

## COMMENT INTRODUIRE DE LA « BONNE » INCERTITUDE DANS LES PROJECTIONS CLIMATIQUES ? VERS LA CONSTRUCTION D'UN « STRESS-TEST » CLIMATIQUE DANS LE BASSIN TRANSNATIONAL DE LA MEUSE.

GRELIER B. <sup>(1)</sup>, DROGUE G. <sup>(1)</sup>

(1) Laboratoire LOTERR UFR SHS, Université de Lorraine, Île du Saulcy, 57045 Metz Cedex 1, [benjamin.grelier@univ-lorraine.fr]

**Résumé** – L'étude rétrospective de la variabilité climatique contribue à maximiser la bonne incertitude dans l'exercice de scénarisation climatique. Cet article présente l'application d'une méthode simple liant la circulation atmosphérique et les variables climatiques de surface dans le but d'extrapoler la connaissance du climat dans le passé (jusqu'au minimum de Maunder) et dans un futur proche (XXI<sup>e</sup> siècle). Ceci permet de produire un grand nombre de scénarios climatiques vraisemblables formant le socle d'un « stress-test » climatique, dont l'objectif est d'évaluer la vulnérabilité hydrologique d'un bassin au changement climatique. Le calcul, sur toute la période d'étude (1659-2100) des anomalies mensuelles de précipitations et de température de l'air, montre que la connaissance du climat passé a une grande valeur informative, trop souvent négligée dans les études d'impact du changement climatique futur.

**Mots-clés** : changement climatique, variabilité interannuelle, test de résistance climatique, incertitude, Meuse.

**Abstract** – *How can we implement good uncertainty in climate projections? A contribution to a climate stress-test for the transnational Meuse basin.* Past analysis of climate variability is useful to maximize the good uncertainty when producing future climate projections. This paper presents the application of a simple method linking atmospheric circulation and surface climatic variables with the aim to extrapolate knowledge of climate in the past (until the Maunder minimum) and in the near future (21<sup>st</sup> century). This allows building a lot of plausible climatic scenarios, which form the basis of a climate "stress-test". Its objective is to assess the hydrologic vulnerability of a catchment to the climate change. Calculated on the whole period of interest (1659-2100), monthly precipitation and temperature anomalies show that the knowledge of past climate has a high informative value, which is not enough taken into account in the climate change impact studies.

**Keywords**: climate change, interannual variability, climate « stress-test », uncertainty, Meuse river.

### Introduction

Les projections climatiques du GIEC développées depuis deux décennies en vue d'évaluer l'évolution possible du climat sur la base de scénarios socio-économiques, ont une incertitude congénitale qui leur confère un pouvoir prédictif limité. La thèse défendue dans cet article s'inspire du constat de l'ineffectivité des politiques publiques face au changement climatique futur en raison du risque, jugé trop important par les acteurs publics, de se tromper en agissant (Prudhomme *et al.*, 2010). Ainsi, cet article vise à présenter une approche alternative à la méthode de scénarisation de type *top-down* habituellement adoptée pour les études d'impact du changement climatique futur sur l'hydrologie des bassins versants (e.g. Drogue *et al.*, 2010). L'originalité de notre approche réside dans l'utilisation d'une même variable de forçage atmosphérique (la pression atmosphérique réduite au niveau de la mer) pour calculer les variables de forçage climatique (précipitations et températures de l'air) des modèles d'impact hydrologique empiriques sur une période s'étendant du minimum de Maunder jusqu'à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. Cette période couvre la variabilité climatique récente et son évolution sous l'effet des nouveaux scénarios de forçage radiatif RCP mis en œuvre dans le cadre du 5<sup>e</sup> rapport d'avancement du GIEC (CMIP5). L'étude de l'aléa climatique à cette échelle de temps contribue à introduire de la bonne incertitude<sup>1</sup> dans les projections climatiques « proches » et « lointaines » car elle évite d'exclure de l'exercice de scénarisation des futurs climatiques possibles correspondant à une réplique des climats passés. S'il est admis par la communauté scientifique que ces répliques sont très peu probables (scénario de climat statique ou de refroidissement), ne pas les exclure procure à l'exercice de scénarisation climatique une plus grande neutralité vis-à-vis des scénarios climatiques produits par le GIEC

<sup>1</sup> « La bonne incertitude est celle que l'on voudrait maximiser pour ne pas exclure des futurs possibles. » (<http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/177>)

dans la mesure où ceux-ci sont repositionnés dans un cadre temporel plus large. De plus, l'approche multi-forçage des modèles d'impact hydrologiques permet d'améliorer la connaissance de la vulnérabilité hydrologique des bassins versants dans un contexte de changement climatique. Ceci contribue en retour, à renforcer la capacité adaptative du système de gestion du risque hydrologique grâce à l'évaluation de la robustesse de certaines mesures d'adaptation au changement climatique comme par exemple, la marge de sécurité.

