

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES SECHERESSES EN FRANCE

VIDAL Jean-Philippe, MOISSELIN Jean-Marc

CNRM/GAME, Météo-France et CNRS, 42 avenue G. Coriolis, 31057 Toulouse CEDEX 1
jean-philippe.vidal@meteo.fr

Météo-France, Direction de la Climatologie, 42 avenue G. Coriolis, 31057 Toulouse CEDEX 1
jean-marc.moisselin@meteo.fr

Résumé : Cet article vise à présenter les orientations proposées pour étudier l'impact du changement climatique sur les événements de sécheresse sur le territoire français, en considérant l'ensemble des composantes du cycle hydrologique et les incertitudes liées aux projections climatiques pour le XXI^e siècle.

Mots-clés : changement climatique ; hydrologie ; sécheresse ; France.

Abstract: This article aims at introducing the approach adopted to evaluate the impact of climate change on drought events in France, by integrating all components of the hydrological cycle and taking account of uncertainties in 21st century climate projections.

Key words: climate change ; hydrology ; drought ; France.

Introduction

Les sécheresses sont des éléments naturels et récurrents du climat européen qui sont susceptibles d'avoir d'importantes conséquences sur les populations et l'environnement. Dans le cadre d'une évaluation à l'échelle de l'Europe des risques liés à la rareté de l'eau et les sécheresses, la Commission Européenne (2007) a mis en évidence que les pays du pourtour méditerranéens ont enregistré le plus grand nombre de sécheresses en Europe depuis 1976.

Cet article présente les orientations proposées dans le cadre du projet « Impact du changement climatique sur la sécheresse et l'eau du sol » réunissant Météo-France (Direction de la Climatologie et CNRM/GAME), le CERFACS et l'UMR SYSIPHE, afin d'une part de déterminer une hydroclimatologie des sécheresses sur la France, et de caractériser d'autre part les évolutions de ce type d'événements pour le XXI^e siècle.

1. Observations et projections

En France, plusieurs années récentes ont été particulièrement déficitaires en termes de précipitations, avec de grandes disparités régionales (Blanchard *et al.*, 2008). L'étude des tendances sur des séries observées et homogénéisées de température et de précipitations conclut à un réchauffement global sur la France, allié à une répartition saisonnière plus marquée des précipitations avec une diminution des pluies estivales. L'évolution d'indices liés aux événements extrêmes de sécheresse en France montre sur la période 1951-2000 une augmentation sensible du nombre maximal de jours secs consécutifs et de la durée moyenne des périodes sèches (Moisselin et Dubuisson, 2006).

Le quatrième rapport d'évaluation du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC) projette une baisse des précipitations estivales allant jusqu'à 30 à 45% sur le bassin méditerranéen d'ici à la fin du XXI^e siècle (Christensen *et al.*, 2007). Ces résultats généraux ont été approfondis dans le cadre du projet Européen PRUDENCE³⁰, mettant en œuvre un ensemble de modélisations climatiques régionales pilotées par 2 modèles de circulation générale sous le scénario A2 d'émissions de gaz à effet de serre (Nakićenović et Swart, 2002). Ce projet a ainsi permis de dégager les changements projetés sur les événements

³⁰ Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects (prudence.dmi.dk).

climatologiques à l'échelle locale sur l'ensemble du continent. Beniston *et al.* (2007) ont ainsi noté sur le sud de la France une augmentation d'environ 15 jours du nombre maximal de jours secs consécutifs entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100. L'utilisation d'un indice de sécheresse basé sur des déficits pluviométriques sur 6 mois a par ailleurs conduit Blenkinsop et Fowler (2007) à détecter une augmentation de la fréquence des événements de sécheresse sur le pourtour méditerranéen, augmentation soumise à de fortes incertitudes liées notamment au choix du modèle de circulation générale.

