

TENDANCES HYDROCLIMATIQUES DANS LE SUD-OUEST DE LA ROUMANIE ENTRE 1961 ET 2009

PRĂVĂLIE R.⁽¹⁾, MITOF I.⁽¹⁾, ZAHARIA L.⁽¹⁾, BANDOC G.⁽¹⁾

(1) Université de Bucarest, Faculté de Géographie, 1 rue Nicolae Bălcescu, 010041, Bucarest, Roumanie [pravalie_remus@yahoo.com; iulian.mitof@yahoo.com; zaharialili@hotmail.com; geobandoc@yahoo.com]

Résumé - Cette étude a pour but d'identifier les tendances hydroclimatiques durant la période 1961-2009 et la relation entre la variation de certains paramètres climatiques et hydrologiques, dans le sud-ouest de la Roumanie. Pour l'analyse des tendances, nous avons utilisé les tests statistiques Mann-Kendall/Sen's slope, et pour l'évaluation des corrélations, les tests Spearman et Student. Les résultats montrent une augmentation générale des valeurs annuelles du déficit climatique d'humidité, responsable d'une diminution générale des écoulements. À l'échelle saisonnière, la même situation se retrouve au printemps, en hiver et en été, tandis qu'en automne, la situation est généralement opposée. Les corrélations statistiques ont indiqué, en général, une liaison relativement étroite entre les paramètres hydroclimatiques ; les situations avec des corrélations faibles peuvent être expliquées par l'action d'autres facteurs (particulièrement anthropiques) qui ont influencé les écoulements dans les dernières décennies.

Mots-clés : tendances, paramètres hydroclimatiques, Mann-Kendall, Sen's slope, corrélations, le sud-ouest de la Roumanie.

Abstract - *Hydroclimatic trends in south-western Romania between 1961 and 2009.* This paper aims to identify hydroclimatic trends between 1961 and 2009, and the relationship between the variation of certain climatic and hydrological parameters in south-western Romania. The paper is based on statistical analyses of climatic and hydrological data series. For the trend analysis the Mann-Kendall / Sen's slope statistical tests were used, and for correlation assessment, the Spearman and Student tests. The results showed a general increase in annual values of the climatic water deficit, responsible for an overall streamflow decrease. Seasonally, the same was found for spring, winter and summer, while in autumn the opposite is generally valid. The statistical correlations generally indicated relatively close connections between the hydroclimatic parameters; the instances of weak correlations can be explained by the action of other factors (mainly anthropogenic) influencing the streamflow over recent decades.

Keywords: trends, hydroclimatic parameters, Mann-Kendall, Sen's slope, statistical correlations, south-western Romania.

Introduction

Le climat est le facteur de contrôle majeur de l'écoulement des rivières. Par conséquent, la variabilité et les changements climatiques auront des effets sur les paramètres hydrologiques et les régimes des rivières, avec des conséquences sociétales et environnementales. De cette façon, l'écoulement des rivières a diminué dans quelques régions du Globe, comme le sud et le sud-est de l'Europe, les territoires étendus de l'Afrique, l'est et le sud-est de l'Asie, ainsi que l'est de l'Australie, à cause de la baisse de la pluviosité (Dai *et al.*, 2009). Dans d'autres régions, telles que le nord de l'Eurasie, le nord de l'Amérique du Nord, le sud de l'Amérique du Sud et l'est africain, l'augmentation des quantités de précipitations a engendré des écoulements plus abondants (Peterson *et al.*, 2002 ; IPCC, 2007).

Dans le contexte de réchauffement du système climatique, admis comme « sans équivoque » (IPCC, 2013), la perturbation de la normalité des régimes hydrologiques représente un autre effet important des changements climatiques. Les débits élevés produits plus précocement pendant le printemps, suite à la fonte plus rapide de la neige dans les zones d'alimentation des rivières, représentent un bon exemple de la modification du régime d'écoulement (Cayan *et al.*, 2001 ; Barnett *et al.*, 2005 ; Zaharia & Gălie, 2007 ; Bîrsan *et al.*, 2014).

