées (19 à 35 °c) et qui appartiennent aux saisons, d'automne, de printemps et d'été ( $r = 0.17$ ).

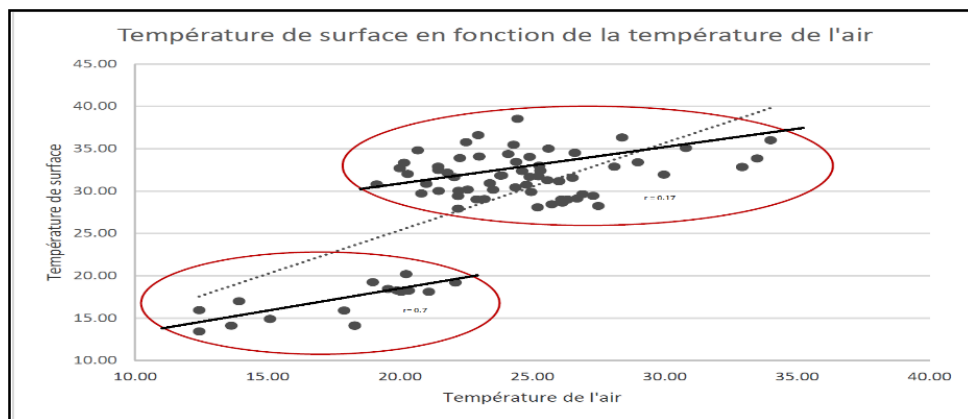


Figure 6 : Corrélation entre la température de surface et celle température de l'air sur Casablanca.

En hiver, la température de surface et la température de l'air sont corrélées, ces deux paramètres sont liés par une relation linéaire :  $LST = 0.48 * T\text{-air} + 8.28$ . où (LST : température de surface, T-air : température de l'air). Cette corrélation satisfaisante pendant la saison d'hiver pourrait être expliquée par le fait que pendant cette saison, le sol se refroidit à cause du faible apport radiatif d'origine solaire, dû principalement à la densité de la couverture nuageuse.

Généralement, la saison d'hiver est la saison la plus nébuleuse et ventée, ces deux caractéristiques éliminent une grande partie de la chaleur sensible liée au tissu urbain comme le soulignait J. Dettwiller « la ventilation intense, durant la saison froide, élimine une grande partie de cette chaleur artificielle, tandis que durant l'été, où les vents restent généralement faibles, l'influence de la nature du sol devient prépondérante » (Dettwiller, 1970).

## Conclusion

Notre zone d'étude est caractérisée par un albédo faible à cause du faible albédo des toits, asphaltes et autres composantes minéraux qui la constituent. Un faible albédo engendre une augmentation de l'absorption des rayons solaires par les surfaces urbaines et par conséquent, ces surfaces se réchaufferont et remettront de la chaleur sous forme de rayons infrarouges pendant la nuit. En effet, l'apparition des îlots de chaleur à la ville de Casablanca pendant la nuit. Tandis que, pendant la journée l'intensité de l'îlot de chaleur est plus accentuée au cours de la saison d'été. Il est important de signaler que la distribution spatiale et temporelle de l'îlot de chaleur varie encore en fonction du type de temps, les paramètres comme la nébulosité agissent sur l'apport radiatif pendant la journée et par conséquent sur l'albédo et l'émissivité en milieu urbain et rural.

## Références bibliographiques

- Aniello C. M., 1995: Urban heat islands using satellite Landsat-TM and GIS, *Geosciences*, **8**, 965-967
- Cantat O., 2004 : L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, **191**, 75-102 p.
- Dettwiller J., 1970 : Evolution séculaire du climat de Paris. Influence de l'urbanisation. *Mémorial Météorologie Nationale*, **52**, 83 p.
- Fedel C., 2010 : Adaptation de la ville à l'augmentation des températures étude en droit de l'urbanisme, 100 p.
- Nejjari C., Machakra-Tahiri T., Tessier J. F., 2016 : La pollution atmosphérique : qu'en est-il au Maroc?, *Pollution Atmosphérique*, **165**, 91- 96.
- Oke T. R., 1978: Boundary layer climates. *Géographie physique et Quaternaire*, **3**, 290–291.
- Rhinane H., Hilali A., Bahi H., Berrada A., 2012: Contribution of Landsat TM Data for the Detection of Urban Heat Islands Areas Case of Casablanca, *Journal of Geographic Information System*, **1**, 7 p.
- Roaf S., Crichton D., Fergus N., 2005: Adapting buildings and cities for climate change, a 21st century survival guide. Elsevier, 363 p.
- Schmid H. P., Cleugh H.A., Grimmond C. S. B., Oke T. R., 1991: Spatial variability of energy fluxes in suburban terrain, *Boundary-Layer Meteorology*, **54**, 249–276.
- Sebbar A., Fougrach H., Hsain M., Saloui A., Badri W., 2011 : Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935 – 2004). *Sécheresse*, **22**, 139-48
- Voogt J.A., Oke T.R., 1997: Complete urban surface temperatures, *Journal of Applied Meteorology*, **36**, 1117-1132.

# VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DE L'OZONE TROPOSPHERIQUE A BIZERTE

Sellami M.<sup>1</sup>, Dahech S.<sup>1</sup>, Charfi S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>: Université de Paris, UMR PRODIG(mounir\_sellami@yahoo.fr) (salem.dahech@gmail.com)

<sup>2</sup>: Université de Sfax, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Laboratoire SYFACTE, (charfisami\_geo@yahoo.fr)

**Résumé**—L'étude de la répartition temporelle des concentrations d'ozone à Bizerte montre un rythme quotidien avec un minimum matinal à 6h  $\approx 63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Une hausse relativement forte des teneurs en ozone (de  $\approx 34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) a été observée jusqu'à 13h parallèlement à l'intensification du rayonnement solaire. Un palier se forme de 13h à 15h avec un maximum de pollution par l'ozone de  $\approx 98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . A l'échelle hebdomadaire, les concentrations d'ozone sont pratiquement similaires durant tous les jours de la semaine avec une légère augmentation le samedi, de l'ordre de  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . L'analyse fréquentielle des concentrations maximales d'ozone montre, à l'échelle journalière, que les dépassements des seuils préconisés par l'OMS ont été enregistrés dans 20% des cas entre 06h et 12h, dans 32% des cas entre 13h et 18h, et 28% des cas entre 19h et 23h. Le maximum absolu instantané a été enregistré à 18h. Les dépassements enregistrés entre minuit et 7h du matin totalisent 20%. La « cloche » dessinée entre 13h et 23h somme 60 % des dépassements et ce avec des vents inférieurs à 4 m/s du secteur N-NW, mais aussi avec des situations de calme. A l'échelle spatiale, des « zones noires » sont identifiées : au nord de la ville, au niveau de la forêt d'Ennadhour et ses environs, à l'entrée Est de Béni Meslem, à Zarzouna au NO de la Société Tunisienne des Industries de Raffinage (STIR) et au niveau du complexe universitaire (à l'entrée sud de Menzel Abderrahmen sur le boulevard du Maghreb Arabe). Au centre-ville de Bizerte, à proximité de l'hôpital de Habib Bougatfa, des pics avoisinant  $175 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ont été enregistrés.

**Mots-clés** : Pollution atmosphérique, ozone, variation spatio-temporelle, Bizerte.

**Summary** — The study of the temporal distribution of ozone concentrations in Bizerte shows a daily rhythm with a morning minimum at 6 am  $\approx 63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . A relatively strong increase in ozone levels ( $\approx 34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) was observed until 1 p.m. in parallel with the intensification of solar radiation. A plateau forms from 1 p.m. to 3 p.m. with a maximum ozone pollution of  $\approx 98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . On a weekly scale, ozone concentrations are almost similar during all days of the week with a slight increase on Saturdays, in the order of  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . The frequency analysis of the maximum ozone concentrations shows, on a daily scale, that the exceedances of the thresholds recommended by the WHO were recorded in 20% of cases between 6 a.m. and 12 p.m., in 32% of cases between 1 p.m. and 6 p.m., and 28% of cases between 7 p.m. and 11 p.m. The instantaneous absolute maximum was recorded at 6 p.m. The overruns recorded between midnight and 7 a.m. total 20%. The “bell” drawn between 1 pm and 11 pm sum 60% of the overruns and this with winds less than 4 m / s from the N-NW sector, but also with calm situations. At the spatial scale, “black zones” are identified: to the north of the city, at the level of the Ennadhour forest and its surroundings, at the eastern entrance to Béni Meslem, in Zarzouna to the NW of the Tunisian Society of Refining Industries (STIR) and at the level of the university complex (at the south entrance of Menzel Abderrahmen on the boulevard du Maghreb Arabe). In downtown Bizerte, near the Habib Bougatfa hospital, peaks of around  $175 \mu\text{g}/\text{m}^3$  were recorded.

**Keywords**: Air pollution, ozone, spatio-temporal variation, Bizerte.

## Introduction

L'ozone troposphérique, un polluant secondaire et un gaz à effet de serre résultant d'un ensemble de réactions photochimiques, connaît une variabilité dans le temps et dans l'espace, et ceci à différentes échelles, rythmée, entre autres, par la situation météorologique et les caractéristiques topographiques (Martin, 2009). Les activités et comportements anthropiques couplées avec les conditions météorologiques et topographiques ont contribué largement à la détérioration de la qualité de l'air et la santé humaine (OMS, 2018).

En Méditerranée, les situations radiatives favorables à l'activité photochimique sont fréquentes. En Tunisie, l'agglomération de Bizerte, ville moyenne au nord de la Tunisie (environ 350 000 habitants, INS, 2014), est l'un des plus importants pôles industriels du pays. Elle se distingue par une activité industrielle relativement diversifiée, installée à proximité des zones urbaines. Cette proximité de l'industrie émettrice des polluants primaires crée un environnement propice à la formation de l'ozone troposphérique. La qualité de l'air est contrôlée par la station de l'Agence Nationale de la Protection de l'Environnement, implantée en plein centre-ville, dans le domaine de la mairie (station urbaine). Ses données restent très ponctuelles dans l'espace.



Le présent travail vise à mettre en évidence la variation spatiotemporelle des concentrations d'ozone troposphérique dans l'agglomération de Bizerte et ses environs pendant l'été. De plus, nous visons à mettre en évidence les situations propices aux fortes concentrations d'ozone.

## 1. Zone d'étude :

Située au nord tunisien, l'agglomération de Bizerte s'étend de Menzel Jemil au sud, à la Corniche au nord et appartient au gouvernorat portant le même nom. Elle se caractérise par une étendue spatiale, un contraste topographique et un tissu urbain diversifié (fig.1). Ces conditions agissent fortement sur l'écoulement des brises thermiques et la répartition spatiale des polluants.

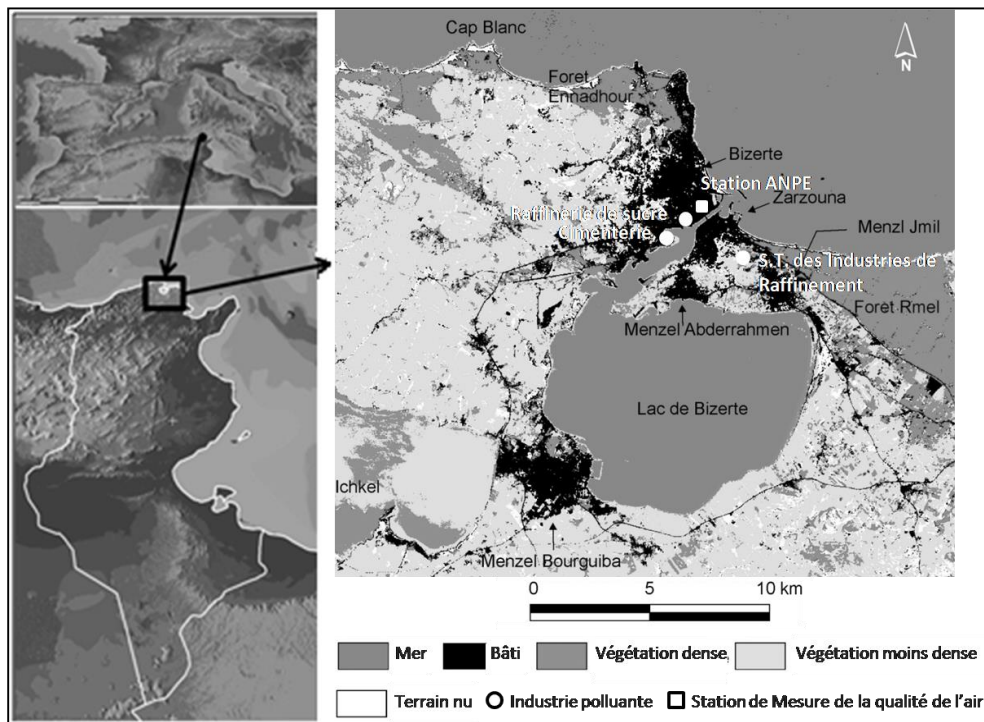


Figure 1. Localisation de l'emprise urbaine dans l'agglomération de Bizerte (Dahech et Charfi, 2018)

La partie densément bâtie occupe la partie centrale de la ville et une frange littorale, étroite par endroit. La partie la plus peuplée correspond à la délégation de Bizerte Nord qui compte environ 87 307 habitants, soit une densité de l'ordre de 1 600 habitants/km<sup>2</sup> (INS, 2014).

Bizerte bénéficie d'un climat méditerranéen à nuance sub-humide. L'aérodynamique locale est très influencée, notamment en été, par les facteurs géographiques locaux : effets de la mer, du lac et de la topographie. Les contrastes thermiques terre-mer donnent naissance à la brise de mer et la brise de terre. Cette dernière est doublée par la brise de montagne qui s'écoule sur les versants de djebel Ennadhour. La périphérie rurale, plus végétalisée, est plus fraîche la nuit que le centre de Bizerte, par temps radiatifs (Dahech et Charfi., 2018).

L'activité industrielle (la plus polluante) est concentrée principalement à Bizerte Nord et à Zarzouna (fig.1).

## 2. Données et méthodes

### 2.1. Données

- Les données de la qualité de l'air : Il s'agit des enregistrements horaires d'ozone (O<sub>3</sub>), recueillies par la station fixe de l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement (ANPE). Malheureusement les données des polluants primaires ne sont pas disponibles.

A cause de l'aspect lacunaire des données, sur la période 2010-2015, nous n'avons retenu que les données de la concentration horaire de l'ozone troposphérique de 2011 (8760 enregistrements pour toute l'année et 4392 pour la saison photochimique). Les données de 2011 couvrent  $\approx 100\%$  des exigences prescrites dans la Directive 2008/50/CE (75% des valeurs au moins). Les données sélectionnées ont été associées aux paramètres météorologiques (température, humidité, vitesse et direction du vent, pression atmosphérique issues de la station de l'Institut National Météorologique implantée à l'aérodrome de Sidi Ahmed à 10 km de la mer).

- Mesures semi-itinérantes d'ozone : Afin d'augmenter la résolution spatiale des données et de mettre en exergue la variabilité spatiale des concentrations d'ozone, nous avons recouru à des mesures mobiles par un capteur Aéroqual500 effectuées du 22 au 30 juillet 2020 et du 05 au 16 août 2020 et ce sur trois périodes de la journée : le matin de 06h à 07h, l'après-midi de 16h à 18h et le soir de 00h à 01h. L'idée est de cerner l'impact des différentes brises, très actives dans la zone d'étude. Il s'agit des brises de mer et brise de terre, de la brise d'amont (venant des hauteurs d'Ennadhour) et du lac (Dahech et Charfi, 2018). Au total, les mesures sont effectuées dans 65 sites ; ce qui fait 1290 mesures réalisées au total. Chaque point de mesure a bénéficié d'au moins 6-7 itérations par période de la journée.