2. Développement d'une réanalyse hydroclimatique sur la France

2.1. Réanalyse SIM 1958-2008

Afin d'évaluer l'évolution des sécheresses sous changement climatique, il importe avant tout de bien connaître les caractéristiques de ces événements liées à la variabilité climatique naturelle. La première tâche du projet consiste donc à établir une hydroclimatologie de référence sur une période de 50 ans, à l'aide de la chaîne SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU). Cette chaîne comporte trois composants indépendants : SAFRAN fournit une analyse des forçages atmosphériques à partir des observations au sol et des profils atmosphériques issus de la réanalyse ERA40 (Uppala *et al.*, 2005). Cette approche a récemment été validée par Quintana Seguí *et al.* (2007) à l'échelle de la France. Le deuxième composant ISBA calcule les échanges d'eau et d'énergie à l'interface sol-atmosphère (Boone *et al.*, 1999). Enfin, MODCOU est un modèle hydrogéologique distribué à base physique permettant de calculer l'évolution des nappes et des écoulements de surface (Ledoux *et al.*, 1989).

L'ensemble de la chaîne a été validé sur une période de 10 ans sur la France par Habets *et al.* (2008) puis appliqué sur la période 1970-2008. La réanalyse atmosphérique sera donc étendue à la période 1958-1970 et servira de point d'entrée pour la simulation hydrologique ISBA-MODCOU sur la période 1958-2008.

2.2. Caractérisation des sécheresses

La définition d'une sécheresse est complexe et dépend fortement du domaine considéré, mais quatre grands types de sécheresses peuvent cependant être déterminés : sécheresses *météorologiques*, *agricoles*, *hydrologiques*, et *socio-économiques* (Wilhite et Glantz, 1985). Nous laisserons ici de côté le dernier type qui repose en partie sur des considérations d'usage de la ressource en eau pour s'intéresser aux trois premiers types, qui permettent de caractériser les déficits en eau de chacune des composantes du cycle hydrologique.

De nombreuses études ont porté sur la comparaison des indices les plus pertinents pour quantifier ces déficits (voir par exemple Keyantash et Dracup, 2002). Pour les sécheresses météorologiques, nous nous intéresserons à des indices largement utilisés en contexte opérationnel comme le *Palmer Drought Severity Index* (PDSI, Wells et Goddard, 2002) ou le *Standardized Precipitation Index* (SPI), utilisé par Vidal et Wade (2008c) pour estimer l'impact du changement climatique sur les sécheresses au Royaume-Uni. Les sécheresses agricoles pourront être évaluées sur la base de l'indice d'humidité des sols *SWI* (*Soil Wetness Index*) calculé par ISBA et défini comme suit :

$$SWI = \frac{W - W_{wilt}}{W_{fc} - W_{wilt}}$$

où W contenu intégré en eau du sol, W_{wilt} contenu en eau au point de flétrissement et W_{fc} contenu en eau du sol à la capacité au champ. Cet indice est utilisé de manière opérationnelle par Météo-France et la figure 1 présente son évolution sur la France pour l'année 1989,

caractérisée par une période très sèche de mai à décembre de longueur comparable à celle de 2003.

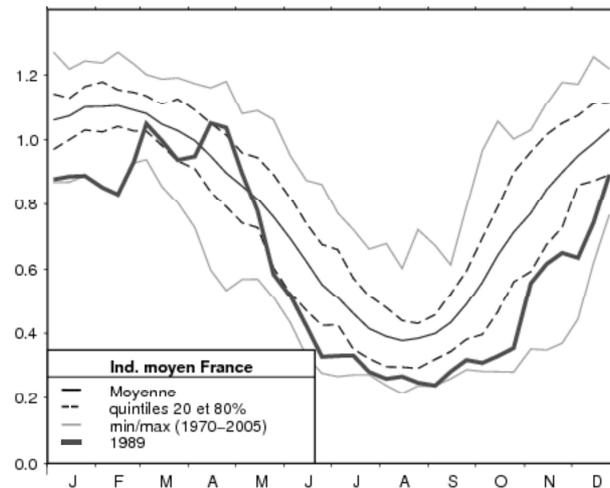


Figure 28. Évolution décadaire de l'indice d'humidité des sols SWI (moyenne sur la France) pour l'année 1989 (trait épais) et comparaison à la moyenne (trait fin), les quintiles 20% et 80% (pointillés) ainsi que les extrêmes (traits fins gris) calculés sur la période 1970-2005.