À l'échelle de la Roumanie, dans le dernier demi-siècle, on a constaté des tendances de diminution des débits des rivières, notamment pendant les saisons printemps-été, et d'accroissement en automne-hiver (Bîrsan *et al.*, 2012 ; Bîrsan *et al.*, 2014). L'amplification des écoulements est dû à la hausse des températures en hiver (avec des conséquences sur la transformation plus intense des précipitations de l'état solide à l'état liquide) et aux pluies plus abondantes en automne, tandis que la diminution des débits au printemps et en été peut s'expliquer par l'amincissement de la couche de neige en hiver (qui alimente les rivières au printemps) et l'augmentation de l'évaporation en été (Bîrsan *et al.*, 2014).

Ce travail a pour but d'identifier les tendances hydroclimatiques et les relations entre la variabilité de quelques paramètres climatiques et hydrologiques dans le sud-ouest de la Roumanie de 1961 à 2009. Étant donné qu'il s'agit d'une région essentiellement agricole, elle est particulièrement sensible aux changements hydroclimatiques, d'où l'intérêt d'une telle étude.

1. Zone d'étude, données et méthodologie

L'étude porte sur une surface d'environ 2780 km² qui correspond à deux bassins hydrographiques situés au sud-ouest de la Roumanie (Fig. 1a) : Drincea (735 km²) et Desnățui (2044 km²). Leurs secteurs inférieurs s'étalent dans la Plaine Roumaine et ceux supérieurs dans le Piémont Gétic (Fig. 1b).

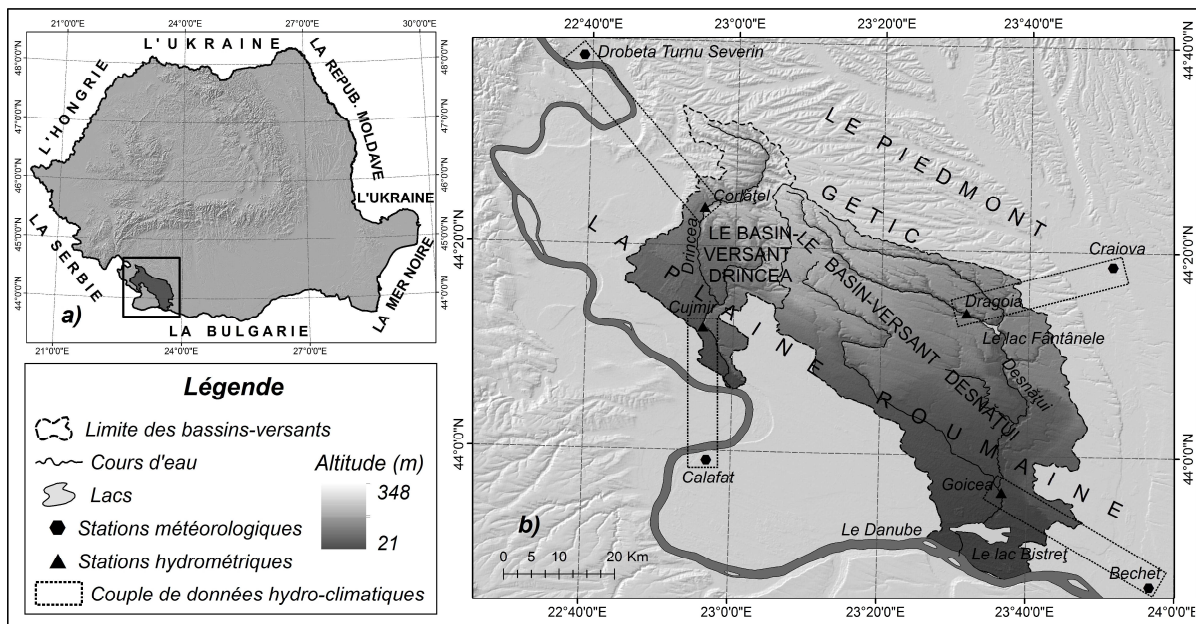


Figure 1. Localisation de la zone d'étude en Roumanie (a) et carte du relief (b).