## 1. Région d'étude

Le bassin transnational de la Meuse à Borgharen (NL) nous sert de terrain d'expérimentation. Il couvre une superficie d'environ 21.000 km<sup>2</sup> (Figure 1). Des exercices de scénarisation climatique antérieurs menés sur ce bassin ont conclu à une chute spectaculaire du débit d'étiage (François *et al.*, 2011) et à une évolution contradictoire des crues rares à l'horizon 2071-2100 (Leander et Buishand, 2008).

## 2. Données et méthodes

### 2.1. Circulation atmosphérique (variables de forçage)

Dans le but d'estimer la variabilité climatique en conditions passées et futures, différentes sources de données ont été utilisées (Tableau 1). Sur la base des travaux de Kastendeuch (2007) montrant une bonne corrélation entre la configuration du champ de pression mer et les précipitations/températures mensuelles sur l'Europe de l'Ouest, de longues séries de pression mer instrumentales et reconstruites ont été collectées sur une période s'étendant de 1659 à 2005. Parmi les sorties de modèles climatiques disponibles dans le cadre de l'expérimentation CMIP5, les champs de pression mer simulés par les modèles climatiques sous forçage RCP4.5 et RCP8.5 ont été sélectionnés pour la période future.

**Tableau 1.** Bases de données utilisées pour le calcul et la validation des descripteurs de la circulation atmosphérique.

Type	Source	Localisation	Période	Coordonnées géographiques
Observations	ECA&D	Maastricht (NL)	1906-1999	5°46E-50°54N
		Leeuwarden (NL)	1951-2014	5°45E-53°13N
		Bron (F)	1949-2000	4°56E-45°43N
		Wurzburg (D)	1949-2014	9°57E-49°46N
	Météo-France	Sainte-Adresse (F)	1967-2005	0°4E-49°30N
Reconstruction	Luterbacher et al. (2002)	Points de grille	1659-1999	5°E-50°N, 5°E-55°N, 5°E-45°N, 0°E-50°N, 10°E-50°N
Ré-analyses	ERA-Interim	Points de grille	1979-2005	5°E-50°N, 5°E-55°N, 5°E-45°N, 0°E-50°N, 10°E-50°N
Simulations	CMIP5 (tout modèle)	Points de grille	1979-2005 (run historique) 2006-2100 (runs RCP4.5 et 8.5)	5°E-50°N, 5°E-55°N, 5°E-45°N, 0°E-50°N, 10°E-50°N

### 2.2. Précipitations et températures de bassin mensuelles (variables-cibles)

Les longues séries mensuelles homogénéisées proviennent de postes d'observation historiques situés dans ou à proximité du bassin de la Meuse à Borgharen (Figure 1). La pondération de chaque poste d'observation par la méthode des polygones de Thiessen a



**Figure 1.** Bassin de la Meuse à Borgharen (près Maastricht) et implantation des postes d'observation climatologiques.

permis de déterminer une pluie de bassin et une température de bassin sur les périodes d'apprentissage respectives des deux paramètres climatiques : 1900-1999 pour les précipitations et 1906-1999 pour la température de l'air.

### 2.3. Elaboration du « stress-test » climatique

La méthodologie générale de construction du stress-test climatique est décrite sur la figure 2. Dans une optique hydrologique, les variables de forçage climatique d'un modèle d'impact sont en général les précipitations et la température de l'air quotidiennes, celles-ci étant utilisées pour déterminer une ETP de bassin. Les précipitations et les températures ont été simulées au pas de temps mensuel par une approche dynamique (de type fonction de transfert) sur toute la période d'étude (1659-2100). Les anomalies calculées sur cette période pluri-séculaire sont appliquées aux séries quotidiennes en temps présent (1980-1999) par la méthode des perturbations (dite aussi « méthode des anomalies » ou « méthode du delta »).