Enfin, les sécheresses hydrologiques seront caractérisées par des indices d'étiages issus de l'analyse des chroniques de débits observées et simulées par MODCOU suivant l'une des approches proposées par Tallaksen et van Lanen (2004).

3. Des projections climatiques globales aux projections hydrologiques locales

L'évaluation des sécheresses futures requiert de disposer de forçages atmosphériques à haute résolution correspondant aux échelles spatiales des processus hydrologiques. À partir des projections climatiques de grande échelle réalisées dans le cadre du 4^e exercice du GIEC (Meehl *et al.*, 2007), de tels forçages peuvent être obtenus à l'aide de méthodes dynamiques – mise en œuvre de modèles régionaux – ou statistiques, comme celle proposée ici.

La méthode utilisée dans le cadre du projet a été développée par Boé *et al.* (2006) et s'appuie sur une décomposition en types de temps et des régressions linéaires entre prédicteurs synoptiques et prédicteurs locaux. Elle a été appliquée avec succès sur le bassin de la Seine (Boé *et al.*, 2007) et ensuite étendue à l'ensemble du territoire français (Boé, 2007).

Cette méthode a d'ores et déjà été mise en œuvre pour désagréger spatialement plusieurs périodes de 20 ans simulées par 15 modèles de circulation générale (Meehl *et al.*, 2007) sous le scénario d'émissions A1B. La Figure 29a présente un exemple des résultats de cette application sur les changements en termes de précipitations à l'horizon 2050. On peut noter une diminution très importante des cumuls de précipitations entre juin et novembre sur le pourtour méditerranéen. Les résultats atmosphériques désagrégés ont ensuite servi de forçage pour les modèles ISBA et MODCOU afin de déterminer les changements projetés sur les débits des principaux cours d'eau français, dont un exemple est présenté sur la Figure 29b. On constate que les débits moyens de la plupart des cours d'eau devraient diminuer fortement en été et en automne, entraînant des problèmes de gestion de la ressource en eau superficielle.

4. Vers une évaluation des événements de sécheresses futures

La seconde étape du projet consiste à déterminer les caractéristiques des sécheresses en climat futur et de les comparer à celles observées pendant la période de référence 1958-2008. Une première expérience a été réalisée en évaluant les changements attendus sur le *SWI* défini au paragraphe 2.2, sur la base des projections désagrégées mentionnées au-dessus. La Figure

29c montre que le *SWI* devrait diminuer en moyenne sur l'ensemble du territoire, mais ne fournit pas d'indications sur les changements en termes de fréquence des événements.