Du point de vue climatique, la zone étudiée est soumise aux influences océaniques et méditerranéennes, qui engendrent des températures plus élevées et des précipitations plus abondantes par rapport à d'autres zones du sud de la Roumanie. Les températures moyennes pluriannuelles sont de 11-12 °C, alors que les quantités de précipitations annuelles varient entre 500 et 670 mm (Prăvălie *et al.*, 2014). En ce qui concerne le bilan climatique d'humidité (la différence entre précipitations et évapotranspiration), celui-ci est déficitaire, avec des valeurs moyennes pluriannuelles allant, en général, de -200 à -250 mm (Păltineanu *et al.*, 2007).

Les principaux cours d'eau, Drincea et Desnățui, présentent des débits moyens pluriannuels inférieurs à 3 m³/s (Savin, 2008). Étant donné qu'il s'agit de rivières autochtones faiblement influencées par des aménagements (sauf la station de Goicea, située en aval d'un barrage réservoir), l'écoulement est essentiellement contrôlé par le climat régional qui, à cause des valeurs déficitaires du bilan d'humidité, favorise le stress climatique sur le régime d'écoulement.

L'étude se repose principalement sur deux catégories de données : climatiques et hydrologiques. Les données climatiques sont représentées par les températures moyennes mensuelles (°C) et les quantités mensuelles de précipitations (mm) sur la période 1961-2009, obtenues à quatre stations météorologiques régionales (Drobeta Turnu-Severin, Calafat, Craiova et Bechet) (Fig. 1b) et issues de la base de données ECA&D (Klein Tank *et al.*, 2002)

et de l'Administration Nationale de Météorologie (ANM). Ces données ont été utilisées pour le calcul du *Bilan Climatique d'Humidité* (mm) – BCH, déterminé comme la différence entre les valeurs des précipitations (P) et celles de l'évapotranspiration potentielle (ETP), calculées par la méthode Thornthwaite (Thornthwaite, 1948), ($BCH = P - ETP$).

Les données hydrologiques incluent des débits liquides moyens (m^3/s) – Q, sur la même période (1961-2009), enregistrés à quatre stations hydrométriques : Corlăţel et Cujmir sur Drincea, Dragoia et Goicea sur Desnăţui. Ces valeurs sont issues de l'Administration Nationale "Eaux Roumaines", Administration du Bassin-Versant Jiu (ABJ).

Au point de vue méthodologique, l'étude englobe deux étapes : 1) l'identification et l'analyse des tendances BCH et Q et 2) l'analyse des corrélations statistiques établies entre les séries de données des deux paramètres.

L'identification des tendances a été réalisée à l'aide du logiciel Excel MAKESENS (Salmi *et al.*, 2002), qui utilise le test Mann-Kendall (pour la détection des tendances et de leur signification statistique) et la méthode Sen's slope (pour l'estimation de la magnitude des tendances). Cette analyse a été effectuée à l'échelle annuelle, saisonnière (hiver, printemps, été et automne) et mensuelle, pour les deux catégories de données.

La méthode des corrélations statistiques a permis la quantification des liaisons entre la variabilité climatique et celle hydrologique (à l'échelle annuelle, saisonnière et mensuelle). Dans ce but, nous avons déterminé et analysé le coefficient de corrélation des rangs Spearman pour l'estimation de l'intensité des liaisons et nous avons appliqué le test Student pour l'évaluation de la signification statistique des corrélations (Dragomirescu, 1998). La méthode Spearman a été choisie car les séries de données ne sont pas des distributions normales. Le couplage des données climatiques avec celles hydrologiques, en vue de la quantification du degré de corrélation, a été réalisé en fonction de la moindre distance entre les stations météorologiques et hydrométriques ; de cette manière, quatre couples de données hydroclimatiques ont été créés : Drobeta Turnu-Severin – Corlăţel, Calafat – Cujmir, Craiova – Dragoia et Bechet – Goicea (Fig. 1b).

2. Résultats

L'analyse des tendances des valeurs annuelles du BCH et du Q moyen met en évidence des diminutions générales pour les deux paramètres (Tab. 1). Dans le cas du BCH, nous avons constaté une augmentation du déficit d'humidité, qui atteint un taux négatif maximal de -2,5 mm/an à Drobeta, ou de -121,5 mm sur les 49 années, si l'on considère le changement net sur la période entière. Quant aux débits, le taux négatif maximal observé atteint -0,012 $m^3/s/an$ à la station de Cujmir (Tab. 1), ce qui se traduit par une réduction nette (sur la période entière) des débits enregistrés à cette station de 0,59 m^3/s .