- Données météorologiques : Les paramètres météorologiques sont la température, l'humidité, la direction et la vitesse du vent. Elles sont enregistrées par la station météorologique de l'Institut National Météorologique (INM) installée à l'aérodrome de Sidi Ahmed et par une station automatique DAVIS que nous avons installé au centre-ville de Bizerte pour fournir des données à un pas de temps de 30 minutes.

Nous avons enrichi la base de données avec les paramètres topographiques (l'élévation, l'exposition) et le nombre de véhicules.

La procédure de prétraitement consiste essentiellement à un contrôle de la qualité des données, ainsi que des traitements de synchronisation avec des données météorologiques.

## **2.2. Méthodes**

L'approche retenue est purement empirique. Elle est fondée sur plusieurs types d'analyses :

- Analyse descriptive des concentrations d'O<sub>3</sub>.
- Une étude fréquentielle des nombres de dépassement d'un seuil préconisé par l'Organisation Mondiale de la Santé (fixé à 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ / 8 heures).
- Analyse bivariée des concentrations d'O<sub>3</sub> en fonction des paramètres météorologiques (surtout la vitesse et la direction des vents) afin de trouver des éléments de réponses expliquant les pics d'ozone et le temps y associé. De plus, nous avons essayé de trouver des corrélations avec d'autres facteurs: l'élévation et l'exposition, et le trafic routier.

Vu l'aspect non continu des mesures semi-itinérantes, les valeurs limites prises en considération sont « Seuil d'information et de recommandations » (180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , en moyenne horaire) (Roussel, 2015).

## **3. Résultats**

### **3.1. Variabilité temporelle de l'ozone troposphérique**

#### *3.1.1. Régime des concentrations moyennes d'ozone pendant la saison photochimique*

L'analyse des variations diurnes des concentrations moyennes d'ozone au cours de la saison photochimique (mois d'avril à septembre) montre un rythme quotidien en phase avec l'intensité du rayonnement solaire (fig.2). En effet, après un minimum matinal à 6h  $\approx 63\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,

une hausse relativement forte de  $\approx 34 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a été observée jusqu'à 13h parallèlement à l'intensification des rayonnements.

La croissance s'amenuise formant un palier de 13h à 15h avec un maximum de pollution par l'ozone de  $\approx 98 \mu\text{g}/\text{m}^3$  où « l'intensité des deux processus de production et de destruction sont comparables » (Martin, 2008). Entre 16h et 19h, une baisse ponctuelle des taux d'ozone est constatée et peut être attribuée à sa destruction sur place, parallèlement à une remontée des concentrations en  $\text{NO}_x/\text{h}$  suite à un trafic routier intense : le processus de destruction d'ozone s'accélère.

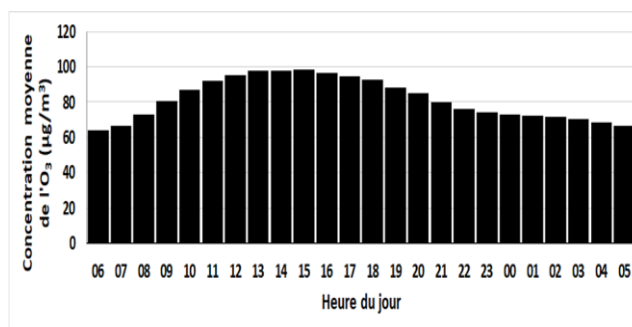


Figure 2. Régime diurne d'ozone pendant la saison photochimique 2011, Données ANPE

A 00h, un palier s'amorce et se poursuit jusqu'à 3h du matin suivi d'une nouvelle baisse, qui se termine le lendemain vers 6h quand le cycle recommence.

A l'échelle hebdomadaire, une légère augmentation est observée le samedi. Cet effet « week-end » (WE) résulte de la baisse des émissions anthropiques destructrices en fin de semaine. Cependant, nous avons enregistré des taux d'ozone plus hauts le mercredi, ce qui pourrait paraître contradictoire avec l'intensification du trafic. Ceci peut être expliqué par d'autres sources d'émissions de  $\text{NO}_x$  et des COV que la circulation automobile comme l'activité industrielle. D'importantes émissions de  $\text{NO}_x$  et des COV peuvent avoir lieu, entre autres, durant le raffinage, le stockage, le traitement et la distribution de produits pétroliers (fig. 3 et 4). Donc, les émissions industrielles issues principalement de l'usine de STIR et la cimenterie de Bizerte peuvent être des précurseurs d' $\text{O}_3$ .



Figure 3. Les Ciments de Bizerte. Le vent souffle du secteur ESE. Cliché pris le 14/08/2020 à 16h45



Figure 4. Société Tunisienne des industries du Raffinage (STIR). Cliché STIR

### 3.1.2. Variations des concentrations maximales d'ozone

En dehors du cycle moyen, l'analyse des données horaires d' $\text{O}_3$  montrent une forte variabilité intra-journalière. Le maxima est enregistré entre 15h et 20h pendant la saison photochimique et la valeur horaire la plus basse à 22h.

A l'échelle hebdomadaire, la courbe de répartition des maxima de concentrations d'ozone selon les jours de la semaine ne présente pas une spécificité particulière. La même courbe en

cloche entre 13h et 22h existe, à l'exception d'un maxima à 19h, atteignant  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , et ce durant les trois derniers jours de la semaine (vendredi, samedi et dimanche).

Les mesures réalisées par Dahech et Charfi (fig.5) ont montré que « la circulation de la brise de mer est influencée par le lac, le relief et la ville. A l'aéroport, elle se lève du lac vers 9 h (en été), avec une vitesse de 3 m/s. La brise de mer y est relevée entre midi et 13 h (7 m/s vers 15 h), alors qu'elle est plus précoce au bord de la mer (vers 8-9 h) où alternent brise de mer, brise de terre et brise d'amont ».

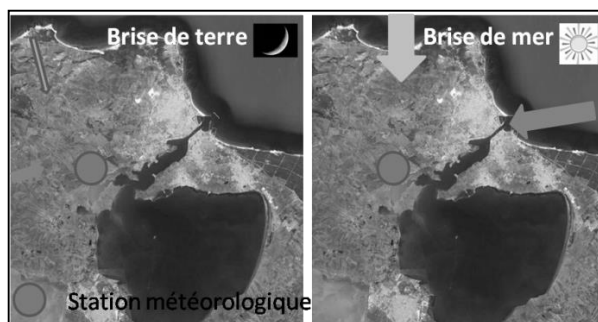


Figure 5. Brise de mer et brise de terre à Bizerte (Dahech et Charfi, 2018)

Les directions de vent associées aux maximales plus importantes sont ceux de la composante NW (91% des cas, contre 9% des cas enregistrés avec des vents du secteur ENE en fin de l'après-midi) de faible vitesse et par situations de calme en début de soirée quand la brise de montagne achemine les fortes concentrations sauvegardées en zone végétalisée (Jbel Ennadhour) vers le centre-ville et la mer.

### 3.2. Variabilité spatiale de l'ozone troposphérique

Par temps radiatif d'été, les mesures itinérantes ont révélé plusieurs zones où des valeurs d'ozone relativement élevées sont fréquentes (fig. 6).

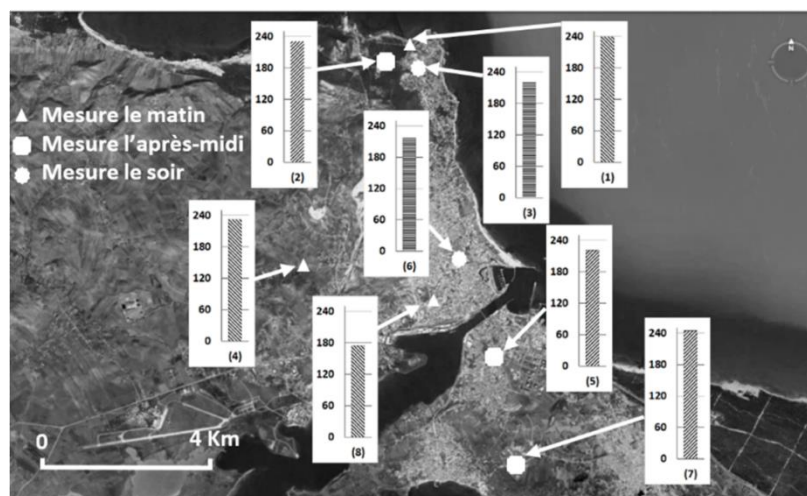


Figure 6. Les points noirs avec les valeurs des concentrations maximales d'ozone troposphérique enregistrées par période de la journée

A Bizerte, des « zones noires » sont identifiées : au nord, au niveau de la forêt d'Ennadhour (Sites 1,2,3), à l'entrée Est de Béni Meslem (Site 4), à Zarzouna au NO de la Société Tunisienne des Industries de Raffinage (STIR, Site 5), à la cité Belvédère (Site 6) et au niveau du complexe universitaire (à Menzel Abderrahmen, Site 7), qui même avec la moyenne des valeurs enregistrées les après-midi touche au seuil d'information ( $179 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Le site qui se trouve entre le siège de la Protection civile, l'hôpital de Habib Bougatfaet l'hôpital militaire de Bizerte (Site 8) a enregistré des pics avoisinant les  $175 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en période matinale et en fin de l'après-midi. Ceci est attribué au fait qu'en période matinale et par vent venant du secteur NW de faible vitesse, la brise d'amont (forêt d'Ennadhour) achemine les fortes concentrations conservées dans les zones végétalisées vers le centre-ville et ce en alternance avec la brise de mer (qui ramène l'ozone acheminé vers le large en période

nocturne). En fin d'après-midi, la brise de mer est très active et contribue au transport de l'ozone formé en milieu urbain en présence des polluants primaires vers la forêt d'Ennadhour où des pics sont observés entre 18h et 20h en absence d'agent destructeur.

Outre la circulation routière (responsable de la destruction de l'ozone) et l'environnement topographique du site qui soit fait véhiculer le polluant, soit le bloque et contribue ainsi à son entassement et engendre les fortes concentrations), les brises à Bizerte (Terre, mer, amont et de lac) agissent fortement pour définir le niveau de concentration de ce polluant.

### **Conclusion**

Pendant la saison photochimique, la variabilité temporelle de l'ozone à l'échelle journalière prend une allure assez classique avec un maximum de concentration l'après-midi à cause de la forte insolation et l'intensification de la turbulence atmosphérique, et un minimum en fin de nuit avec la forte stabilité atmosphérique (favorables aux inversions thermiques) et l'amincissement de la couche limite atmosphérique. Outre les facteurs météorologiques et l'environnement topographique du site de mesure, le trafic routier intervient, à travers le NOx pour détruire la molécule O<sub>3</sub> et diminuer ainsi sa concentration dans l'air. L'analyse du nombre de dépassement des seuils de pollution à l'échelle journalière montre que les concentrations d'ozone deviennent parfois critiques par alternance de brises de mer et de terre surtout que l'atmosphère, plus stable au bord de la mer favorise ces fortes concentrations (Chang et *al.*, 2004 ; Martin, 2008). Les « zones noirs » identifiées demandent une attention particulière surtout que certaines d'entre-elles se trouvent dans des endroits pratiqués pour le bien-être qu'elles offrent (Forêt, bord de la mer, voisinage de l'hôpital).

### **Bibliographie**

- Chang W., Heikes B.G., Lee M., 2004, Ozone deposition to the sea surface: chemical enhancement and windspeed dependence. *Atmospheric Environment*, **38**, 1053-1059.
- Dahech, S., 2015, La pollution par l'ozone à Sfax : variabilité temporelle et temps associés aux fortes concentrations, 28<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège 2015
- Dahech S., Charfi S., 2018, Aspects topoclimatiques de Bizerte (NE de la Tunisie) : ilot de chaleur et brises thermiques, Les impronptus du LPED : Variabilité, changement climatique et conséquences en Méditerranée, **161**, 138-159
- Euchi H., Dahech S., 2019, Temps, pollution aux particules fines (PM10) et morbidité respiratoire à Sfax (Tunisie), *Pollution atmosphérique* [En ligne], **239**
- INNORPI, 1994 : Protection de l'environnement - valeurs limites et valeurs guides pour certains polluants dans l'air ambiant, en dehors des locaux de travail [En ligne]
- Institut National de la Statistique (INS, Tunisie), Indicateurs statistiques issus du recensement général de la population et de l'habitat, 2014
- Martin N., 2008, *La pollution par l'ozone et la climatologie dans un espace méditerranéen : Les Alpes-Maritimes*, Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 281p.
- Martin N., Yohia C., *Impact des conditions météorologiques locales sur la variabilité spatiale de l'ozone à échelle fine à Nice*. 22<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Sep 2009
- Roussell., 2015, Les épisodes d'ozone en région PACA, le prix sanitaire du soleil, *Pollution atmosphérique* - numéro spécial, 8-19
- Organisation Mondiale de la Santé, Qualité de l'air ambiant et santé, mai 2018, Web ([https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health))

# CARACTERISATION DES TEMPERATURES DIURNES ET NOCTURNES EXTREMES DANS LE SUD FORESTIER IVOIRIEN ENTRE 1961 ET 2014

Sohou S.O. (1), N'da K. C.(1) et Dibi Kangah A. P. (1)

(1) Institut de Géographie tropicale (IGT), Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire ; E-mail : sohousergeolivier@gmail.com, christndak@yahoo.com, line237@yahoo.com

## Résumé :

Depuis ces trois dernières décennies, la Côte d'Ivoire en général et en particulier le sud forestier, est confronté à des phénomènes de réchauffement climatique extrême. Ces faits climatiques entraîneraient des changements dans la dynamique des températures nocturnes et diurnes. L'objectif de cet article est de caractériser l'évolution de la tendance des températures nocturnes (nuits froides (TN10p) et nuits chaudes (TN90p)) et des températures diurnes (jours froids (TX10p) et jours chauds (TX90p)), à partir de générateur des indices extrêmes (RClimDex 1.0). La méthode est basée sur l'étude des indices climatiques extrêmes (ETCCDMI), recommandés par l'OMM. Les stations synoptiques d'Adiaké, Bondoukou et de Dimbokro sont celles qui ont été étudiées pour la période 1961-2014. Les données employées sont issues de la Direction de la Météorologie Nationale de la SODEXAM. Les résultats obtenus révèlent une augmentation significative des indices (TN90p) et (TX90p) dès 1990, et une baisse des TN10p et TX10p dans les stations. Aussi, deux grandes phases sont observées : la période 1961-1989 (fraîche) et 1990-2014 (chaude).