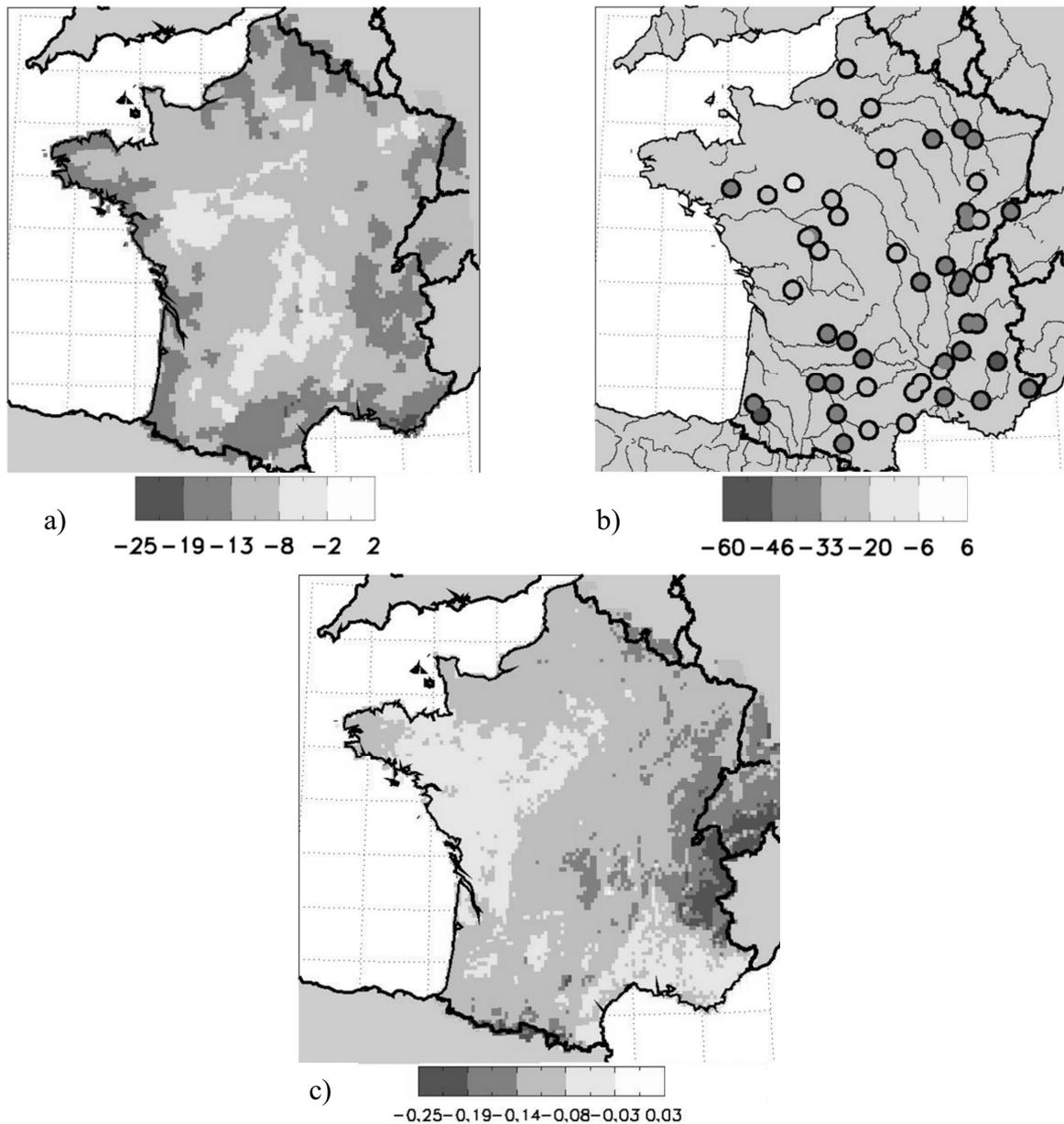


Figure 29. Projections multi-modèles pour la période 2046-2065 sous le scénario A1B, par rapport à la période 1970-1999. a) changements sur les précipitations moyennes de juin à novembre (%); b) : changements sur les débits moyens de juin à septembre (%); c) : changement sur le *SWI* moyen de juin à août.

La méthode de désagrégation spatiale décrite dans le paragraphe 3 sera appliquée dans un premier temps à un ensemble de projections climatiques à grande échelle afin de prendre en compte les deux grands types d'incertitudes sur ces projections, à commencer par la plus importante d'entre elles, celle sur la configuration des modèles de circulation générale (Vidal et Wade, 2008a, b). Un ensemble de modèles développés dans le cadre du 4^e exercice du GIEC sera ainsi considéré. Le deuxième type d'incertitudes repose sur le choix des scénarios d'émissions à la base des projections climatiques. Plusieurs d'entre eux – et notamment les scénarios A1B et A2 (Nakićenović et Swart, 2002) – seront donc considérés dans cette étude. Enfin, l'analyse de l'évolution des sécheresses s'effectuera à différents horizons temporels, et des simulations transitoires sur l'ensemble du XXI^e siècle effectuées récemment seront mises