À l'échelle saisonnière, la situation hausse du déficit d'humidité – baisse de l'écoulement se fait remarquer notamment au printemps par des tendances négatives maximales (de tout le contexte saisonnier) à la station météorologique de Drobeta Turnu-Severin pour le BCH (-1,66 mm/an, ou -81 mm sur les 49 années), et à la station hydrométrique de Cujmir pour les débits (-0,018 m^3/an , respectivement -0,88 m^3/s sur les 49 années). En hiver et en été, les tendances générales de diminution du BCH se maintiennent, mais avec des tendances contraires (d'augmentation) de l'écoulement à deux stations hydrométriques. En automne, on remarque une situation opposée pour les tendances du BCH (accroissement jusqu'à 65 mm sur les 49 années à Calafat), mais pour les débits, les tendances sont similaires à celles identifiées pendant les saisons d'hiver et d'été (diminution à deux stations) (Tab. 1).

À l'échelle mensuelle, la situation est plus hétérogène (Tab. 1). En analysant la signification statistique des tendances, on constate un niveau de confiance généralement plus élevé pour les écoulements par rapport au BCH (Tab. 1).

Tableau 1. Caractéristiques des tendances hydroclimatiques à l'échelle annuelle, saisonnière et mensuelle, aux stations climatiques et hydrométriques analysées, issues du test Mann-Kendall et de la méthode Sen's slope

Échelle temporelle	Mann-Kendall / Sen's slope	Bilan climatique d'humidité – BCH (mm)				Débit – Q (m ³ /s)				
		Drobeta	Calafat	Craiova	Bechet	Corlăţel	Cujmir	Dragoia	Goicea	
SAISONNIÈRE	ANNUELLE	<i>Sen's slope</i>	-2,479	-0,149	-2,420	-1,087	-0,003	-0,012	-0,007	-0,003
		<i>Signific.</i>	+	-	*	-	-	**	**	-
	Hiver	<i>Sen's slope</i>	-0,713	-0,404	-0,324	-0,540	0,002	-0,007	-0,002	0,008
		<i>Signific.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
	Printemps	<i>Sen's slope</i>	-1,660	-1,160	-0,896	-0,513	-0,007	-0,018	-0,010	-0,010
		<i>Signific.</i>	**	**	-	-	*	***	**	-
	Été	<i>Sen's slope</i>	-0,666	0,059	-0,953	-0,896	0,001	-0,008	-0,002	0,007
		<i>Signific.</i>	-	-	-	-	-	*	*	-
	Automne	<i>Sen's slope</i>	0,369	1,335	0,798	0,536	0,001	-0,006	-0,001	0,021
		<i>Signific.</i>	-	+	-	-	-	**	-	**
	Janvier	<i>Sen's slope</i>	-0,130	-0,152	-0,053	0,012	0,003	-0,004	-0,001	0,015
		<i>Signific.</i>	-	-	-	-	*	-	-	-
Février	<i>Sen's slope</i>	-0,658	-0,541	-0,457	-0,244	-0,004	-0,016	-0,010	-0,005	
	<i>Signific.</i>	*	*	*	-	-	*	*	-	
Mars	<i>Sen's slope</i>	-0,716	-0,467	-0,213	-0,182	-0,009	-0,022	-0,013	-0,018	
	<i>Signific.</i>	+	-	-	-	*	***	**	-	
Avril	<i>Sen's slope</i>	-0,146	-0,206	-0,255	-0,142	-0,001	-0,011	-0,006	0,008	
	<i>Signific.</i>	-	-	-	-	-	**	**	-	
Mai	<i>Sen's slope</i>	-0,702	-0,438	-0,431	-0,269	-0,002	-0,010	-0,004	0,003	
	<i>Signific.</i>	-	-	-	-	-	**	*	-	
Juin	<i>Sen's slope</i>	0,028	-0,343	-0,448	-0,379	-0,001	-0,012	-0,004	-0,002	
	<i>Signific.</i>	-	-	-	-	-	**	***	-	
Juillet	<i>Sen's slope</i>	-0,487	0,096	-0,424	-0,129	0,001	-0,006	-0,002	0,010	
	<i>Signific.</i>	-	-	-	-	+	*	-	-	
Août	<i>Sen's slope</i>	-0,194	0,527	-0,277	-0,318	0,002	-0,006	-0,001	0,020	
	<i>Signific.</i>	-	-	-	-	**	*	-	**	
Sept.	<i>Sen's slope</i>	0,577	0,671	0,464	0,469	0,001	-0,006	-0,002	0,023	
	<i>Signific.</i>	-	*	+	-	-	*	*	**	
Octobre	<i>Sen's slope</i>	0,008	0,410	0,474	0,404	0,001	-0,005	-0,001	0,025	
	<i>Signific.</i>	-	-	-	-	-	*	-	**	
Nov.	<i>Sen's slope</i>	-0,071	-0,126	-0,217	-0,364	0,001	-0,008	-0,002	0,017	
	<i>Signific.</i>	-	-	-	-	-	**	-	*	
Déc.	<i>Sen's slope</i>	-0,005	0,035	-0,008	-0,150	0,001	-0,004	-0,002	0,009	
	<i>Signific.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	