**Mots clés :** sud forestier ivoirien, températures extrêmes

## Summary :

For the past three decades, the Ivory Coast in general, and in particular the forested south, has been confronted with phenomena of extreme global warming. These climatic facts would lead to changes in the dynamics of night and day temperatures. The objective of this article is to characterize the evolution of the trend of nighttime temperatures (cold nights (TN10p) and hot nights (TN90p)) and daytime temperatures (cold days (TX10p) and hot days (TX90p)), to from generator of extreme indices (RClimDex 1.0). The method is based on the study of extreme climate indices (ETCCDMI), recommended by the WMO. The synoptic stations of Adiaké, Bondoukou and Dimbokro are those studied for the period 1961-2014. The data used come from the National Meteorology Department of SODEXAM. The results obtained reveal a significant increase in the indices (TN90p) and (TX90p) from 1990, and a decrease in TN10p and TX10p in the stations. Also, two major phases are observed: the period 1961-1989 (cool) and 1990-2014 (hot).

**Keywords :** ivoirian forest south, extremes temperatures

## Introduction

Le rapport du GIEC fait état d'un réchauffement climatique global sans équivoque, déterminé par une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan (GIEC, 2014). Les constats de ce réchauffement sont visibles sur les écosystèmes et agrosystèmes du monde. Ils engendrent des conséquences aux échelles locales surtout en termes d'impacts économiques (N'Da, 2016 et Sohou *et al.*, 2020). Une évaluation de ce phénomène, à des échelles plus fines s'avère nécessaire afin de mettre en place une stratégie d'adaptation et d'atténuation appropriée (Doukpolo, 2014). L'objectif de cette étude est de caractériser l'évolution de la tendance des températures nocturnes (TN) et des températures diurnes (TX) à partir de générateur des indices extrêmes.

## 1. Données et méthodes

Le sud forestier ivoirien est situé entre 2°30 et 8°30 de longitude ouest et 4°30 et 9°00 de latitude nord (Brou, 2005 et Sohou *et al.*, 2020). C'est une région caractérisée par un climat de type subéquatorial sur le littoral (Adiaké) et équatorial de transition atténué au Centre-Est (Dimbokro) et Nord-Est (Bondoukou). Les températures moyennes décroissent sensiblement d'Adiaké (26,4°C) vers Bondoukou (26,2°C) et Dimbokro (27,5°C). Toute l'année, les températures moyennes saisonnières restent élevées, exceptés en juillet et août où elles sont au plus bas niveau (21,2°C) (Noufé, 2011 et Sohou *et al.*, 2020).

Les données de températures analysées, sont au pas de temps journalier et vont du 01 janvier 1961 au 31 décembre 2014. Elles ont été fournies par la SODEXAM de Côte d'Ivoire. Ce sont

essentiellement des données de températures minimales et des températures maximales, desquelles ont été générés les indices des températures diurnes et nocturnes.

Après l'analyse des données de cinq stations synoptiques au départ, seulement trois ont été retenues. Ces trois (Adiaké, Bondoukou et Dimbokro) sont celles qui ont enregistré des températures diurnes et nocturnes extrêmes sur la période 1961-2014 (fig. 1).

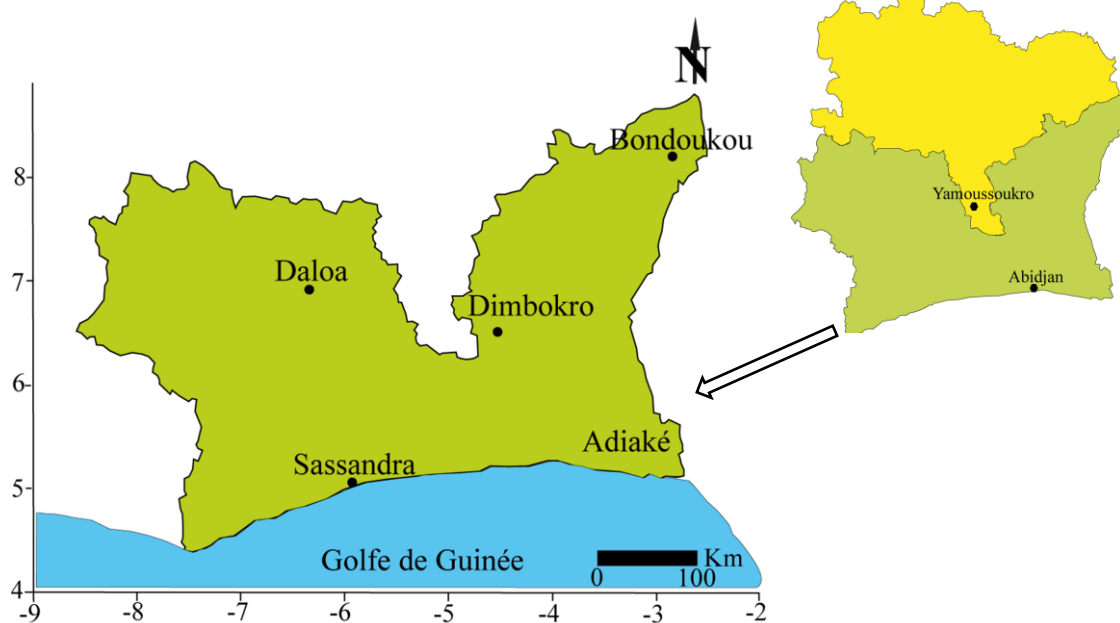


Figure 1 : Localisation des stations synoptiques dans le sud forestier ivoirien.

La méthode des Théories des Valeurs Extrêmes (TVE) a été employée pour étudier les valeurs thermométriques extrêmes. Cette méthode déjà intégrée à RClimDex 1.0 (Zhang *et al.*, 2004 et Sohoun *et al.*, 2020), a favorisé les analyses de ces extrêmes thermiques. Parmi les indices thermométriques générés, notre choix est porté sur les indices TN10p, TN90p, TX10p et TX90p.

La détermination de ces indices par la TVE, est basée sur la valeur du 10<sup>e</sup> percentile des minimales des températures minimales (TN10p) pour les nuits extrêmement froides et des minimales des températures maximales (TX10p) pour les jours extrêmement froids. Sur la valeur du 90<sup>e</sup> percentile des maximales des températures minimales (TN90p) pour les nuits extrêmement chaudes et des maximales des températures maximales (TX90p), pour les jours extrêmement chauds.

### 3. Résultats

#### 3.1. Indices des températures nocturnes

##### 3.1.1. Indices des nuits extrêmement froides (TN10p)

Les nuits extrêmement froides sont en baisse dans les différentes stations synoptiques (fig. 2). La moyenne annuelle de cette baisse est de 17 %, avec une amplitude moyenne de 13 %.

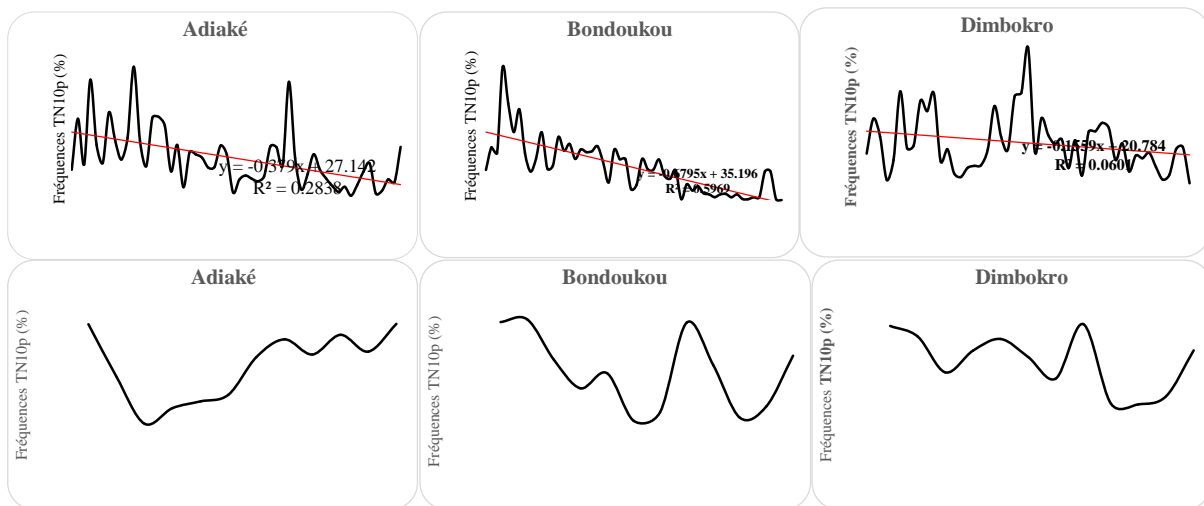


Figure 2 : Evolution du nombre de nuits froides à Adiaké, Bondoukou et Dimbokro entre 1961 et 2014 (en haut) et répartition moyenne mensuelle (en bas).

Deux tendances se dégagent spécifiquement à Adiaké et Bondoukou. En effet, de 1961 à 1994, les TN10p sont plus importantes avec une moyenne de 22 %. Et de 1995 à 2014, cet indice baisse d'une moyenne de 8 % par an. A Dimbokro, on note une fluctuation des TN10p durant toute la période d'étude, avec un pic en 1990. Cette différence à Dimbokro est causée par sa proximité avec le climat tropical de transition du Centre ivoirien. La moyenne saisonnière est de 17 % par mois avec une amplitude de 10 %. Les mois les plus marqués par cet indice sont janvier, août, septembre, octobre et novembre et les moins affectés sont mars, avril, mai et juin.

### 3.1.2. Indices des nuits extrêmement chaudes (TN90p)

Les moyennes annuelles des nuits extrêmement chaudes sont identiques partout. Elles sont de 16 % nuits, avec une amplitude moyenne de 9% sur toute la période (fig. 3).

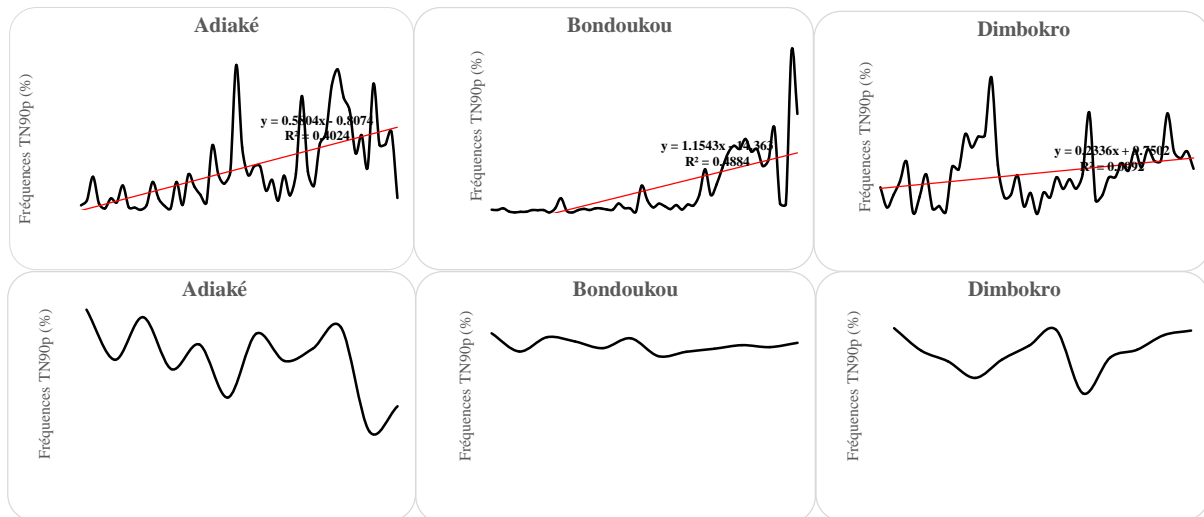


Figure 3 : Evolution des nuits chaudes à Adiaké, Bondoukou et Dimbokro entre 1961 et 2014 (en haut) et répartition moyenne mensuelle (en bas).

Les faibles indices des TN90p sont observés au début de 1961 jusqu'aux années 1980 à Adiaké et Bondoukou, avec une variation comprise entre 4 et 8 %. A partir de 1980, les TN90p augmentent avec une variation comprise entre 21 et 45 %. Une évolution spécifique est remarquée à Dimbokro. Elle est caractérisée par une forte variabilité des TN90p dont le pic est



enregistré en 1983 avec 51 % et 49 % en 1998 et 2010. L'évolution saisonnière des TN90p est identique à celle des TN10p.

### 3.2. Indices des températures diurnes

#### 3.2.1. Indices des jours extrêmement froids (TX10p)

Dans les trois localités, la tendance générale est à la baisse et la moyenne annuelle des jours extrêmement froids est de 17 %, avec une amplitude moyenne de 9 % (fig. 4).

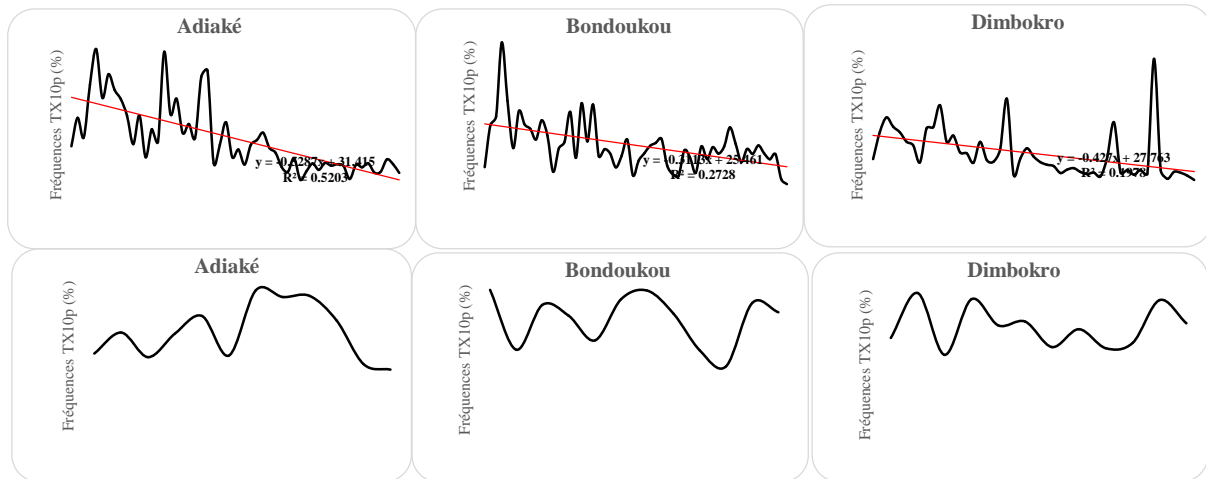


Figure 4 : Evolution des jours froids à Adiaké, Bondoukou et Dimbokro entre 1961 et 2014 (en haut) et répartition moyenne mensuelle (en bas).

Adiaké et Bondoukou ont enregistré deux périodes dans la dynamique des TX10p. Ce sont 1961-1990 et 1991-2014. Sur la première, les TX10p ont une moyenne de 24 % par an. A partir de 1990, cette tendance baisse. A Dimbokro, une forte dégradation des jours froids est notée par rapport aux autres stations, exceptée l'année 2009 où un record de 70 % est enregistré. La moyenne saisonnière est de 17 %. Les mois dont les valeurs sont au-dessus de la moyenne, diffèrent selon les stations. On a, à Adiaké, les mois de janvier, août et septembre, à Bondoukou les mois de janvier et juillet. Enfin les mois de février, avril et novembre à Dimbokro.

#### 3.2.2. Indices des jours extrêmement chauds (TX90p)

Des moyennes annuelles et saisonnières d'une valeur de 17 % des jours extrêmement chauds sont enregistrées dans les trois stations du sud forestier ivoirien (fig. 5).