#### 2.3.1. Comparaison des séries climatiques instrumentales et des séries climatiques calculées

Les séries de pression mer de Luterbacher *et al.* (2002) et celles issues des réanalyses ERA-Interim ont été comparées avec les séries de pression mer observées aux stations météorologiques les plus proches des points de grille sur la période de tuilage 1980-1999 (Tableau 1). La corrélation entre séries temporelles s'avère excellente pour tous les mois de l'année ( $r > 0,96$ ), ce qui permet de considérer les séries de pression mer reconstituées comme robustes. Dans un second temps, une comparaison entre les séries de pression mer ERA-Interim et celles simulées par les modèles climatiques CMIP5 a été effectuée pour chaque point de grille. Une fonction de correction quantile-quantile (Dequé, 2005) est appliquée à la série de pression mer simulée en temps présent si un biais est diagnostiqué (Figure 2). Celle-ci est transposée en l'état pour débiaiser les séries de pression mer simulées en temps futur.

#### 2.3.2. Liaison circulation atmosphérique-variables climatiques

Cette liaison est inféodée à deux contraintes : la parcimonie (peu de prédicteurs) et le réalisme du prédicteur (celui-ci doit être bien simulé par les modèles de climat). En reprenant les conclusions analytiques de Kastendeuch (2007), les descripteurs de la circulation atmosphérique sélectionnés sont la pression mer ( $P_{mer}$ , généralement bien reproduite par les modèles de climat) au point central du bassin de la Meuse (5°E, 50°N) et les composantes X et Y du gradient de pression mer (GPM). Ces deux derniers sont déterminés comme suit :

$$X_{GPM} = (P_{mer(E)} - P_{mer(O)})/distance_{(est-ouest)} \quad (1)$$

$$Y_{GPM} = (P_{mer(N)} - P_{mer(S)})/distance_{(nord-sud)} \quad (2)$$

où les indices (E), (O), (S), (N), renvoient aux points de grille situés autour du point de grille central. La composante X du GPM est un indicateur de l'intensité du flux méridien (une valeur positive indique un flux de sud et une possible advection d'air tropical; une valeur négative indique un flux de nord et une possible advection d'air polaire). La composante Y du GPM est représentative de l'intensité du flux zonal (une valeur positive indique un flux d'est et une advection continental; une valeur négative indique un flux d'ouest et une advection maritime). La pression mer au point de grille central permet de différencier les mois dominés par des situations synoptiques de hautes pressions (circulation plutôt anticyclonique), de ceux dominés par des situations synoptiques de basses pressions (circulation plutôt cyclonique), des mois de marais barométrique où le gradient de pression mer est insignifiant. Les trois prédicteurs ont l'avantage d'être faiblement corrélés entre eux et apportent donc une information peu redondante.