Les signes "+", "*", "**", "***" et "****" indiquent la signification statistique au seuil α de 0,1, 0,05, 0,01 et 0,001, respectivement ; "-" indique l'absence de signification statistique. Les valeurs négatives du *Sen's slope* indiquent des tendances à la baisse, et celles positives, des tendances à la hausse.

En ce qui concerne la similarité des sens des tendances hydroclimatiques (soit positif, soit négatif), en considérant les 17 couples (annuel, 4 saisons, 12 mois), nous avons constaté qu'il y a concordance des sens dans 53% des cas (pour les couples de données Drobeta Turnu-Severin – Corlăţel et Bechet – Goicea), 59% (Calafat – Cujmir) et 82% (Craiova – Dragoia).

L'analyse des corrélations statistiques a indiqué, en général, la liaison évidente entre les deux séries de données. Pour les données annuelles, des relations étroites ont été observées à trois des quatre couples hydroclimatiques (la plus forte corrélation étant pour Craiova–Dragoia, avec un coefficient Spearman de 0,54), vu les niveaux de signification hauts et très hauts (Fig. 2).

À l'échelle saisonnière, les relations statistiques les plus évidentes ont été identifiées pour le printemps et l'été, quand les coefficients Spearman obtenus ont indiqué des valeurs allant de 0,28 à 0,51, statistiquement significatives à des seuils élevés et très élevés (Fig. 2). Même dans ce cas-là, le couple Craiova–Dragoia présente les plus fortes liaisons statistiques, étant

suivi par le couple Calafat–Cujmir. En régime mensuel, la situation présente une dynamique plus accentuée, mais comme attendu, les mois de printemps-été enregistrent les valeurs les plus élevées des coefficients Spearman (Fig. 2).