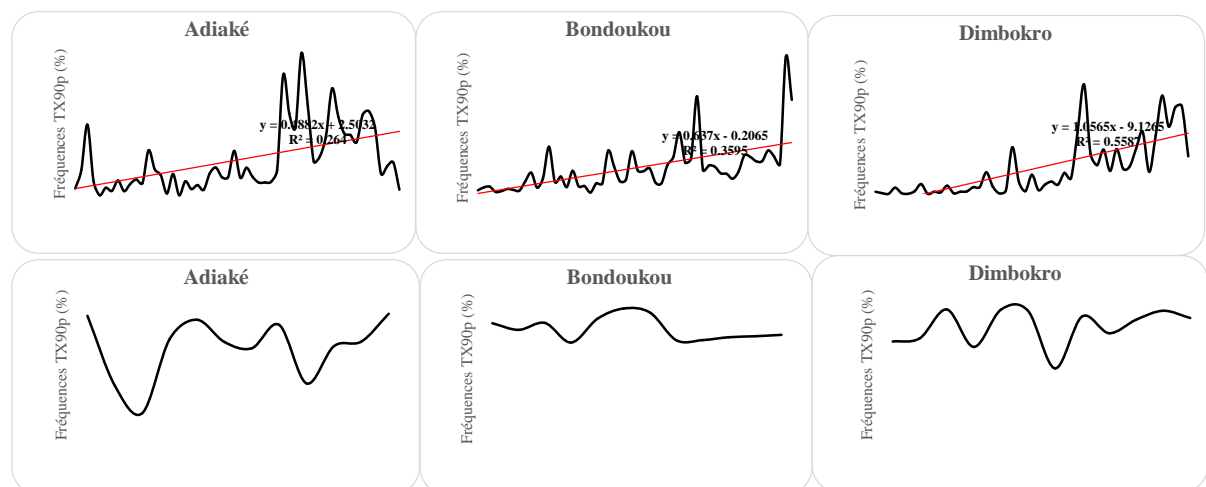


Figure 5 : Evolution des jours chauds à Adiaké, Bondoukou et Dimbokro entre 1961 et 2014 (en haut) et répartition moyenne mensuelle (en bas).

De 1961 à 1994, l'indice TX90p est très faible avec 8 % de jours chauds par an dans toute la région. De 1994 à 2014, on note un accroissement du nombre de jours chauds qui varie entre 3 et 30 %. De façon générale, l'augmentation des jours chauds a débuté à partir des années 1990. La moyenne mensuelle est de 17 % de jours chauds et d'une amplitude de 1 % pendant toute la période d'étude. L'évolution saisonnière des TX90p est semblable à celle des TX10p.

## Discussion et Conclusion

La caractérisation des températures nocturnes et diurnes met en évidence deux aspects dans l'évolution de ces indices. Pendant que les températures des nuits froides (TN10P) et des jours froids (TX10p) baissent, celles des nuits chaudes (TN90p) et des jours chauds (TX90p) croissent. Aussi, la croissance de ces indicateurs dans la région a été accentuée depuis la fin des années 1990. Cette dynamique opposée, expose les populations à l'inconfort thermique et rend vulnérable le développement des cultures exploitées dans ces régions de la Côte d'Ivoire.

Cette évolution de la chaleur a été déjà prouvée par le GIEC (2014) au plan mondial. Particulièrement, en Côte d'Ivoire des résultats semblables ont été obtenus par N'Da (2016) et Sohou *et al.* (2020). Dans leurs analyses, ces auteurs ont relevé le réchauffement caractérisé par la croissance des températures moyennes et des indices des minimales des températures minimales et des maximales des températures maximales dans cette même région. Contrairement aux résultats de cette étude, ceux de Coulibaly (2012) en Mauritanie montrent que la hausse des températures minimales est plus prononcée que les maximales. Cette différenciation des résultats se justifie par le fait que la Côte d'Ivoire soit dans la zone équatoriale et la Mauritanie dans la zone sahélienne.

## Bibliographie

- Brou Y.T., 2005 : *Climat, mutation socio-économique et paysages en Côte d'Ivoire*, Mémoire de synthèse des activités scientifiques présenté en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches, université des sciences et techniques de Lille, France, 226p.
- Coulibaly H., 2012 : *Adaptation de l'Agriculture Pluviale au Changement Climatique dans le Triangle de la Pauvreté en Mauritanie : Cas de la Commune Rurale de Diadjibiné*, centreregional AGRHYMET, Mastère, Niamey, Niger, 90p.
- Dibi Kangah A.P. et Sohou S.O., 2016 : Impacts de la variabilité pluviométrique sur la banane plantain dans les régions Ouest et Sud-Ouest ivoiriennes. *Revue Anyasa*, 6, 37-50.
- Doukpolo B., 2014 : *Changements climatiques et productions agricoles dans l'Ouest de la République Centrafricaine*. Earth Sciences. Université de Abomey-Calavi, Docteur en Géographie et Géosciences de l'Environnement (Agroclimatologie et Développement), 338p.
- GIEC, 2014 : *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse*. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161p.
- N'Da K.C., 2016 : *Variabilité hydroclimatique et mutations agricoles dans un système anthropisé : L'exemple du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire*. Thèse de Doctorat unique, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, 273p.
- Noufé D., 2011 : *Changements hydroclimatiques et transformations de l'agriculture : l'exemple des paysanneries de l'Est de la Côte d'Ivoire*, Thèse soutenue à l'Université de Paris 1, France, 375p.
- Sohou S.O., N'Da K.C. et Dibi Kangah A.P., 2020 : Le réchauffement climatique à travers les indices de températures extrêmes dans le sud forestier ivoirien entre 1961 et 2014. *Regardsuds*, 1, 61-75.
- Zhang X., et Yang F., 2004 : *RClimDex1.0, User Manual. Climate Research Branch Environment, Downsview, Ontario, Canada*, 23p.

# EVALUATION DE NOUVEAUX INDICATEURS CLIMATIQUES POUR LE SECTEUR ÉOLIEN EN FRANCE

Soubeyroux J.-M. (1), Capot J. (2), Tocquer F. (1), Parrant M.(3), Bresteaux, M(3), Nurel, R(3), Guerin, N (2)

(1)*Météo-France, Direction de la Climatologie et des Services Climatiques, Toulouse, France, jean-michel.soubeyroux@meteo.fr*

(2)*Météo-France, Direction des Services Météorologiques, France*

(3)*Météo-France, École Nationale de la Météorologie, Toulouse, France*

**Résumé :** Le développement de l'énergie éolienne nécessite de disposer d'indicateurs climatiques adaptés pour le climat passé et les projections climatiques, s'appuyant sur des données de vent extrapolées à 100 m. En France, jusqu'à ces dernières années, les données climatiques disponibles pour le secteur de l'éolien ne concernaient que des données locales ou des réanalyses globales. Plus récemment, un rejeu du modèle AROME a été réalisé pour produire un atlas éolien à 2,5 km, couvrant la période 2000-2019. Des travaux ont été engagés en 2020 pour étendre ces analyses à la réanalyse SAFRAN disponible à la résolution 8 km sur la France depuis 1958, ainsi qu'aux projections climatiques du jeu DRIAS-2020. Après avoir évalué la qualité du vent à 10 m de SAFRAN en le comparant aux observations et au rejeu AROME, une reconstruction d'un vent à 100 m a été réalisée à partir de différentes méthodes puis une analyse a été menée sur l'évolution du potentiel éolien en France entre 1958 et 2019. L'étude a aussi exploré l'évolution du potentiel éolien en climat futur à partir d'indicateurs climatiques basés sur les simulations du jeu DRIAS-2020 selon le scénario d'émission RCP8.5.

**Mots-clés :** *énergie éolienne, indicateur climatique, Drias, changement climatique*

**Abstract: Assessment of new climate indices for wind sector in France:** The development of wind energy requires climate indicators adapted to historical references and climate projections, especially with wind data extrapolated at 100m. In France, until the last few years, the climate data available for the wind energy sector only concerned local data or global reanalyses. More recently, a replay of the AROME model was carried out to produce a 2.5 km wind atlas over France, covering the period 2000-2019. Work was initiated in 2020 to extend these analyses to the SAFRAN reanalysis available at 8-km resolution over France since 1958, as well as climate projections from the DRIAS-2020 dataset. After assessing the quality of the SAFRAN 10 m wind by comparing it with observations and the AROME replay, a reconstruction of a 100 m wind was performed using different methods, then an analysis was carried out on change in wind potential in France between 1958 and 2019. The study also explored the evolution of wind in future climate using climate indicators based on RCP8.5 simulations of the DRIAS-2020 dataset.

**Keywords:** *wind energy, climate indices, DRIAS, climate change*

## 1. Introduction

Le développement des moyens de production d'énergie éolienne dans le cadre de la lutte contre le changement climatique nécessite de disposer d'informations précises sur son potentiel et ses évolutions climatiques passées et futures. En France, cette information s'est appuyée d'abord sur les observations de vent des réseaux météorologiques mais elles ont rapidement montré leurs limites du fait de leur faible densité sur le territoire (environ 600 stations disposant de plus de 25 ans de données dans la base climatologique de Météo-France) et du besoin pour le secteur éolien de connaissance du vent à la hauteur de 100 m représentative de la taille moyenne des rotors. Ainsi, la construction d'un atlas éolien à haute résolution spatiale pour l'ADEME<sup>24</sup> s'est appuyée sur le rejeu du modèle météorologique AROME (Pouponneau et *al*, 2017) à 2,5 km sur le territoire, disposant de données de vent à 10 m et à 100 m, disponible sur la période 2000-2015.

L'effet potentiel du changement climatique sur la force du vent en France est devenu préoccupant pour les industriels après la mise en évidence au cours des 10 dernières années d'une baisse du vent moyen sensible dans plusieurs régions en France et en Europe (Vautard et *al*, 2010). Le lien potentiel de cette baisse avec le changement climatique justifie le développement de services climatiques en Europe dédiés au secteur de l'éolien, notamment l'application Energy du C3S avec des indicateurs allant du passé récent jusqu'à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (<https://climate.copernicus.eu/operational-service-energy-sector>). Cependant les résolutions des jeux de données utilisés restent relativement basses et le recul historique limité

---

24 ADEME : Agence de la Transition Ecologique

(années 1980).

Une étude menée en 2020 à Météo-France a visé à évaluer l'apport de la réanalyse SAFRAN au pas de temps quotidien et à la résolution 8 km depuis 1958 largement utilisée pour les études climatiques en France (Vidal et *al*, 2010) mais aussi pour l'ajustement des projections climatiques de référence du portail DRIAS comme le jeu DRIAS-2020 ayant fait l'objet d'un rapport publié en février 2021<sup>25</sup>.

Cet article présente d'abord les caractéristiques des différents jeux de données utilisés pour l'analyse climatique du potentiel éolien et la capacité de la réanalyse SAFRAN à rendre compte des évolutions de la force du vent des observations météorologiques. Une méthode a ensuite été développée pour produire un jeu de données du vent à 100 m depuis 1958 à partir de la réanalyse SAFRAN et des indicateurs de production d'énergie éolienne dont l'évolution passée est discutée. Enfin, la méthode a été adaptée aux projections climatiques du jeu DRIAS-2020 et un diagnostic a été réalisé sur l'évolution attendue de la production d'énergie éolienne en France sous scénario RCP8.5.

## **2. Évaluation des données quotidiennes disponibles pour l'analyse du vent moyen en France**

### **2.1 Présentation des différents jeux de données**

La réanalyse SAFRAN (Vidal et *al*, 2010) combine une ébauche donnée par le modèle du ECMWF et des observations météorologiques de surface pour obtenir des champs météorologiques à la résolution spatiale de 8 km sur la France et à la résolution temporelle de 1 h. Il faut noter que les changements de réanalyses atmosphériques utilisées (ERA40 de 1958 à 2002 et l'analyse opérationnelle ECMWF au-delà) et ceux du nombre d'observations de vent disponibles (Soubeyroux et *al*, 2018) multiplié par 7 sur la période entre les années 1980 (de l'ordre de 100 points de mesure) et après 2010 (plus de 700 points) créent des sources d'hétérogénéité de la qualité des données de vent de la base SAFRAN sur lesquelles on reviendra par la suite.

Dans le cadre de notre étude, nous utilisons également des observations aux stations basées sur 25 longues séries de vent complètes d'au moins 20 ans (et depuis 1958 pour la moitié d'entre elles), régulièrement réparties sur le territoire (voir Figure 1 ci-dessous pour leur implantation)

Une autre source de donnée provient du jeu AROME. Le modèle AROME est un modèle non hydrostatique à aire limitée sur la France (Seity et *al*, 2011). Les données utilisées dans cette étude sont à la résolution horizontale de 2,5 km et intègre deux origines différentes. De 2000 à 2009, il s'agit d'une descente d'échelle dynamique s'appuyant sur la réanalyse ERA-I à 80 km fournissant un fichier de couplage au modèle ALADIN qui force ensuite le modèle à maille fine AROME. De 2010 à 2019, il s'agit de l'archive opérationnelle du modèle AROME. Nous utilisons plus spécifiquement dans notre étude l'archive du vent à 100 m, considérée comme référence sur la période 2000-2019.

Enfin, le jeu de données DRIAS-2020 (Soubeyroux et *al*, 2020) est un sous-ensemble de projections climatiques régionalisées Euro-cordex, corrigées sur la France par la méthode statistique Adamont appliquée à la réanalyse SAFRAN (voir rapport DRIAS-2020<sup>2</sup>). Dans le cadre de notre étude, nous utilisons uniquement les données corrigées de vent pour le scénario climatique RCP 8.5 (12 simulations couvrant la période 1970-2100).

### **2.2. Comparaison des jeux de données pour l'analyse de l'évolution du vent moyen**

Dans un premier temps, nous avons analysé les observations aux stations pour décrire les

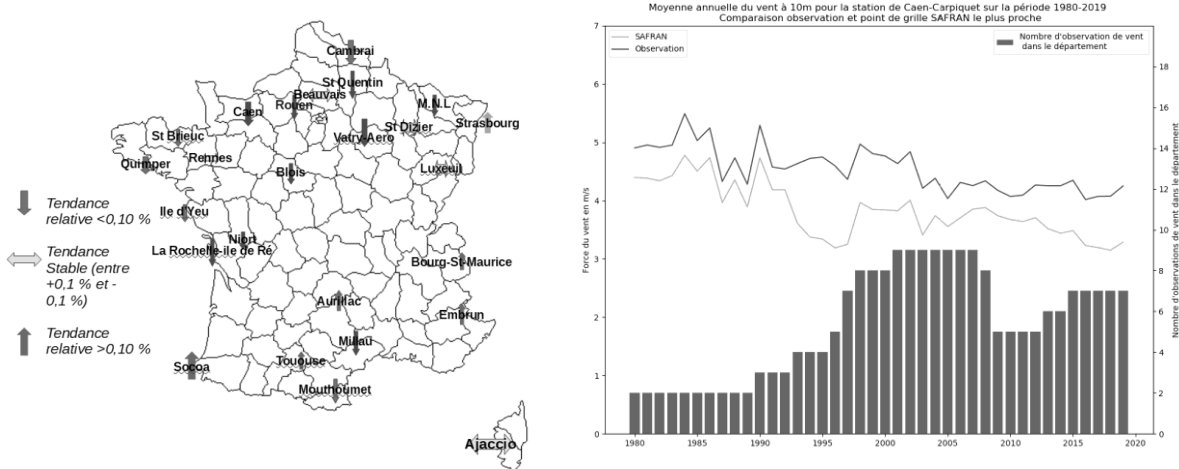
---

25 DRIAS : <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>

tendances climatiques du vent moyen sur la période 1958-2019. La Figure 1 présente les évolutions selon trois classes autour du seuil de  $\pm 0,1$  % par an. Une différence de comportement apparaît entre les stations de la moitié nord, majoritairement avec des tendances à la baisse (11 stations sur 15) et de la moitié sud où aucune tendance claire ne se dégage (4 stations en baisse, 5 stations en hausse, 1 station stable). Nous avons ensuite comparé la réanalyse SAFRAN aux observations sur la même période 1958-2019 selon un ensemble de tests statistiques classiques : biais, coefficient de corrélation, comparaison de tendances. Il est d'abord noté qu'à la résolution 8 km, des différences d'altitudes fortes peuvent exister entre les points d'observations et l'altitude moyenne d'une maille (jusqu'à 1000 m à Bourg-St-Maurice en Savoie). La corrélation entre les deux jeux de données s'avère plutôt bonne avec une valeur médiane de 0,74 mais les données SAFRAN présentent un biais significatif de -15 % vraisemblablement dû à la réanalyse atmosphérique utilisée ERA40. Les différences de tendance des deux jeux de données ont été analysées avec une table de contingence utilisant trois classes (hausse, stable ou baisse). Le tableau 1 montre une assez bonne cohérence des tendances entre les deux jeux de données : bon accord sur près de 50 % des stations (12 sur 25) et désaccord (classes inversées) sur 20 % des stations (5 sur 25).