à profit. Dans le cadre du projet en cours CYPRIM³¹, de telles simulations intégrant un couplage entre l'atmosphère et la Méditerranée à l'aide du modèle ARPEGE-Climat ont conduit à une meilleure représentation du cycle de l'eau dans la zone méditerranéenne (Somot *et al.*, 2008) et leur utilisation sera donc privilégiée.

Conclusions

Cette étude s'emploie d'une part à déterminer sur une période de référence de 50 ans les caractéristiques des événements de sécheresse : fréquence, durée, magnitude, sévérité et extension spatiale. L'impact du changement climatique sur les régimes hydrologiques a été étudié précédemment sur le Rhône (Etchevers *et al.*, 2002), la Seine (Ducharne *et al.*, 2004) et la Garonne (Caballero *et al.*, 2007). Cette étude vise à étendre ces analyses à l'ensemble du territoire en prenant en compte plusieurs incertitudes sur les projections climatiques. Les principaux résultats attendus portent sur l'évolution des caractéristiques des événements de sécheresses sur les trois composantes du cycle hydrologique afin de fournir une vision complète des risques futurs sur les ressources en eau.

Remerciements

Ces travaux sont effectués dans le cadre du projet « Impact du changement climatique sur la sécheresse et l'eau du sol » financé par la Fondation MAIF. Les auteurs tiennent à remercier Julien Boé, Laurent Terray (CERFACS, équipe Modélisation du climat et de son changement global) et Laurent Franchistéguy (Météo-France, Direction de la Climatologie) pour la mise à disposition des illustrations.

Références bibliographiques

- Beniston M., Stephenson D. B., Christensen O. B., Ferro C. A. T., Frei C., Goyette S., Halsnaes K., Holt T., Jylhä K., Koffi, B., Palutikof J., Schöll R., Semmler T., Woth K., 2007. Future extreme events in European climate: An exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, **81**, Supplement 1, 71-95.
- Blanchard M., Franchistéguy L., Habets F., Martin É., Noilhan J., 2008. Typologie des sécheresses sur la France et outils de suivi de la ressource en eau utilisés à Météo-France. *Revue Française de Géotechnique*, **120-121**, 11-20.
- Blenkinsop S., Fowler H. J., 2007. Changes in drought characteristics for Europe projected by the PRUDENCE regional climate models. *International Journal of Climatology*, **27**, 12, 1595-1610.
- Boé J., 2007. *Changement global et cycle hydrologique : une étude de régionalisation sur la France*. Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 256 p.
- Boé J., Terray L., Habets F., Martin É., 2006. A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. *Journal of Geophysical Research*, **11**, D23106.
- Boé J., Terray L., Habets F., Martin É., 2007. Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *International Journal of Climatology*, **27**, 12, 1643-1655.
- Boone A., Calvet J.-C., Noilhan J., 1999. Inclusion of a third soil layer in a land surface scheme using the force-restore method. *Journal of Applied Meteorology*, **38**, 11, 1611-1630.
- Caballero Y., Voirin-Morel S., Habets F., Noilhan J., Le Moigne P., Lehenaff A., Boone A., 2007. Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. *Water Resources Research*, **43**, W07448.
- Commission Européenne, 2007. *Water Scarcity and Droughts – In-depth assessments*. Second Interim report. DG Environment, European Commission, 93 p.
- Christensen J. H., Hewitson B., Busuioc A., Chen A., Gao X., Held I., Jones R., Kolli R. K., Kwon W.-T., Laprise R., Magaña Rueda V., Mearns L., Menéndez C. G., Räisänen J., Rinke A., Sarr A., Whetton P., 2007. Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Solomon S., Qin

³¹ CYclogénèse et PRécipitations Intenses en région Méditerranéenne (www.cnrn.meteo.fr/cyprim/)

D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L., Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Ducharne A., Théry S., Viennot P., Ledoux E., Gomez É., Déqué M., 2004. Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine. *VertigO*, **4**, 3, 1-13.