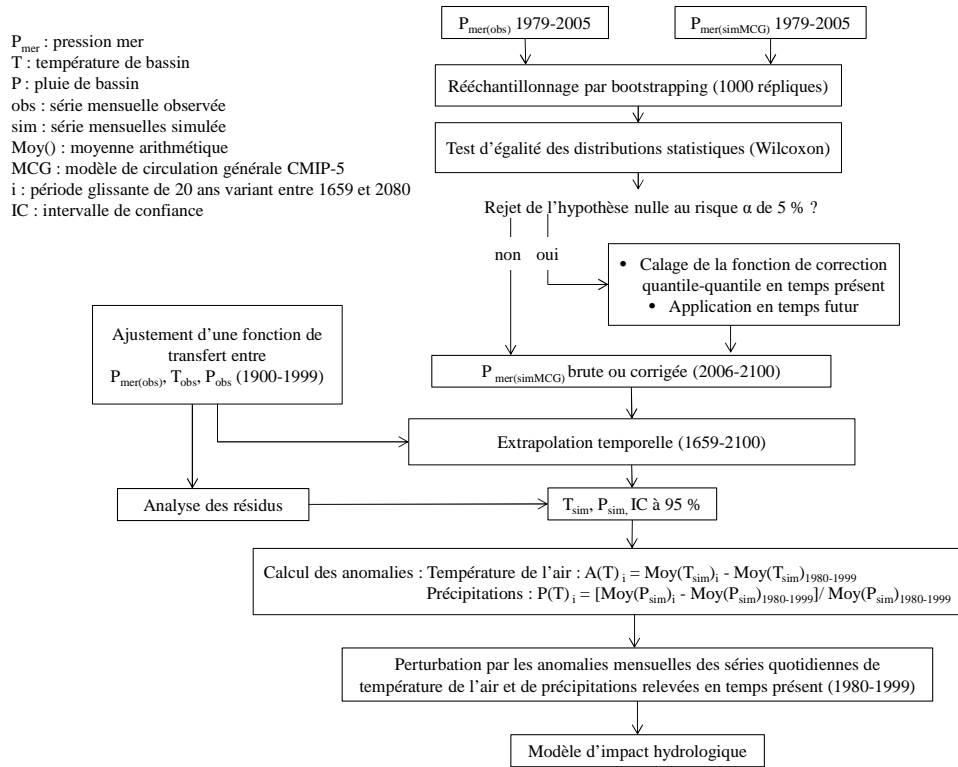


Figure 2. Méthodologie du stress-test climatique appliqué au bassin de la Meuse à Borgharen.

### 3. Résultats et discussion

Les résultats présentés se rapportent à la période DJF (avec un accent particulier sur le mois de janvier) en raison du fort risque d'inondation à cette période de l'année hydrologique dans le bassin de la Meuse. En simulation, seuls les résultats se rapportant au modèle CNRM-CM5 sont présentés dans le cadre de ce résumé étendu.

#### 3.1. Analyse multivariée

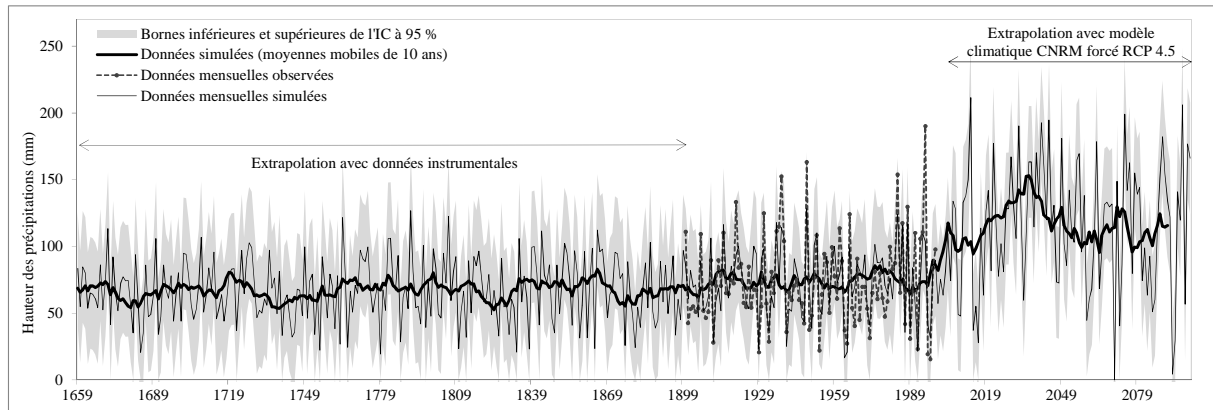
Les résultats révèlent une bonne corrélation entre séries temporelles observées et séries temporelles simulées (Tableau 2). Les scores de variance expliquée se situent autour de 65 % ce qui est plutôt encourageant en regard du faible pouvoir explicatif d'autres indices de circulation atmosphérique comme la NAO (Lavers *et al.*, 2013) ou l'AMO. Un test d'apprentissage/validation sur la période de mesure permet de conclure à une bonne transposabilité temporelle de la fonction de transfert liant prédicteurs atmosphériques et variables climatiques de surface (non montré). Cette fonction de transfert peut donc être utilisée avec confiance pour extrapoler les variables climatiques dans le passé et le futur proche.

**Tableau 2.** Résultats de l'analyse multivariée entre la pression mer et les précipitations/températures de l'air mensuelles pour les mois d'hiver DJF. Bassin de la Meuse à Borgharen. RMCE : racine carrée de la moyenne des carrés des écarts. Les valeurs en gras désignent les prédicteurs significatifs pour un risque  $\alpha$  de 5%.