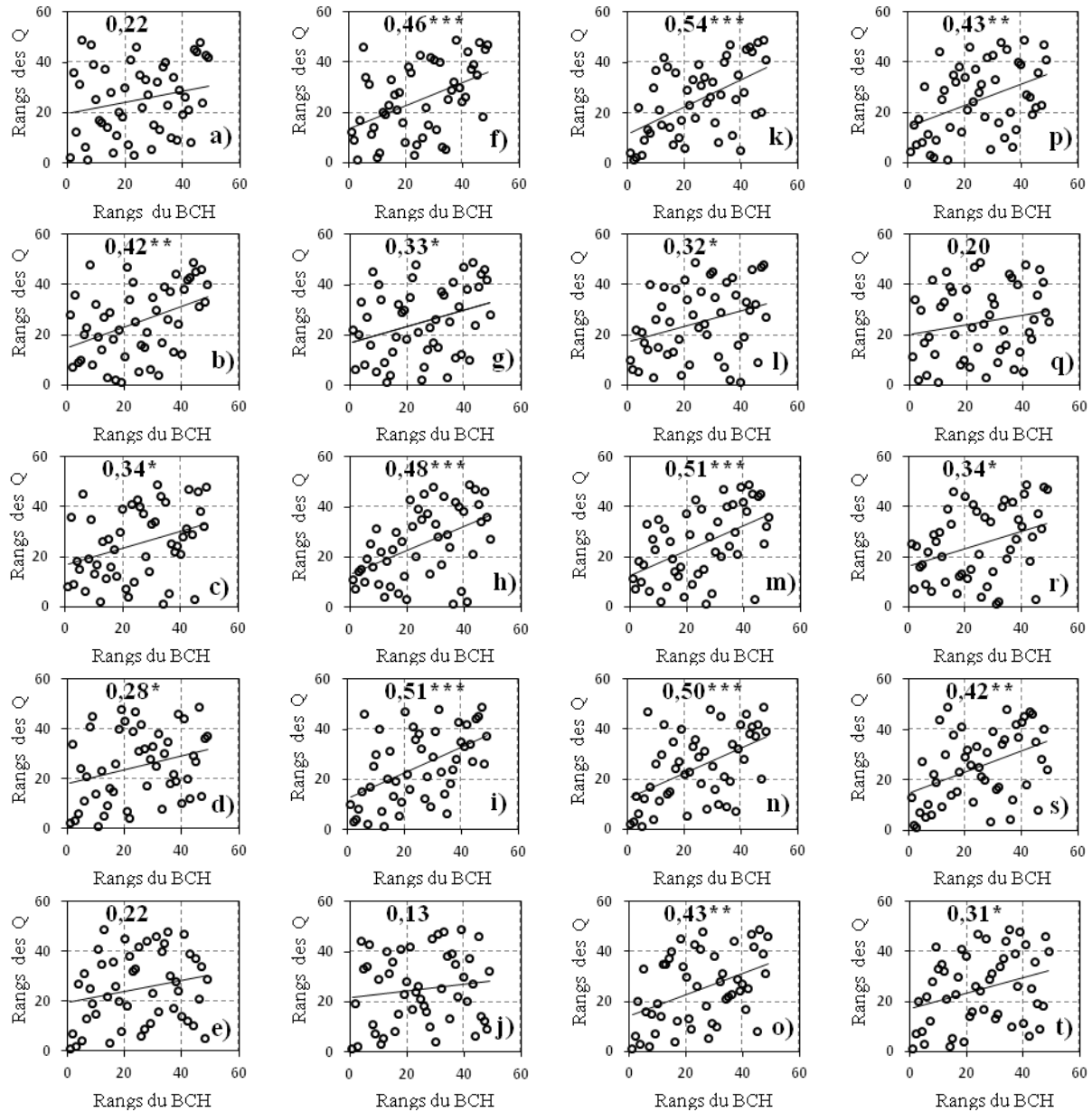


Figure 2. Corrélations entre les rangs Spearman du bilan climatique d’humidité (BCH) et ceux des débits écoulés (Q), pour les couples de données Drobeta Turnu-Severin – Corlăţel (a – annuel, b – hiver, c – printemps, d – été, e – automne), Calafat – Cujmir (f – annuel, g – hiver, h – printemps, i – été, j – automne), Craiova – Dragoia (k – annuel, l – hiver, m – printemps, n – été, o – automne) et Bechet – Goicea (p – annuel, q – hiver, r – printemps, s – été, t – automne) (période 1961-2009).

Note: les valeurs numériques de l’intérieur des graphiques représentent les coefficients Spearman obtenus suite à la corrélation des rangs des valeurs hydroclimatiques; les notations “*”, “**” et “***” indiquent la signification statistique (issue de l’application du test Student) au seuil α de 0,05, 0,01 et 0,001, respectivement ; les valeurs sans ces symboles indiquent l’absence de signification statistique de la corrélation.

Conclusions

L’analyse des tendances hydroclimatiques du sud-ouest de la Roumanie a mis en évidence une hausse générale du déficit climatique d’humidité et une baisse de l’écoulement des rivières. Si, au pas de temps annuel, cette situation est homogène pour toute la région étudiée, à l’échelle saisonnière, il y a des contrastes, notamment entre le printemps (la saison avec

l'amplification du déficit climatique et la diminution des débits écoulés les plus évidentes) et l'automne (augmentation de l'excédent climatique d'humidité – accroissement partiel des débits).