OBS/SAFRAN	< -0,1 %	stable	> +0,1 %
< -0,1 %	9	2	3
stable	3	2	0
> +0,1 %	2	3	1

**Tableau 1** : Table de contingence des tendances du vent moyen sur la période 1958-2019 pour 25 sites selon les données locales ou la réanalyse SAFRAN



**Figure 1** : À gauche, analyse des tendances de l'évolution du vent moyen en France sur la période 1958-2019 selon trois classes : baisse d'au moins 0,1 % par an, flèche vers le bas, stable flèche horizontale, hausse supérieure à 0,1 % par an flèche vers le haut.

**Figure 2** : À droite : comparaison des observations de vent moyen annuel à la station de Caen (foncé) et la maille SAFRAN de rattachement (clair), en regard de l'évolution du nombre de stations d'observations du vent dans le département (barplot).

Mais l'analyse des écarts entre les observations locales et SAFRAN a également mis en évidence pour plusieurs stations une période de moindre corrélation du signal dans les années 1990, en phase avec une évolution rapide du réseau d'observation. La Figure 2 illustre ce comportement pour la station de Caen. Le retour à une meilleure corrélation après 2000 justifie l'utilisation de SAFRAN pour la construction de nos indicateurs servant à analyser les tendances de long terme passées et futures.

### 3. Construction d'indicateurs climatiques pour le secteur éolien

#### 3.1 Description des indicateurs

Plusieurs types d'indicateurs climatiques du secteur éolien ont été considérés dans notre étude pour représenter la sensibilité à la moyenne du vent à 100 m (densité énergétique totale<sup>26</sup> et coefficient A de la loi de Weibull<sup>27</sup>), aux vents forts (nombre de jours dépassant le 98<sup>e</sup> percentile des vitesses de vent calculé sur la période de référence), aux vents faibles (nombre de jours inférieurs au 10<sup>e</sup> percentile des vitesses de vent de la période de référence) et à la modification du profil de vent (coefficient k de la loi de Weibull). Ces indicateurs ont été calculés à partir des données SAFRAN en climat passé et des données DRIAS-2020 pour le futur. Dans les deux cas, ils nécessitent en premier lieu de disposer de méthodes d'extrapolation statistique du vent moyen à 10 m au vent moyen à 100 m.

#### 3.2 Extrapolation du vent à 100 m

Plusieurs méthodes d'extrapolation statistique du vent 10 m de SAFRAN ont été testées dans notre étude en considérant comme référence le vent à 100 m du rejeu AROME. Au final, la méthode la plus performante s'est avérée être la méthode quantile-quantile (Déqué, 2007) mise en œuvre au pas de temps mensuel ou saisonnier, permettant notamment de bien représenter les vents forts. Cette méthode a été appliquée en climat passé comme en climat futur.

### 4. Analyse des variations passé/futur de l'énergie éolienne

#### 4.1 Evolution passé du potentiel éolien

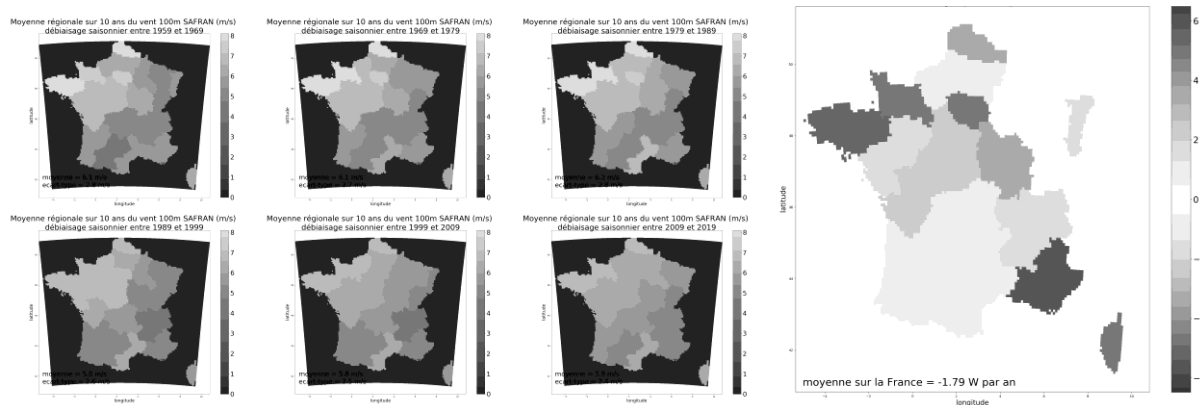
La Figure 3, présentant l'évolution du vent moyen à 100 m par décennie, montre en premier lieu un léger affaiblissement de la moyenne nationale de l'ordre de 0,3 m/s entre les trois premières décennies de 1959 à 1989 (moyenne de l'ordre de 6,1 m/s) et les trois dernières de 1989 à 2019 (moyenne proche de 5,8 m/s). Des écarts régionaux plus forts sont observés sur le Nord-Ouest de la France avec une baisse supérieure à 1 m/s (passant de plus de 8 m/s à moins de 7 m/s). À l'inverse la baisse est moins prononcée dans les régions du sud.

L'analyse des tendances de densité énergétique sur cette même période, représentée sur la Figure 4, précise cette évolution. La baisse la plus forte entre 4 et 5 W/an se retrouve sur la Bretagne mais aussi la région PACA, tandis qu'aucune baisse n'est observée dans certaines parties du quart Sud-Ouest du pays.

---

<sup>26</sup> Densité énergétique :  $D = 1/2 \rho * S * V^3$  où  $\rho$  = densité de l'air prise à 1,225 kg/m<sup>3</sup>, S = surface balayée par les pâles prise à 1 m<sup>2</sup>, V = vent à la hauteur des pâles (ici 100 m).

<sup>27</sup> Loi de Weibull :  $f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right]$  avec A espérance de la loi et k paramètre de forme

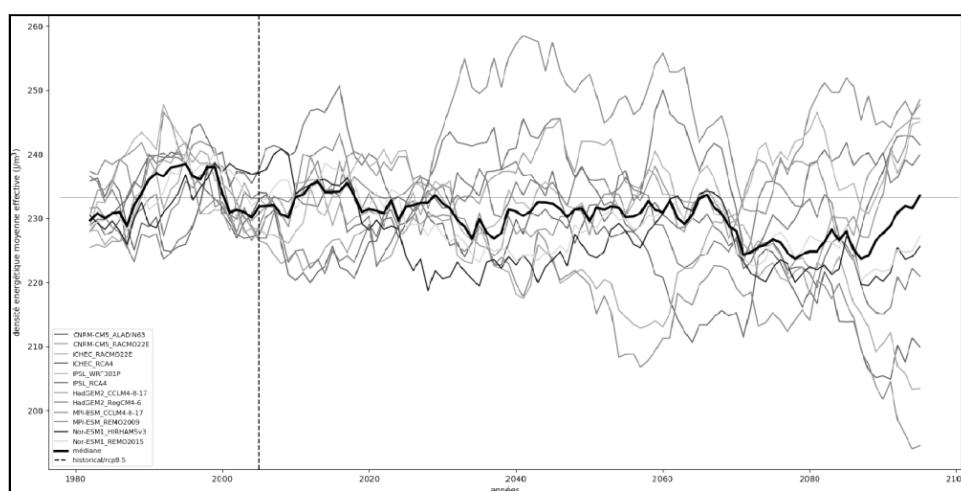


**Figure 3 (à gauche) :** Évolution du vent moyen régional SAFRAN à 100 m (en m/s) en France sur chaque décennie de la période 1959-2019. Débiaisage quantile-quantile saisonnier.

**Figure 4 (à droite) :** Tendence de la moyenne annuelle régionale SAFRAN de la densité énergétique totale (W par an) sur la période 1959-2018. Débiaisage quantile-quantile mensuel.

#### 4.2 Diagnostic en climat futur

Nous avons d'abord calculé l'évolution du vent moyen à 100 m issu de la correction quantile-quantile du vent moyen 10 m du jeu DRIAS-2020 pour les douze simulations du scénario climatique RCP8.5 (référence temporelle 1976-2005) puis produit différents indicateurs climatiques représentatifs de la production éolienne. La Figure 5 représente l'évolution temporelle de la densité énergétique à 100 m moyenne sur la France. On retrouve dans les résultats la nette dépendance au GCM relevé par Moemkenet *al.*, 2018 qui ont comparé dans leur étude les vitesses de vent à 10 m sur la période historique (1971-2000) modélisées par des couples de modèles GCM/RCM (données non corrigées), à celles issues des simulations des mêmes RCMs pilotées cette fois par ERA-Intérim. En première moitié de siècle, voire jusqu'en 2070, une grande dispersion apparaît entre les simulations (+/-8 % mais sans signe clair de tendance). En fin de siècle, la majorité des simulations prévoient une baisse de la densité énergétique, parfois de près de 15 %, notamment en automne mais avec une forte variabilité régionale.



**Figure 5 :** Evolution de la densité énergétique moyenne en France au XXI<sup>e</sup> siècle sur l'ensemble de 12 simulations RCP8.5 du jeu DRIAS-2020

### 5. Conclusion et perspectives

Cette étude a permis d'évaluer l'apport potentiel de la réanalyse SAFRAN pour représenter l'évolution climatique de la production d'énergie éolienne en France sur une longue période

passée. Malgré un comportement hétérogène dans les années 1990, la réanalyse SAFRAN permet de reproduire les signaux à la baisse, constatés dans le nord-ouest de la France. En climat futur, une grande dispersion apparaît dans l'évolution prévue pour la densité énergétique à partir de l'ensemble RCP 8.5 du jeu DRIAS-2020. Ce résultat est conforme à d'autres publications basées sur des ensembles plus importants (Tobin *et al.*, 2015). Ces jeux de données et les indicateurs associés ont vocation à être prochainement proposés sur le portail DRIAS.

## 6. Bibliographie

Déqué M (2007) Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Glob Planet Change* 57:16–26. doi:[10.1016/j.gloplacha.2006.11.030](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.030)

Moemken, J., Meyers, M., Feldmann, H., & Pinto, J. G., 2018 : Future changes of wind speed and wind energy potentials in EURO-CORDEX ensemble simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **123**, p 6373– 6389. <https://doi.org/10.1029/2018JD028473>

Pouponneau, B., Pourret, V., Faucou, E., Mestre, O., Sorel, M., Bellini, R., Martinoni-Lapierre, S., (2017) Evaluation de la ressource éolienne terrestre en France, *La Meteorologie* **98**, p. 28-35 [10.4267/2042/62457](https://doi.org/10.4267/2042/62457)

Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Masson, V. (2011) : The AROME-France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, **139(3)**, p 976-991.

Soubeyroux J-M., Richon J., Schneider M., Lassegues P., Dosnon F., 2018 : Caractérisation à haute résolution spatiale des tempêtes historiques en Métropole : application à la tempête Zeus du 6 mars 2017, *La Climatologie*, **vol. 14** ,p 96-106

Soubeyroux J-M., Bernus S., Corre L., Gouget V., Kerdoncuff M., Somot S., Tocquer F., 2020 : Le nouveau jeu de simulations climatiques régionalisées sur la France pour le service DRIAS, *XXXIIIe colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, p 641-646

Tobin, I., Vautard, R., Balog, I. (2015) Assessing climate change impacts on European wind energy from ENSEMBLES high-resolution climate projections. *Climatic Change*, **128**, p 99–112

Vautard, R., Cattiaux, J., Yiou, P. *et al.* (2010) Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness. *Nature Geosci* **3**, p 756–761

Vidal, J.-P., Martin, E., Baillon, M., Franchistéguy, L. et Soubeyroux, J.-M. (2010a) SAFRAN 50-year high-resolution meteorological reanalysis over France. *International Journal of Climatology*, **30(11)**, p 1627–1644. DOI : [10.1002/joc.2003](https://doi.org/10.1002/joc.2003)



# LES CHANGEMENTS DES TEMPERATURES A BEYROUTH ET LEURS RELATIONS AVEC LES TYPES DE CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

Traboulsi M. <sup>(1,2)</sup>, Tolika K. <sup>(3)</sup>, Anagnostopoulou Ch. <sup>(3)</sup> et Maherass P. <sup>(3)</sup>

<sup>1</sup> Université Libanaise, Faculté des Lettres, Corniche Mazraa, Beyrouth, Liban.

<sup>2</sup> Archéorient UMR 5133. Maison de l'Orient et de la Méditerranée CNRS-Université Lyon 2, 7 rue Raulin, 69007 Lyon. traboulsim@yahoo.fr

<sup>3</sup> Département de Météorologie et Climatologie. Aristote Université de Thessaloniki, 54124 Grèce.

**Résumé :** Ce travail propose l'étude des relations entre les températures à Beyrouth et les types de circulation atmosphérique au niveau de 500 hPa pour la période 1970-71/2016-17. L'analyse des températures moyennes, Tx et Tn, annuelles et saisonnières montre des tendances positives significatives dont la hausse en été et au printemps est plus élevée pour les Tx alors qu'elle est plus élevée en automne et en hiver pour les Tn. Les anomalies annuelles et saisonnières des Tx et Tn pour chaque type de circulation et pour chaque année de la période étudiée sont calculées, ainsi que l'étude des tendances thermiques pour tous les types de circulation. Il en résulte que le changement des températures à Beyrouth est accompagné par une modification de la circulation aux échelles régionale et locale, exprimé par une forte hausse des fréquences des types de circulation anticyclonique et des anomalies thermiques qui les accompagnent.