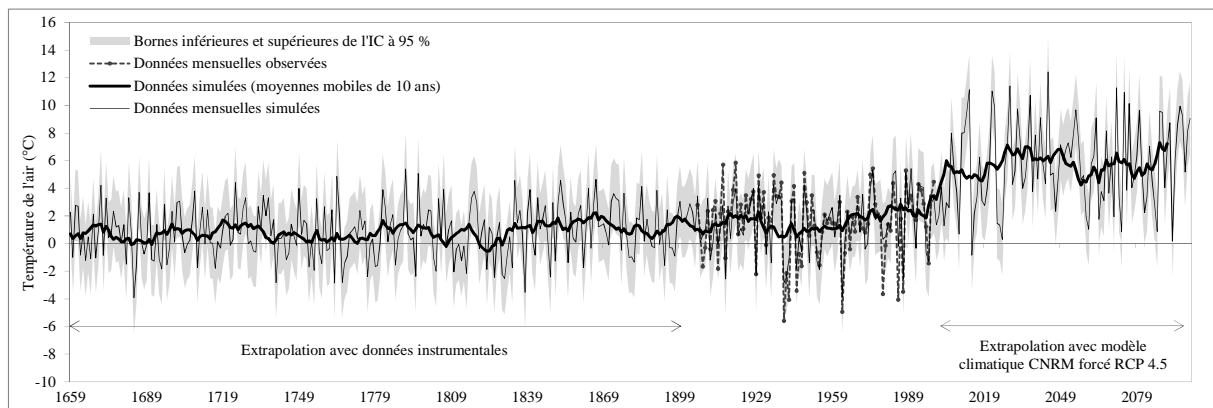
Variables	Mois	r	Variance expliquée (%)	RMCE	Coefficients normalisés		
					X	Y	$P_{mer}$ point central
Précipitations (1900-1999)	D	0.78	61	26.3	-0.20	<b>-0.51</b>	<b>-0.53</b>
	J	0.77	59	21.7	-0.12	<b>-0.52</b>	<b>-0.54</b>
	F	0.83	69	18.9	-0.15	<b>-0.52</b>	<b>-0.61</b>
Température de l'air (1906-1999)	D	0.78	62	1.2	<b>0.35</b>	<b>-0.75</b>	0.11
	J	0.85	72	1.3	<b>0.26</b>	<b>-0.81</b>	0.00
	F	0.79	62	1.7	<b>0.23</b>	<b>-0.77</b>	<b>0.16</b>

### 3.2. Calcul et extrapolation des anomalies climatiques

Les projections du mois de janvier données par le modèle climatique CNRM-CM5 forcé à l'aide du scénario RCP 4.5 montrent une augmentation généralisée au cours du XXI<sup>e</sup> siècle tant pour les précipitations (Figure 3) que pour la température de l'air (Figure 4). La moyenne décennale des précipitations de janvier pourrait augmenter significativement au cours du XXI<sup>e</sup> siècle pour atteindre 150 mm (avec des valeurs mensuelles maximales de 210 mm) alors qu'elle est restée stationnaire depuis le minimum de Maunder (autour de 70 mm).

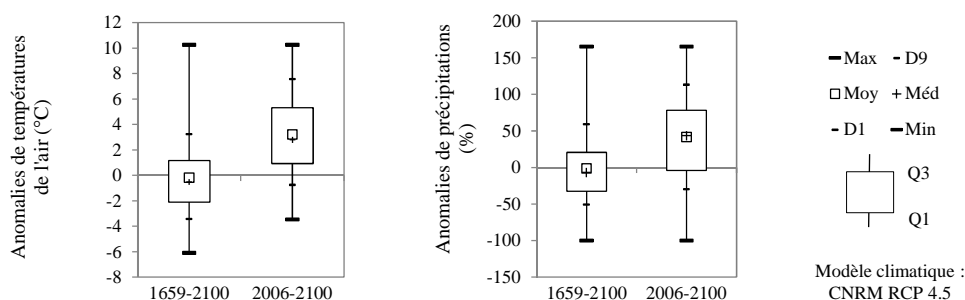


**Figure 3.** Estimation des hauteurs de précipitations du mois de janvier dans le bassin de la Meuse à Borgharen depuis le minimum de Maunder jusqu'à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle.



**Figure 4.** Estimation de la température de l'air du mois de janvier dans le bassin de la Meuse à Borgharen depuis le minimum de Maunder jusqu'à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle.