Étant donné que la région d'étude est parmi les plus exposées de la Roumanie au phénomène d'aridité (Busuioc *et al.*, 2007 ; Prăvălie *et al.*, 2014), des mesures de diminution des effets négatifs de ce phénomène sur la société et l'environnement s'avèrent nécessaires. À l'échelle de la Roumanie, une stratégie pour la réduction des effets de la sécheresse a été adoptée (MADR, 2008), mais il faut qu'elle soit effectivement mise en place à l'échelle locale et régionale.

Références bibliographiques

- Barnett T.P., Adam J.C., Lettenmaier D.P., 2005 : Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, **438**, 303-309.
- Bîrsan M.V., Zaharia L., Chendes V., Branescu E., 2012 : Recent trends in streamflow in Romania (1976-2005). *Romanian Reports in Physics*, **64**(1), 275-280.
- Bîrsan M.V., Zaharia L., Chendeş V., Brănescu E., 2014 : Seasonal trends in Romanian streamflow. *Hydrol. Process*, **28**, 4496-4505.
- Busuioc A., Caian M., Cheval S., Bojariu R., Boroneant C., Baci M., Dumitrescu A., 2007 : *Variabilitatea si schimbarea climei in Romania*, Editura Pro Universitaria, Bucuresti.
- Cayan D.R., Kammerdiener S.A., Dettinger M.D., Caprio J. M., Peterson D.H., 2001 : Changes in the onset of spring in the western United States. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82**, 399-415.
- Dai A., Qian T., Trenberth K.E., Milliman J.D., 2009 : Changes in continental freshwater discharge from 1948 to 2004. *Journal of Climate*, **22**(10), 2773-2792.
- Dragomirescu L., 1998 : *Biostatistica pentru incepatori*. Editura Constelatii, Bucuresti, 216 p.
- IPCC, 2007 : *Climate Change 2007 – The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Cambridge University Press, 996 p.
- IPCC, 2013 : *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- Klein Tank A.M.G. et co-auteurs, 2002 : Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *Int. J. Climatol.*, **22**, 1441-1453 (<http://eca.knmi.nl>).
- Ministerul Agriculturii și Dezvoltării Rurale (MADR), 2008: *Strategia națională privind reducerea efectelor secetei, prevenirea și combaterea degradării terenurilor și deșertificării*, pe termen scurt, mediu și lung.
- Păltineanu C., Mihăilescu I.F., Seceleanu I., Dragotă C., Vasenciuc F., 2007: Using aridity indexes to describe some climate and soil features in Eastern Europe: a Romanian case study. *Theoretical and Applied Climatology*, **90**, 263-274.
- Peterson B.J., Holmes R.M., Mc Clelland J.W., Vorosmarty C.J., Lammers R.B., Shiklomanov A.I., Shiklomanov I.A., Rahmstorf S., 2002 : Increasing river discharge to the Arctic Ocean. *Science*, **298**, 2171-2173.
- Prăvălie R., Sîrodoev I., Peptenatu D., 2014 : Detecting climate change effects on forest ecosystems in South-Western Romania using Landsat TM NDVI data. *Journal of Geographical Sciences*, **24**(5), 815-832.
- Salmi T., Määttä A., Anttila P., Ruoho-Airola T., Amnell T., 2002 : Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates - the Excel template application MAKESENS. ISBN 951-697-563-1, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finlanda.
- Savin C., 2008 : *Râurile din Oltenia - monografie hidrologica – volumul I (Dinamica scurgerii apei)*. Editura Sitech, Craiova, 613 p.
- Thorntwaite C.W., 1948 : An approach toward a rational classification of climate. *The Geographical Rev.*, **38** (1), 55-94.
- Zaharia L., Gălie A., 2007 : Changements climatiques et impacts sur le régime hydrologiques des rivières en Roumanie. Actes du XX eme Colloque International de Climatologie, Tunis-Carthage, 3-8 septembre, 591-596.