**Mots-clés :** types de circulation, tendance, températures, Beyrouth-AIB, Liban.

**Abstract:** *Changes in temperatures in Beirut and their relationships with atmospheric circulation types.* This work proposes the relationship between temperatures in Beirut and types of atmospheric circulation at the 500 hPa level for the period 1970-71 / 2016-17. Average annual and seasonal Tx and Tn temperatures show significant positive trends, with higher summer and spring increases for Tx and higher for winter and autumn for Tn. The annual and seasonal Tx and Tn anomalies for each type of circulation and for each year of the study period are calculated as well as the study of thermal trends for all circulation types. As a result, the change in temperature in Beirut is accompanied by a change in circulation at regional and local level, which is reflected in a strong increase in the frequency of the anticyclonic types of circulation and the thermal anomalies that accompany them.

**Keywords:** Types of circulation, trend, temperature, Beirut-AIB ,Lebanon

## Introduction

Au Liban (figure 1), comme partout au Moyen-Orient, on observe depuis les années 1990 d'une part des hivers de plus en plus doux, d'autre part de fortes chaleurs estivales qui sont de plus en plus persistantes dans le temps alors que la fréquence des chaleurs printanières augmente elle aussi. C'est ainsi que la température moyenne annuelle à Beyrouth montre une augmentation de plus de 2 C° significative au seuil de 1 % (Traboulsi, 2014a, b). Cette augmentation des températures ainsi que l'accroissement de l'écart moyen entre les températures minimales et maximales sont des éléments contribuant aux processus de désertification mais dont l'impact reste encore à préciser. La question qui se pose est de savoir si le changement des températures au Liban, accompagné d'une modification de la circulation atmosphérique à l'échelle régionale (Traboulsi, 2016), est également accompagné d'une modification de la circulation à l'échelle locale. Mettre en évidence cette correspondance nous amène à étudier les types de circulation atmosphérique au Liban ainsi que les températures maximales (Tx) et minimales (Tn) qui leur sont associées.

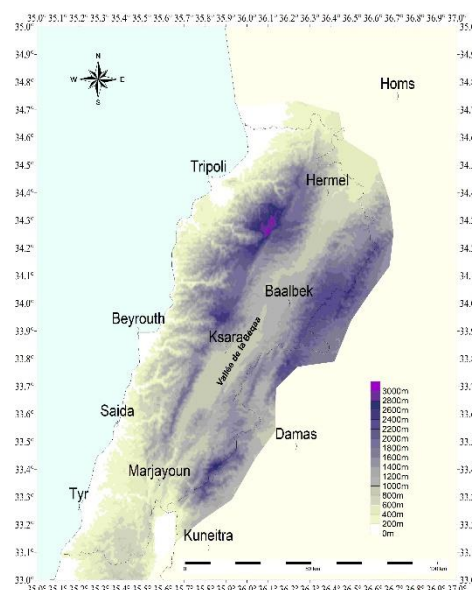


Fig. 1 : Localisation de la zone étudiée

## 1. Données et méthodes

Pour ce travail, visant à mieux comprendre le comportement des températures à Beyrouth et leur relation avec les types de circulation atmosphérique, ce sont les données quotidiennes des températures (maximales et minimales) de la station de Beyrouth-AIB (Aéroport International de Beyrouth) pour la période 1971-2017 qui seront utilisées ; elles proviennent du service

météorologique du Liban. Les données géopotentielle à 500 hPa issues des Réanalyses NCEP/NCAR obtenues sur une maille de 2°5 seront également utilisées pour la même période. L'étude propose, dans un premier temps, le calcul des tendances des températures moyennes maximales et moyennes minimales tant à l'échelle annuelle que saisonnière ainsi que leur signification. Dans un deuxième temps, nous proposons l'application de la méthode de classification des types de circulation développée par P. Maheras et son équipe, déjà appliquée à l'étude des précipitations de la même station (Traboulsi *et al.*, 2019). Elle permet de déterminer la localisation géographique des types de circulations cyclonique et anticyclonique. Enfin, dans un troisième temps, les anomalies annuelles et saisonnières des températures maximales et minimales pour chaque type de circulation et pour chaque année de la période étudiée seront calculées. Le but final est le calcul et l'étude des tendances thermiques pour tous les types de circulation.

## 2. Températures et types de circulation : variation et tendance

### 2.1. Variation et tendance des températures

La station de Beyrouth présente des températures moyennes annuelles (tableau 1) et saisonnières maximales (Tx) et minimales (Tn) clairement plus élevées que celles des stations côtières en Crète à la même latitude (Maheras, 1982). En ce qui concerne la variabilité de ces températures, on constate (Tableau 1) que les écarts types des Tn sont plus élevés que ceux de Tx, excepté au printemps. Ce comportement des températures à Beyrouth est probablement une exception en Méditerranée orientale car presque partout dans les stations de la mer Egée (Maheras, 1982) la variabilité des Tx est plus élevée que la variabilité des Tn. Enfin, les Tx comme les Tn connaissent une tendance à la hausse à l'échelle annuelle ainsi que saisonnière, et partout significative (tableau 2). En automne et en hiver la tendance moyenne de Tn est plus élevée que celle de Tx, alors que, au printemps et en été, la tendance moyenne de Tx est plus élevée que celle de Tn. Enfin, en été, on observe la hausse des températures la plus élevée tant pour les Tx (3,83° C) que pour les Tn (3,53° C).

Tableau 1 : Moyennes des températures maximales, minimales et moyennes à Beyrouth AIB durant la période 1970-71 / 2016-17.

	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Année
Tx moy	26,9	18,4	22,7	29,5	24,3
Ecart type	1,15	1,25	1,45	1,40	1,04
Tn moy	19,8	11,2	14,8	22,8	17,2
Ecart type	1,43	1,27	1,22	1,41	1,10
Tmoy	23,3	14,7	18,7	26,2	20,7

Tableau 2 : Tendances saisonnières et annuelles des températures maximales, minimales et moyennes à Beyrouth AIB durant la période 1970-71 / 2016-17. Les tendances significatives sont marquées par \*.

	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Année
Tx	+*	+*	+*	+*	+*
Tend. moy.	2,38	1,96	3,49	3,83	2,82
Tn	+*	+*	+*	+*	+*
Tend. moy.	3,49	2,97	2,88	3,53	3,14
Tmoy	+*	+*	+*	+*	+*

### 2.2. Les types de circulation : fréquence et tendance

La classification comprend 5 types anticycloniques (Cnnw (Anw, Ane, A, Asw, Ase) et 7 cycloniques (C, Cnnw Cwnw, Csw, Csw, Cse, Cne). La méthode de classification ainsi que la description de ces types de circulation ont été déjà exposées dans des études antérieures concernant l'étude des précipitations à Beyrouth (Traboulsi *et al.*, 2019).

Le calcul des fréquences relatives annuelles moyennes (tableau 3) montre que les types anticycloniques représentent 56,7 % du total des jours pour la période étudiée alors que les types cycloniques n'entrent que pour 43,3 %. Parmi les types cycloniques, le type C (goutte froide) est le plus fréquent à l'échelle annuelle (10,2 %) suivi par le type Cne (9,4 %). A l'échelle saisonnière, le type Asw est le plus fréquent en automne (17,6 %) suivi par le type Anw en été (17,4 %). Parmi les types cycloniques, le type Cne est le plus fréquent en hiver (14,4 %) et au printemps (12,5 %), suivi par le type C pour l'hiver et le printemps (12,4 % et 12,3 %).

Tableau 3 : Fréquences saisonnières et annuelles (en pourcentage) des types de circulation à Beyrouth-AIB (1970-71 /2016-2017). (A : anticyclonique ; C : cyclonique. N : nord ; s : sud ; e : est ; w : ouest. Ex : Anw, anticyclonique nord ouest)).

	Anw	Ane	A	Asw	Ase	C (goutte froide)	Cnnw	Cwnw	Csw	Cssw	Cse	Cne
Automne	16,0	11,8	8,0	17,6	8,6	8,3	3,2	8,0	6,1	1,2	3,5	7,9
Hiver	6,7	8,9	13,5	11,3	2,6	12,4	2,2	6,4	13,4	2,4	5,8	14,4
Printemps	8,6	7,9	11,7	13,2	4,0	12,3	3,4	5,3	11,7	2,9	6,5	12,5
Été	17,4	12,0	12,7	16,8	17,2	7,9	1,0	4,6	5,4	0,7	1,0	3,1
Année	12,2	10,1	11,5	14,7	8,1	10,2	2,5	6,1	9,1	1,8	4,2	9,4

Le calcul des tendances de types de circulation montre que les types anticycloniques affichent une tendance à la hausse significative aux échelles saisonnière et annuelle. Par contre, les types cycloniques affichent une tendance négative significative pour les mêmes échelles temporelles.

### 3. Relations entre les types de circulation et les températures Tx et Tn

Afin d'étudier le caractère thermique des types de circulation, nous avons calculé les anomalies et les tendances annuelles et saisonnières des températures maximales et minimales pour chaque type de circulation et pour chaque année de la période étudiée. L'étude des fréquences des types de circulation et leurs tendances, conjuguée avec l'analyse des anomalies thermiques de ces types, peut contribuer à fournir une explication probable du changement des températures au Liban. C'est ainsi que, d'après le tableau 4, on constate que presque toutes les anomalies des températures maximales des types anticycloniques sont positives tandis que, dans la majorité des cas, les anomalies des types cycloniques sont négatives, surtout celles des types cycloniques qui connaissent les fortes fréquences (C, Cne). Il est à noter que les types A et Ane connaissent les plus fortes anomalies positives tandis que le type C connaît les plus fortes anomalies négatives. Au contraire, parmi les types cycloniques, le type Cwnw connaît les plus fortes anomalies positives. L'image fournie par le tableau 5 concernant les anomalies des températures minimales des types de circulation ne diffère pas beaucoup de l'image des Tx décrite ci-dessus, excepté la valeur des anomalies. En effet, pour tous les types de circulation (excepté le type Cnnw), tant les anomalies positives que les anomalies négatives des températures maximales sont plus élevées (en chiffres absolus) que les anomalies des températures minimales.

Tableau 4 : Moyennes des anomalies des températures maximales par types de circulation à Beyrouth AIB durant la période 1970-71/2016-17.

	Anw	Ane	A	Asw	Ase	C	Cnnw	Cwnw	Csw	Cssw	Cse	Cne
Automne	0,87	1,41	1,30	0,70	0,82	-1,34	0,17	0,57	0,68	-0,19	-0,84	-1,19
Hiver	-0,45	2,29	1,60	0,71	2,03	-1,65	0,33	1,49	1,24	-0,19	-0,95	-0,87
Printemps	1,19	2,78	2,95	0,67	2,73	-1,18	0,53	1,64	1,27	-0,89	-1,37	-0,91
Été	1,01	0,83	1,11	0,91	0,65	0,19	-0,16	0,58	0,30	-0,32	0,33	0,12
Année	0,89	1,74	1,81	0,80	1,00	-1,13	0,20	1,01	0,94	-0,54	-1,00	-0,97

Tableau 5 : Moyennes des anomalies des températures minimales par types de circulation à Beyrouth AIB durant la période 1970-71/2016-17.

	Anw	Ane	A	Asw	Ase	C	Cnnw	Cwnw	Cws	Cssw	Cse	Cne
Automne	0,46	1,40	0,75	0,58	1,10	-0,33	0,69	0,86	0,68	-0,01	-0,75	-0,39
Hiver	-0,80	0,78	0,50	0,64	1,54	-0,17	1,19	1,48	1,03	0,16	-0,74	-0,28
Printemps	0,33	1,65	0,95	0,23	1,84	-0,09	0,84	1,04	1,12	-0,17	-0,69	-0,51
Été	0,58	0,62	0,65	0,54	0,59	0,39	0,63	0,26	0,10	-0,38	-0,15	0,10
Année	0,44	1,16	0,78	0,54	0,90	-0,09	0,78	0,97	0,85	0,01	-0,66	-0,41

L'examen des tendances des Tx et Tn pour l'ensemble des types de circulation, anticycloniques et cycloniques, nous montre qu'elles sont positives et partout significatives (tableau 6) à l'échelle annuelle et saisonnière. Pourtant, l'analyse de ces tendances par type de circulation montre quelques exceptions (tableau 7), comme par exemple les tendances positives hivernales de Tx non significatives pour un certain nombre de types anticycloniques et cycloniques ainsi que les tendances négatives non significatives des Tn en été pour les types cycloniques Cnnw et Cse.

Tableau 6 : Tendances des anomalies des températures saisonnières et annuelles par type de circulation à Beyrouth-AIB (1970-71 / 2016-2017) (même légende que pour le tableau 2).

		Anticycloniques	Cycloniques
Automne	Tx	+	+
	Tn	+	+
Hiver	Tx	+	+
	Tn	+	+
Printemps	Tx	+	+
	Tn	+	+
Année	Tx	+	+
	Tn	+	+

Tableau 7 : Tendances des anomalies des températures maximales et minimales par type de circulation à Beyrouth-AIB (1970-71 / 2016-2017) (les tendances significatives au seuil de 5 % selon le test Mann Kendall sont marquées par une étoile).

	Anw	Ane	A	Asw	Ase	C	Cnnw	Cwnw	Cws	Cssw	Cse	Cne
Année	Tx	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Tn	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Autom.	Tx	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
	Tn	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Hiver	Tx	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Tn	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Print.	Tx	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Tn	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Été	Tx	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
	Tn	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+

#### 4. Discussion et conclusion

Les tendances des températures Tx et Tn annuelles et saisonnières à Beyrouth sont positives et significatives. Ces résultats traduisent une hausse des températures remarquable durant toutes les saisons : elles sont plus élevées en été et au printemps pour les Tx et en hiver et en automne pour les Tn. A l'échelle annuelle, les fréquences des types anticycloniques sont égales à 56,7 %, marquées par des tendances positives significatives. De même les tendances positives des fréquences anticycloniques saisonnières apparaissent partout significatives. Les fréquences des types cycloniques (43,3 %) sont, au contraire, marquées par des tendances négatives

significatives. La hausse des températures de surface et la diminution des précipitations observées (Traboulsi *et al.*,2019) ne sont donc que les conséquences de cette modification régionale et locale de la circulation atmosphérique matérialisée par une persistance des conditions anticycloniques durant la période d'étude. Cette modification a été mise en évidence également sur le Proche-Orient par Traboulsi (2016). Evidemment la hausse des températures n'est pas la même durant toutes les saisons. Le maximum apparait en été tant pour les Tx (3,83° C) que pour les Tn (3,53° C), le minimum en hiver pour les Tx (1,98° C) et au printemps pour les Tn (2,88° C).

Le maximum de la hausse en été est probablement lié aux fréquences très élevées des types anticycloniques, aux anomalies positives de ces types quelques fois élevées ainsi qu'à celles des types cycloniques présentant des fréquences importantes, et enfin aux tendances positives significatives des types anticycloniques et de quelques types cycloniques. Le minimum de la hausse en hiver est probablement lié aux fréquences très élevées des types cycloniques. On insistera plus sur les causes de la hausse des températures :est-elle le résultat de la variabilité naturelle du climat, s'agit-elle d'un effet des émissions de gaz à effet de serre ou enfin s'agit-il d'un effet du climat urbain ? Les trois sont évidemment en cause, mais il est très difficile de les hiérarchiser ainsi que de quantifier leur influence sur la hausse des températures observée. Pourtant, il est possible de faire quelques remarques concernant ce problème. C'est un effet connu que la variabilité naturelle du climat se produise en l'absence de forçages externes et intègre les processus intrinsèques de l'atmosphère, de l'océan et du couplage océan-atmosphère ; on peut l'estimer par la valeur de température moyenne + 2 fois l'écart type « naturel » établi sur la période préindustrielle. A l'échelle locale, l'urbanisation croissante que connaît l'agglomération de Beyrouth pourrait justifier une partie du réchauffement actuel. En effet, la multiplication des constructions dans et autour de la capitale, et en particulier en direction de l'aéroport, contribue sans doute au réchauffement à partir de l'après-midi et surtout la nuit (Hamdi,2010 ; Carrega, 2017) et ce sont les périodes estivales qui devraient être les plus impactées. A l'échelle saisonnière, la hausse des températures est plus remarquable en été et au début de l'automne. En effet, les températures ont beaucoup augmenté durant les mois chauds (juin-août) par rapport aux mois relativement froids (décembre-février).