En ce qui concerne la température de l'air, la période historique montre une variabilité interannuelle marquée, avec des décennies consécutives parfois contrastées (e.g. de +1,4 °C pour 1816-1825 à -0,6 °C pour 1823-1832), ainsi que la stationnarité de la température du mois de janvier. La moyenne décennale de la température de l'air se situe autour de 7,3 °C pour le XXI<sup>e</sup> siècle (valeur mensuelle maximale de 12,4°C), soit une hausse de 3,8 °C par rapport à la période de référence 1980-1999. Les distributions statistiques des anomalies calculées pour le mois de janvier selon les deux approches (approche *top-down* et approche robuste) sont présentées sur la figure 5. Si l'on considère la simulation climatique du modèle CNRM-CM5 forcé RCP 4.5, les anomalies sont très majoritairement positives, avec la moitié des valeurs se situant entre 0,9 et 5,3°C pour la température de l'air et entre -4 et 78 % pour les précipitations. Selon ce scénario du GIEC, le climat futur le plus probable du mois de janvier serait donc un climat plus humide et plus chaud que l'actuel. Si l'on considère les anomalies calculées en intégrant la période historique dans les calculs, le spectre de futurs thermiques s'élargit et le changement est moins univoque sur les précipitations.



**Figure 5.** Anomalies mensuelles de précipitations et de température de l'air calculées par rapport à la moyenne 1980-1999. Mois de janvier, bassin de la Meuse à Borgharen.

## Conclusion

Pour répondre aux attentes des gestionnaires de l'eau vis-à-vis de la connaissance de l'aléa climatique, une méthode simple liant la circulation atmosphérique (décrite avec seulement deux voire trois descripteurs quantitatifs) et les variables climatiques de surface a été testée. Cette méthode, qui pourrait intégrer d'autres prédicteurs atmosphériques, jette les bases d'un stress-test climatique qui combine la variabilité climatique en temps passé et futur pour forcer le modèle d'impact hydrologique et évaluer la robustesse des stratégies d'adaptation au changement climatique. Les conclusions de cette étude ouvrent la perspective de définir un volet changement climatique au sein des documents de planification et de gestion du risque d'inondation (les PAPI en France) au sein du bassin transnational de la Meuse.

## Remerciements

Météo-France, le projet ECA&D, le CEPMMT, le KNMI, le service météorologique de l'aéroport de Luxembourg, l'ASTA, Jürg Luterbacher, le projet CMIP5, Albin Ullmann (CRC-Université de Bourgogne).

## Références bibliographiques

- Déqué, M., 2007 : Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, **57**, 16-26.
- Drogue G. (Ed.), Fournier M., Bauwens A., Buiteveld H., Commeaux F., Degré A., de Keiser O., Detrembleur S., Dewals B., François D., Guilmin E., Hausmann B., Hissel F., Huber N., Lebaut S., Losson B., Kuefeld M., Nacken H., Piroton M., Pontégnie D., Sohler C., Vanneuville W., 2010 : *Analysis of climate change, high-flows and low-flows scenarios on the Meuse river basin*. Rapport d'étape des actions 1 et 3 du WP1 "Impacts of future floods and low flows" du projet INTERREG IV B AMICE, 69 p. + annexes.
- François D., Drogue G., Commeaux F., 2011 : Évolution des débits d'étiage de la Meuse en France au cours du XXIème siècle. *Revue Géographique de l'Est*, **51**, 15 p. (<http://rge.revues.org/3416>).
- Kastendeuch P.P., 2007 : Pressure gradient force, atmospheric circulation and climate in western Europe (1899–2002). *International Journal of Climatology*, **27**, 15, 2055–2067.
- Lavers D., Prudhomme C., Hannah D.M., 2013 : European precipitation connections with large-scale mean sea-level pressure (MSLP) fields. *Hydrological Sciences Journal*, **58**, 310-327, DOI 10.1080/02626667.2012.754545
- Leander R., Buishand 2008 : Estimated changes in flood quantiles of the river Meuse from resampling of regional climate model output. *Journal of Hydrology*, **351**, 331-343.
- Luterbacher J., Xoplaki E., Dietrich D., Rickli R., Jacobeit J., Beck C., Gyalistras D., Schmutz C., Wanner H. 2002 : Reconstruction of sea level pressure fields over the Eastern North Atlantic and Europe back to 1500. *Climate Dynamics*, **18**, 545-561, DOI 10.1007/s00382-001-0196-6.
- Prudhomme C., Wilby R.L., Crooks S., Kay A.L., Reynard N.S., 2010 : Scenario-neutral approach to climate change impact studies: application to flood risk. *Journal of Hydrology*, **390**, 198-209.