Etchevers P., Golaz C., Habets F., Noilhan J., 2002. Impact of a climate change on the Rhône river catchment hydrology. *Journal of Geophysical Research*, **107**, D16.

Habets F., Boone A., Champeaux J.-L., Etchevers P., Franchistéguy L., Leblois É., Ledoux E., Le Moigne P., Martin É., Morel S., Noilhan J., Quintana Seguí P., Rousset-Regimbeau F., Viennot P., 2008. The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research*, sous presse.

Keyantash J., Dracup J. A., 2002. The quantification of drought: An evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **83**, 8, 1167-1180.

Ledoux E., Girard, G., De Marsily G., Deschenes J., 1989. Spatially distributed modeling: Conceptual approach, coupling surface water and ground-water, in *Unsaturated flow hydrologic modeling: theory and practice* (Morel-Seytoux H. J., Ed.), p. 435-454, NATO Sciences Service.

Meehl G. A., Covey C., Delworth T., Latif M., McAvaney B., Mitchell J. F. B., Stouffer R. J., Taylor K. E., 2007. The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **88**, 9, 1383-1394.

Moisselin J.-M., Dubuisson B., 2006. Évolution des valeurs extrêmes de température et de précipitations au cours du XX^e siècle en France. *La Météorologie*, **54**, 33-42.

Nakićenović N., Swart R. (Eds.), 2002. *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 612 p.

Quintana Seguí P., Le Moigne P., Durand Y., Martin É., Habets F., Baillon M., Canellas C., Franchistéguy L., Morel S., 2007. Analysis of near surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN reanalysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **47**, 1, 92-107.

Somot S., Sevault S., Déqué M., Crépon M., 2008. 21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled atmosphere-ocean regional climate model. *Global and Planetary Change*, sous presse, disponible en ligne.

Tallaksen L. M., van Lanen H. A. J., 2004. *Hydrological drought – Processes and estimation methods for streamflow and groundwater*. Elsevier, 500 p.

Uppala S. M., Kållberg P. W., Simmons A. J., Andrae U., Da Costa Bechtold V., Fiorino M., Gibson J. K., Haseler J., Hernandez A., Kelly G. A., Li X., Onogi K., Saarinen S., Sokka N., Allan R. P., Andersson E., Arpe K., Balsameda M. A., Beljaars A. C. M., Van De Berg L., Bidlot J., Bormann N., Caires S., Chevallier F., Dethof A., Dragosavac M., Fisher M., Fuentes M., Hagemann S., Hólm E., Hoskins B. J., Isaksen I., Janssen P. A. E. M., Jenne R., McNally A. P., Mahfouf J.-F., Morcrette J.-J., Rayner N. A., Saunders R. W., Simon P., Sterl A., Trenberth K. E., Untch A., Vasiljevic D., Viterbo P., Woollen J., 2005. The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **131**, 612, 2961-3012.

Vidal J.-P., Wade S. D., 2008a. A framework for developing high-resolution multi-model climate projections: 21st century scenarios for the UK. *International Journal of Climatology*, sous presse, disponible en ligne.

Vidal J.-P., Wade S. D., 2008b. Multimodel projections of catchment-scale precipitation regime. *Journal of Hydrology*, sous presse, disponible en ligne.

Vidal J.-P., Wade S. D., 2008c. A multimodel assessment of future climatological droughts in the UK. *International Journal of Climatology*, accepté.

Wells N., Goddard S., 2002. A self-calibrating Palmer Drought Severity Index. *Journal of Climate*, **17**, 12, 2335-2351.

Wilhite D. A., Glantz M. H., 1985. Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, **10**, 3, 11-120.