Le troisième facteur de la hausse des températures, l'augmentation des émissions des gaz à effet de serre, semble être également important. En effet, étant donné que l'îlot de chaleur urbain influence plus la hausse des Tn aussi bien en hiver qu'en été alors que cette influence est moins importante sur la hausse des températures maximales, il semble que ce troisième facteur est surtout responsable, entre autres ,de la hausse très élevée des Tx observée surtout en été à Beyrouth.

Enfin, dans ce contexte de la hausse très importante de Tx d'été, on peut se poser la question de savoir si ce fait ne serait pas le signal d'un changement qui serait plus précoce que ce qui était attendu jusqu'à présent ? (à savoir, la période 2040-2050 selon Ulmann et Roucou, 2016). C'est que l'on appelle le concept de «time of emergence» ; il s'agit du moment à partir duquel la tendance au réchauffement deviendra significative par rapport à la variabilité naturelle (Ulmann et Roucou, 2016). Évidemment cette question reste sans réponse et ne peut être qu'une hypothèse.

Nous avons conscience que les explications données concernant la hausse très élevée tant des Tx que des Tn à Beyrouth sont relativement simplistes et incomplètes car les facteurs responsables du réchauffement observé durant la période d'étude sont plus complexes. Un travail plus complet, utilisant également les données d'autres stations, pourra fournir des explications plus complètes et mieux fondées.

## **Bibliographie**

- Anagnostopoulou C., Tolika K., & Maheras P., 2009. Classification of circulation types: a new flexible automated approach applicable to NCEP and GCM datasets. *Theoretical and Applied Climatology*, 96, p. 3-15.
- Carrega P., 2017. Le climat urbain et le changement climatique. *Variabilité, changement climatique et conséquences en Méditerranée*. Hal-01794243, p. 108-121.
- Hamdi R., 2010. Estimating urban heat island effects on the temperature series of Uccle (Brussels, Belgium) using remote sensing data and a land surface scheme. *Remote Sensing*, 2(12), p. 2773–2784.
- Maheras P., 1982. *Climatologie de la mer Egée et de ses marges continentales. Essai de Climatologie descriptive et de Climatologie dynamique*. Thèse de doctorat d'État, Atelier de Reproduction des Thèses, Université de Lille III.
- Traboulsi M., 2014a. Le réchauffement climatique au Proche-Orient : une évolution inquiétante ? *ArchéOrient-Le Blog (Hypotheses.org)*, 21 novembre 2014. [En ligne] <http://archeorient.hypotheses.org/341>
- Traboulsi M., 2014b. Les fortes chaleurs au Proche-Orient (1970-2010) : exemple de réchauffement climatique. *Actes du XXVIIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Dijon, 2-5 juillet 2014*, p. 753-758.
- Traboulsi M., 2016. Modification de la circulation atmosphérique au-dessus du Proche-Orient, *ArchéOrient - Le Blog*, [En ligne] <https://archeorient.hypotheses.org/6627>
- Traboulsi M., Tolika K., Anagnostopoulou Ch. et Maheras P., 2019. Les précipitations à Beyrouth et leurs relations avec les types de circulation. *Actes du XXXIIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Thessaloniki*, p. 523-528.
- Ulmann A. et Roucou P., 2016. Le concept de «time of emergence» appliqué aux températures maximales d'été sur le bassin Méditerranéen. *Actes du XXIXème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Lausanne -Besançon*, p. 419-424.

# LA VARIABILITE HYDRO-CLIMATIQUE ET LEURS IMPACTS SUR LE SYSTEME HYDROLOGIQUE DU MOYEN SEBOU (PRE-RIF) - MAROC

Yazami Ztait M.<sup>1</sup>, Ouali Alami F-Z.<sup>2</sup>, Taleb A.<sup>2</sup>, Bouaiche A.<sup>3</sup> et Chkhami Kh.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Chercheur en géographie physique, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines Sias-Fès ;

<sup>2</sup> Professeur chercheur, Université Hassan II, Faculté des Sciences et Techniques Mohammedia, Casablanca ;

<sup>3</sup> Doctorant, Université Hassan II, Faculté des Lettres et des Sciences Humaine Ben M'scik, Casablanca.

## Résumé :

Les conditions hydro-climatiques au niveau de la station de Dar El Arsa, située au Pré-Rif (Maroc), ont contribué à la perturbation de débit de la vallée du moyen Sebou, à l'aval de Fès. Ce débit provient du Barrage d'Allal El Fassi et enregistré au niveau d'Oued Sebou présente des fortes exceptions, ces dernières sont divisées en deux cas, le premier était le déclin apparent du débit qui varie au fil des ans, en particulier après la construction de barrage d'Allal El Fassi en 1990 au moyen atlas. Par exemple, les débits moyennes annuelles étaient de 2 à 18 m<sup>3</sup>/s, comparativement à la période antérieure au barrage, où les débits moyennes annuelles enregistrés étaient de 13 à 43 m<sup>3</sup>/s. La seconde était l'apparition d'inondations exceptionnelles, comme celles de 2008 et 2010, où les débits de la vallée de Sebou sont arrivés respectivement à (426 et 461 m<sup>3</sup>/s) au niveau la station de Dar El Arsa.

Cet article, présente l'analyse de la variabilité des précipitations et leurs impacts sur les débits dans la vallée du moyen Sebou, au cours des cinq dernières décennies, sur deux phases avant et après la construction du barrage, afin de mettre en évidence les sécheresses vécues et les inondations produites dans la région. Cette étude est basée sur l'analyse des données des précipitations disponibles à la station étudiée entre 1971 et 2015 et l'analyse du bilan de barrage d'Allal El Fassi entre 1993 et 2015.

**Mots Clés :** Variabilité; hydro-climat; Débits; sécheresse; inondation; précipitation; hydrologie.

## Abstract:

The conditions of hydro-rain variability at the Dar el Arsa station, located in the Hamria region in the Pre-Rif, contributed to the disruption of the local precipitation and flow system in the middle Sebou valley, downstream of Fez, which comes from the Allal El Fassi dam above Fez. The quantities of Oued Sebou flow were strong exceptions, divided into two cases, the first of which was the apparent decline in flow, which varied over the years, especially after the construction of the Allal El Fassi dam in 1990 in the region of Sefrou downstream Azzaba in the Middle Atlas. For example, the annual mean of the flow of the plant has decreased to between 2 and 18 m<sup>3</sup> / s, compared to the pre-dam period, where the annual mean is between 13 and 43 m<sup>3</sup> / s. The second was the appearance of exceptional floods, such as those, which occurred in 2008 and 2010, where the daily flow of the Sebou valley arrived respectively (426 and 461 m<sup>3</sup> / s) at the Dar El Arsa station. .

In this article, we will analyze the variability of precipitation and flow in the Sebou valley downstream from Fez over the past five decades, focusing on two phases before and after the construction of the dam, in order to highlight the droughts that were experienced in this region, and to show the floods that have occurred in the region. This is based on the analysis of hydro-rainfall data available at the station studied between 1971 and 2015, in addition to the analysis of inputs and outputs of the Allal El Fassi dam between 1993 and 2015.

**Keywords:** variability; Hydro-climatic; flow; drought; flood; precipitation; hydrology.

## Introduction :

Les effets des changements climatiques présentent l'un des principales préoccupations au monde entier. Les précipitations sont les plus concernées par cette variabilité. Au Maroc, des analyses de la variabilité pluviométrique et ces impacts ont bien montré une tendance à la sécheresse (Tramblay et al., 2012), avec une influence remarquable sur le régime hydrologique des différents bassins versants marocains (Haida et al., 1999 ; Bouignane A., 2010) y compris le bassin de Sebou.

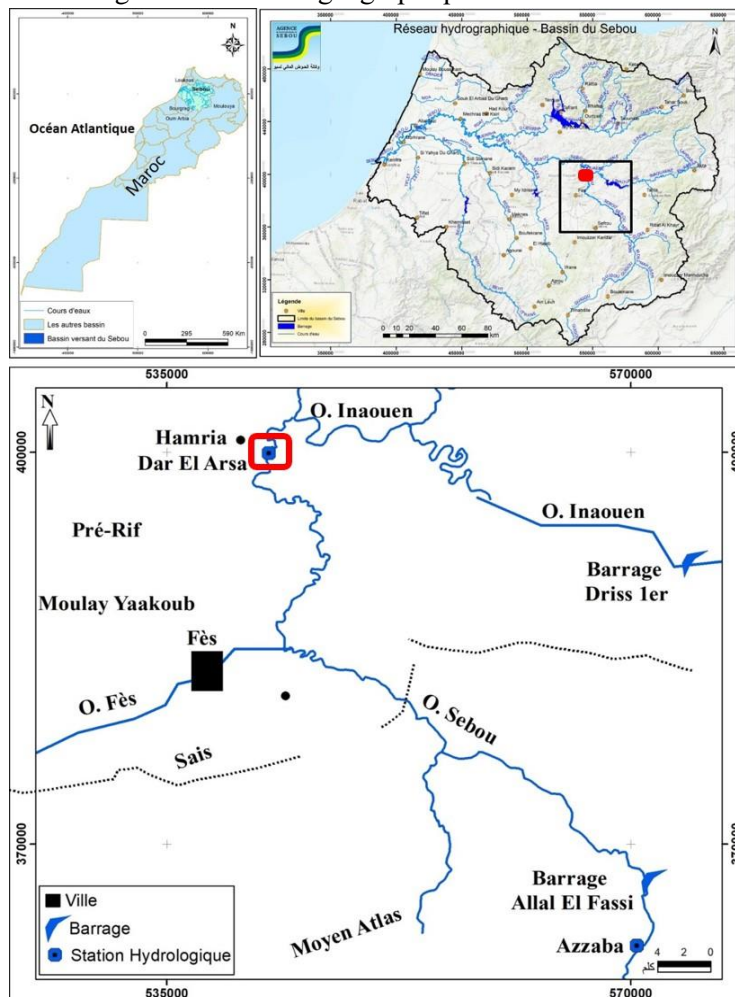
Le bassin de Sebou fournit près d'un tiers (1/3) des eaux de surface du Maroc, soit environ 30%, selon l'Agence Hydraulique du Sebou. Le Moyen Sebou est considéré comme ayant d'énormes importateurs d'eau (Yazami Ztait M et al 2020; Yazami Ztait Mohammed. 2020; Yazami Ztait, Mohammed, et Taous Ali. 2020; Yazami Ztait M et al 2018; Taous A. et Dadoun A. 2015; El Ghachi. M et al. 2011; ABHS. 2008; El Ghachi. M. 2007; El Khalki. Y, Benyoussef. A. 2005; Ballais. J. L et al. 2011; Esposito. C. 2005; Laborde. J.P. 2000), mais l'écoulement de

ses ressources au niveau des Vallès, envahi (par les crues et les inondations) pendant certaines périodes, diminuent ou bien complètement disparaissent pendant d'autres. La chose qui met en évidence la menace de plusieurs zones par la variabilité hydro-climatique au niveau de la région d'étude.

## 1. Présentation de la zone d'étude

La Station Dar Al-Arsa est située au nord de Fès, notamment à douar El Khraisiyin, à l'est du centre Hamria, entre la confluence de l'Oued Sebou et la vallée de Fès et sa confluence avec la vallée d'Inaouene. Selon des cartes topographiques (Fès Est et Fès Ouest 1/50000) la zone d'étude se situe entre les latitudes 34 degrés et 05 minutes, 34 degrés et 15 minutes au nord de l'équateur, et entre les longitudes 4 degrés et 50 minutes et 5 degrés 05 minutes à l'ouest de Greenwich (Figure 1).

Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude



## 2. Matériel et méthode

Les principales données utilisées dans ce travail sont mises à notre disposition par l'Agence du Bassin Hydraulique du Sebou (ABHS):

- la pluviométrie de la station de Dar Al Arsa entre 1973 et 2015 ;
- le débit selon le bilan de barrage d'Allal El Fassi entre 1971 et 2013.

Les méthodes utilisées dans ce travail sont la loi de Racine Gumbel pour l'interprétation des précipitations et la loi régulière - logarithme de Ln-Normale pour étudier la distribution annuelle de la fréquence en fonction de débit.



On a choisi la loi de Racine Gumble car leurs coefficients de symétrie de la distribution sont égaux à 1,18, alors que le choix de la loi régulière - logarithme de Ln-Normale été basé sur le coefficient de symétrie 0,65.

### 3. Résultats et discussions

#### 3-1- La fluctuation annuelle des précipitations à la station entre 1973 et 2015

Les précipitations annuelles à la station Dar Al-Arsa entre 1973 et 2015 montrent des variations de 200 à 900 mm/an (Figure 1).

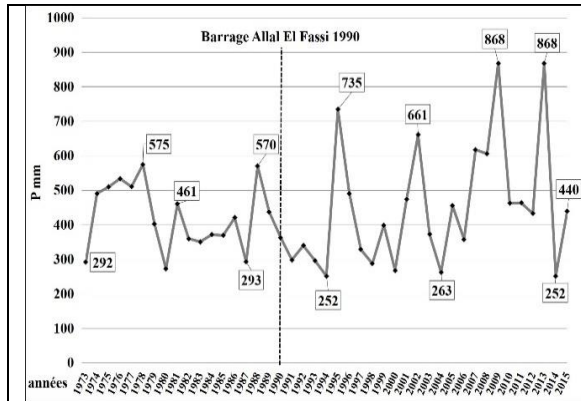


Figure (2): Précipitation annuelle à la station Dar Al-Arsa entre 1973 et 2015.

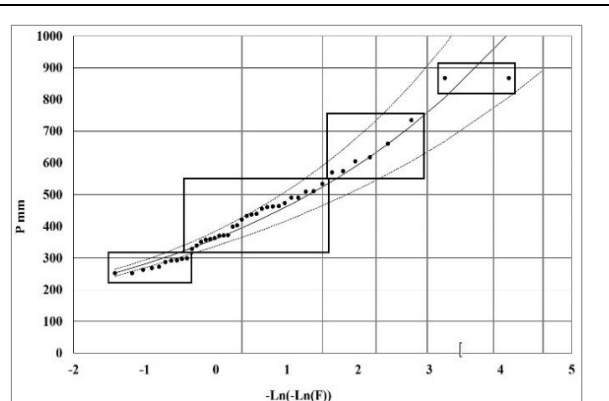


Figure (3): Répartition des précipitations entre 1973 et 2015 selon la loi Racine-Gumbel.

Elles caractérisent deux phases importantes, la première avant la construction du barrage d'Allal Al Fassi entre (1973-1990), où les précipitations variaient de la plus grande quantité de 575 mm en 1977 à la plus faible de 273 mm en 1980, ce qui met en évidence le manque des précipitations durant cette phase. La deuxième phase après la construction du barrage, où de fortes variations des précipitations étaient produites, de la plus faible quantité de 252 mm en 1994 et 2014 à la plus grande de 868 mm en 2009 et 2013. Ce qui met en évidence la disponibilité des ressources en eau, l'abondance et éventuellement l'apparition des inondations (figure 2).

Les années humides de 868 mm sont 2009 et 2013, alors que les années à faible humidité de 252 mm sont 1994 et 2014. Nous avons choisi la loi de Racine Gumble car le coefficient de symétrie de la distribution est égal à 1,18, le graphique de l'analyse statistique de cette série est divisé en quatre catégories :

- La première catégorie se caractérise par deux années très humides : 2009 et 2013 ;
- La deuxième catégorie a connu 6 années humides : 1978, 1988, 1995, 2002, 2007 et 2008 ;
- La troisième catégorie a connu 25 ans d'humidité moyenne ;
- La dernière catégorie est considérée comme semi-aride, en raison de ses faibles précipitations pendant une période allant jusqu'à 10 ans.

#### 3-2- La Variabilité du débit annuel et la distribution de sa fréquence

Le débit annuel moyen exprime la quantité moyenne d'eau reçue par la station par an, l'étude de débit mesuré par emplacement, constitue un bon indicateur d'écoulement d'eau pendant l'année concernée (figure 4 et 5).

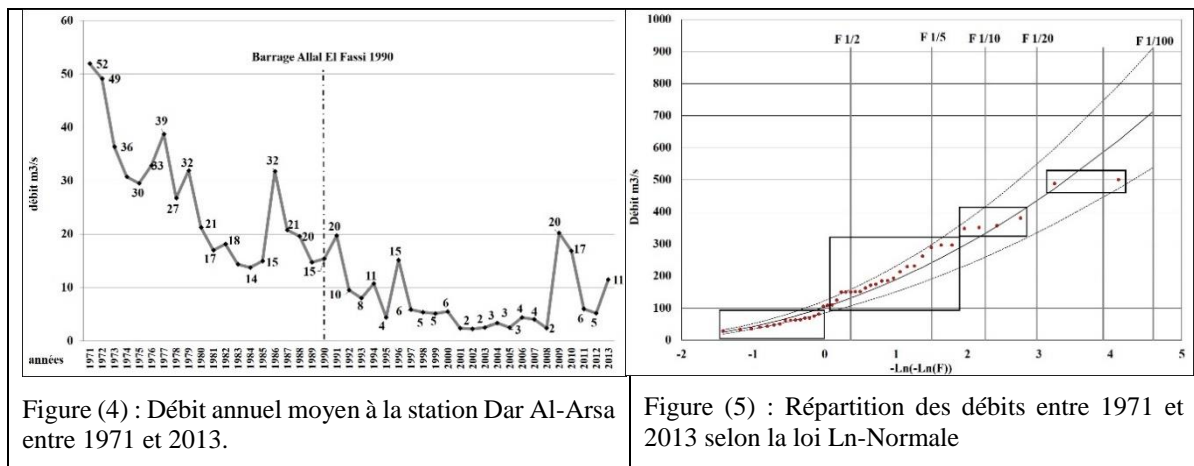


Figure (4) : Débit annuel moyen à la station Dar Al-Arsa entre 1971 et 2013.

Figure (5) : Répartition des débits entre 1971 et 2013 selon la loi Ln-Normale

L'effet du barrage Allal El-Fassi est évident depuis 1990. D'après les enregistrements des débits de la station de Dar Al-Arsa (K. El Ghalbi, 2001) et les données enregistrées dans la station, le débit marque deux périodes importantes :

- Avant la construction du barrage d'Allal Al-Fassi, entre 1971 et 1990 : Les débits de la station ne cessent pas de diminuer depuis 1971, de sorte que la station a connu un écoulement naturel, le débit moyen a varié entre une valeur minimum de 22 m³/s en 1978 et une valeur maximum de 43 m³/s en 1971;
- Après la construction du barrage d'Allal Al-Fassi, entre 1990 et 2013 : l'impact du barrage sur le débit était évident, car leur système hydrologique artificiel a enregistré une baisse relative des débits moyens pendant 34 ans. Le débit a enregistré une valeur inférieure de 2 m³/s en 2002 et une valeur supérieure de 25 m³/s en 1986.

Le barrage Allal Al-Fassi, créé en 1990, pour le but de produire de l'énergie, de détourner l'eau vers le barrage Idris I et de contrôler le débit entrant. L'effet du barrage est évident dans les registres des débits de la station de Dar Al Arsa, car ces débits entrant ont diminué dans la zone étudiée, ce qui met en évidence les sécheresses au niveau du cours d'eau (Figure 4). La vase du barrage alimente le cours d'eau pendant la période d'étiage et contribue à l'apparition d'inondations pendant la période inverse, exemple des inondations des années 2008, 2009 et 2010 du Moyen Sebou.

La représentation graphique (Figure 5) montre la distribution annuelle de la fréquence en fonction de débit (Figure 5), le choix de la loi régulière - logarithme de Ln-Normale est basé sur le coefficient de symétrie 0,65. Quatre classes étaient présentées :

- la première classe à très fort débit comprend deux années, une en 1972 avec un débit de 500 m³/s et l'autre en 1971 par un débit de 488 m³/s.
- la deuxième classe à fort débit comprend quatre années 1973, 1976, 1977 et 1979, où le débit varie entre une valeur minimale de 348 m³/s en 1973 et une valeur maximale de 380 m³/s en 1977.
- La troisième classe s'étend sur 22 ans avec un débit moyen compris entre 105 m³/s en 1992 et 296 m³/s en 1986.
- La quatrième classe, comprend 15 ans de faible débit, qui varie entre 28 m³/s en 2002, et 81 m³/s en 1993.

Pendant ces quatre classes, l'effet du barrage d'Allal Fassi est marqué par une diminution du débit depuis 1990.

### 3-3- Variation journalière des précipitations et du débit

L'étude de la distribution journalière des précipitations et de débit est d'une grande importance pour l'étude et la compréhension des phénomènes d'inondations et de sécheresses d'oued Sebou.

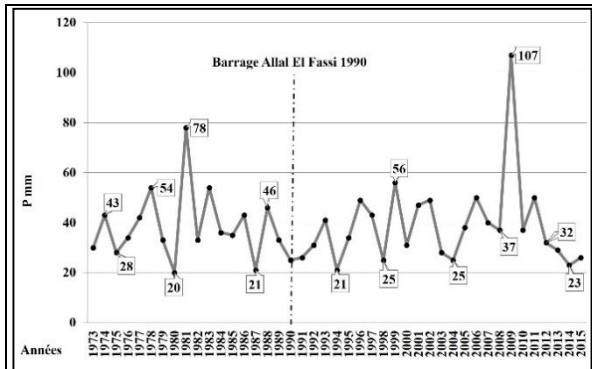


Figure (6) : Variabilité des précipitations journalières maximums selon les années entre 1973 et 2015

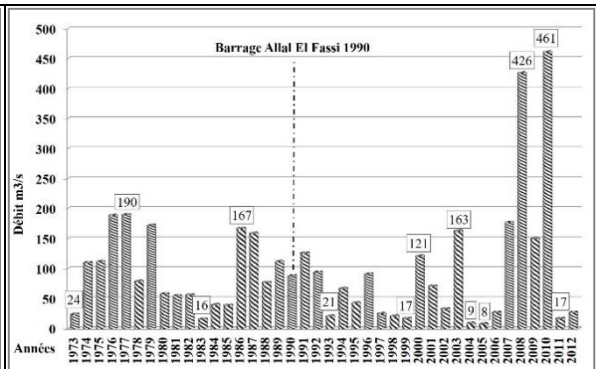


Figure (7) : Variation du débit journalier maximum selon les années entre 1973 et 2012

La variation des précipitations journalières maximums selon les années à la station de Dar Al-Arsa (Figure 6) présente une faible quantité de précipitation de 20 mm le 13 janvier 1980 et une forte quantité de 56 mm le 27 décembre 1999, qui donne des indications sur les années sèches de l'oued, avec exception de deux années de précipitation dépassant 60 mm, la première de 78 mm le 21 octobre 1981 et la deuxième de 107 mm le 30 novembre 2009, ce qui confirme la survenue d'inondations.

La disponibilité des données du débit journalier (Figure 7) au niveau de la station de Dar Al Arsa, nous a permis de les exploiter, l'étudier et l'analyser la distribution temporelle des valeurs maximales du débit en relation avec la maximale des précipitations journalières.

On conclut de cette étude que la station reçoit un fort débit journalier, pourrait être responsable des violentes inondations, Comme c'est le cas des années de ruissellement exceptionnel 1960, 2008, 2009 et 2010 et de déficit important pendant plusieurs années, dont nous citons 2005..

### Conclusion :

L'étude de la variabilité climatique, au cours de 42 années, montre que la station a connu des périodes pluviométriques excédentaires et déficitaires qui ont eu des répercussions importantes sur l'écoulement de surface. Le barrage Allal Al Fassi a un impact avant et après sa construction en 1990, il a contribué à la modification considérable du comportement hydrologique de l'oued Sebou. La station a enregistré de fortes précipitations la plupart des jours de l'année depuis 1973 jusqu'à 1990, la plus grande quantité est de 500 mm en 1977, et la plus basse est de 273 mm en 1980. Après la construction du barrage Allal Fassi, la plus faible quantité de précipitation est de 252 mm enregistrée en 1994 et 2014, et la plus grande de 868 mm enregistrée en 2009 et 2013.

Ces importantes précipitations ont entraîné un fort débit d'eau au niveau d'oued Sebou. Ainsi, la station a reçu un débit annuel moyen de 22 m<sup>3</sup>/s en 1978 comme plus faible débit, et 43 m<sup>3</sup>/s en 1971 avant la construction du barrage. Après la construction du barrage le débit a considérablement diminué d'une valeur de 2 m<sup>3</sup>/s comme valeur plus faible, par rapport à 25 m<sup>3</sup>/s en 1986. Cela indique la possibilité d'avoir des exceptions, le débit journalier le plus élevé a atteint 426 m<sup>3</sup>/s en 2008 et 461 m<sup>3</sup>/s en 2010, En conséquence, la survenue d'inondations. En revanche, il a enregistré une baisse significative, qui a confirmé la survenue de cas de sécheresse, comme le cas en 2005, où il a enregistré une valeur de 8 m<sup>3</sup>/s, et en 2004, où il a enregistré 9 m<sup>3</sup>/s, Avec une diminution significative des quantités de débit d'eau entrant dans

la zone étudiée, Cependant, il faut noter que la vase du barrage a conduit et peut conduire à des renversements importants, Il s'agit plutôt d'inondations exceptionnelles dans certains cas, comme ce qui s'est passé en 2008, 2009 et 2010, Par conséquent, les mesures et les précautions nécessaires doivent être prises afin de préparer la zone contre les risques naturels.

### **La bibliographie :**

- ABHS., (2008) : Crue du 10 octobre 2008 dans le haut Sebou. 8p.
- Ballais. J. L, Chave. S, Delorme Laurent V. et Esposito. Ch., (2007). Hydrogéomorphologie et inondabilité. L'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Article de Géographie physique et Quaternaire, 2007, vol. 61, no 1, pp. 75-84.
- Bouignane A., (2010). Sècheresse dans le Bassin versant de Sebou, état actuel et perspective. ABHS. 27p.
- El Ghachi. M, Aafir. M, Bouberria. A et Qadem. A., (2011): Analyse des tendances pluviométriques dans la ville de Taza dans un contexte de variabilité climatique. Faculté Polydisciplinaire de Taza, Filière de Géographie, (Maroc). pp. 1-15.
- El Ghachi. M., (2007) : La Seille : Un système fluvial anthropisé (lorraine, France). Tome 1. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université Paul Verlaine De METZ. 344p.
- El Ghalbi K., (2001). Impact du système hydraulique Allal El Fassi-Matmata-Idriss 1er sur le régime des crues du Sebou (Maroc). Mosella, revue du centre d'étude géographique de l'université de Metz. Actes du colloque Franco-Marocain. Eaux et Sociétés dans les montagnes du Maroc et des pays voisins. Fès 21-26 septembre 1999. Tome XXV. N°3-4. Pp. 389-398.
- El Khalki. Y, Benyoussef. A., (2005) : Crue et inondation de l'Oued el Handak : Genèse, Impact et Propositions d'Aménagement (Atlas de Beni Mellal). Centre d'Études et de Recherches Géographiques sur Tadla - Azilal et Espaces Oasiens, FLSH et FSTDST, Beni Mellal. Études de Géographie Physique, n° XXXII, 2005. pp. 47-61.
- Esposito. C., (2005). Cartographie des zones inondables par la méthode hydrogéomorphologique : principes, méthodes et exemple de mise en œuvre. CETE MéditerranéeLRNancy 13 Octobre 2005. 30p.
- Hida S, Probst J-L, Snoussi M. & Ait Fora A., (1999). Hydrologie et fluctuations hydroclimatiques dans le bassin du Sebou entre 1940 et 1994. Sciences et changements planétaires/sécheresse, 10, 3, p 221-226.
- Laborde. J.P., (2000) : Eléments d'hydrologie de surface. Université de Nice-Sophia Antipolis. « UMR5651" espace du CNRS. Équipe gestion et valorisation de l'environnement. 191p.
- Taous A. et Dadoun A., (2015). Espaces de mobilité hydrologique et impacts du barrage Allal el Fassi dans la vallée du Sebou en amont de Fès (en arabe). Actes du Colloque international « Géomatique et gestion des risques naturels ». Oujda, 6 – 8 mars 2012. pp. 45-60.
- Trambly Y., Badi W., Driouech F., El Adlouni S., Neppel L., Servat E., (2012). Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco, Global and Planetary change 82-83 (2012) 104-114.
- Yazami Ztait M, Samaa I, El Ghachi M, Taleb A, Ouali Alami F T., (2020). Ressources en eaux à la lumière de la variabilité climatique dans le moyen Sebou, entre les deux stations Azzaba et Dar El Arsa. Revue AfricanScientific Journal, Volume 3, Numéro 3, pp : 111-135.
- Yazami Ztait, Mohammed, et Taous Ali., (2020). "La variabilité climatique et son effet sur le ruissellement du Moyen Sebou, un modèle pour la station Dar Al-Arsa (Pré-Rif, Maroc)" Travaux de la conférence : climat, eau et société (CES'19). Université Sultan Moulay Suleiman, Faculté des Lettres et des sciences humaines, Beni Mellal. 69-74 p (en arabe).
- Yazami Ztait Mohammed., (2020). Géomorphodynamique fluviale et exploitation de l'espace fluvial dans le moyen Sebou, Aval Fès. Université de Sidi Mohamed Ben Abd-Allah, Faculté des Lettres Saiss-Fes. Thèse de doctorat 276 p (en arabe).
- Yazami Ztait, Mohammed, El Ghachi Mohamed et El Khalki Yahya., (2018). Les inondations et leur impact sur le Socio-Magali dans la vallée centrale du Sebou, le cas des groupes: « Al-Ouadaine, Ain Qansra et Ain Bouali », région de Moulay Yaacoub-Fès Travaux du symposium: climat, eau et société (CES'2015). Université Sultan Moulay Suleiman, Faculté des Lettres et des sciences humaines, Beni Mellal. 34-50 p (en arabe).