

## CARACTÉRISATION DES SÈCHERESSES EN FRANCE AU COURS DU XXIÈME SIÈCLE

NAJAC J.<sup>1</sup>, KITOVA N.<sup>1</sup>, VIDAL J.-P.<sup>2</sup>, SOUBEYROUX J.-M.<sup>3</sup> et MARTIN E.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CNRM/GAME, Météo France et CNRS, 42 av. G. Coriolis 31057 Toulouse, najac.pro@gmail.com, nadia.kitova@meteo.fr

<sup>2</sup> CEMAGREF HHLV, 3 bis quai Chauveau, CP220, 69336 Lyon Cedex 09, jean-philippe.vidal@cemagref.fr

<sup>3</sup> Météo France, Direction de la climatologie, 42 av. G. Coriolis 31057 Toulouse

**Résumé :** Cet article présente une étude de 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<sup>e</sup> siècle.

**Mots-clés :** changement climatique, hydrologie, sécheresse, France

**Abstract: Drought characterization in France over the 21st century**

Impact of climate change on drought events in France were studied using all components of the hydrological cycle as well as taking uncertainties of the projected climate for the 21st century into account.

**Keywords:** climate change, hydrology, drought, France

### Introduction

Sous l'effet des changements climatiques, la fréquence et l'ampleur des sècheresses vont très certainement s'accroître (déclaration OMM du 15/12/2009). La France est particulièrement concernée par ce risque, comme ont pu le montrer les études sur les évolutions attendues du cycle hydrologique (voir Boé *et al.*, 2007 par exemple). Toutefois, les études se sont généralement focalisées sur les précipitations ou les débits, mais peu ont concerné l'étude des sécheresses à travers l'évolution passée et future des réserves en eau des sols superficiels. Ce constat a motivé la mise en place du projet CLIMSEC financé par la Fondation MAIF et Météo France (Vidal et Moisselin, 2008).

Au cours de la première phase du projet CLIMSEC, la réanalyse hydrométéorologique de la chaîne Safran-Isba-Modcou sur la période 1958-2008 (cf Vidal *et al.*, 2010a pour la partie atmosphérique) a permis de disposer d'une base de données homogène à haute résolution spatio-temporelle sur la France pour caractériser les déficits en eau des différentes composantes du cycle de l'eau. Des indicateurs standardisés, basés sur les précipitations, l'indice d'humidité des sols et les débits ont été définis et utilisés pour décrire la typologie des sècheresses dans le climat actuel (Vidal *et al.*, 2010b). Nous présentons ici les premiers résultats des travaux effectués dans le cadre de la deuxième phase du projet CLIMSEC. Ceux-ci visent à caractériser l'évolution de ces indicateurs en climat futur et à évaluer les incertitudes associées à travers différents scénarios socio-économiques, différents modèles climatiques et différentes méthodes de descente d'échelle.

### 1. Evolution attendue du cycle hydrologique en France

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<sup>e</sup> siècle (Christensen *et al.*, 2007). Ainsi, dans le sud de l'Europe, région déjà vulnérable à la variabilité du climat, les changements climatiques devraient aggraver la situation (températures élevées et sécheresse) et nuire à l'approvisionnement en eau, au potentiel hydroélectrique, au tourisme estival et, en général, aux rendements agricoles.

Ces résultats généraux ont été approfondis dans le cadre du projet Européen PRUDENCE<sup>1</sup>, 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 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.

### 3. Des projections climatiques globales aux projections hydrologiques locales

La définition d'une sécheresse est complexe et dépend fortement du domaine considéré, mais quatre grands types de sécheresses peuvent cependant être distingués : 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). L'approche adoptée ici pour la définition d'indices de sécheresse s'inspire du Standardized Precipitation Index (SPI, Llyod-Hughes et Saunders, 2002). La variable considérée au pas de temps mensuel est cumulée/moyennée sur n mois glissants, puis les distributions des mois calendaires sont projetées sur une loi normale centrée réduite. Cette méthode assure donc une cohérence spatiale de l'indice, une équivalence valeur/probabilité de non dépassement en référence à la climatologie locale et une vision à différentes échelles de temps. Les sécheresses agricoles sont évaluées de manière similaire en remplaçant les précipitations par l'indice d'humidité des sols SWI (Soil Wetness Index) défini comme suit :

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

où W est le contenu intégré en eau du sol,  $W_{wilt}$  le contenu en eau au point de flétrissement et  $W_{fc}$  le contenu en eau du sol à la capacité au champ. Cet indice est utilisé de manière opérationnelle par Météo-France pour le suivi de la ressource en eau (Soubeyroux *et al.* 2008). Enfin, les sécheresses hydrologiques seront caractérisées par des indices d'étiages issus de l'analyse de chroniques de débits.

---

<sup>1</sup> Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects (prudence.dmi.dk).

L'évaluation des sécheresses futures requiert donc de disposer de champs de précipitations et d'humidité du sol et de chroniques de débits. Aujourd'hui les meilleurs outils dont nous disposons pour projeter l'évolution globale du climat en réponse au forçage anthropique sont les modèles climatiques globaux. Cependant, leurs résolutions spatiales grossières ainsi que la difficile représentation des phénomènes de petites échelles tels que ceux intervenant dans certains processus hydrologiques ne permettent pas d'utiliser directement les variables simulées par ces modèles pour calculer les indices de sécheresse. Il faut donc recourir à des stratégies de descente d'échelle et/ou à des simulations hydrométéorologiques régionales.

Dans cette étude, deux méthodes de descente d'échelle statistiques sont appliquées aux simulations de modèles climatiques en utilisant comme référence la réanalyse atmosphérique Safran (Vidal *et al.*, 2010a): une méthode développée par Boé *et al.* (2006) s'appuyant sur une décomposition en types de temps et des régressions linéaires entre prédicteurs synoptiques et prédicteurs locaux, et une méthode développée par Déqué (2007) permettant de corriger la distribution statistique des variables du modèle quantile par quantile. Les indices SPI ont ainsi été calculés à partir des précipitations désagrégées. Les résultats atmosphériques désagrégés ont ensuite servi de forçage pour les modèles Isba et Modcou afin de déterminer les changements projetés sur l'humidité des sols et les débits des principaux cours d'eaux français. Concernant le SSWI, une méthode alternative a été mise en œuvre afin d'estimer l'apport du modèle Isba : le SSWI a été calculé à partir du SWI directement simulé par les modèles climatiques et corrigé par la méthode quantile-quantile. Les différents indices de sécheresse calculés sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Correspondance entre variables SIM, types de sécheresse et indices associés.

Modèle	Variable	Type de sécheresse	Indice
Safran	Précipitations	Météorologiques	Standardized Precipitation Index (SPI)
Isba	SWI	Agricole	Standardized Soil Wetness Index (SSWI)
Modcou	Débit	Hydrologique	Standardized Flow Index (SFI)

#### 4. Evolution des indicateurs de sécheresses et incertitudes

Pour être exploitable, toute étude d'impact du changement climatique doit s'accompagner d'une étude la plus complète possible des différentes sources d'incertitudes. Quatre sources d'incertitudes sont généralement distinguées : les scénarios socio-économiques d'émissions de gaz à effet de serre (GES), les modèles climatiques, les méthodes de descente d'échelle, les modèles d'impact. La prise en compte exhaustive de toutes les sources d'incertitude est en pratique difficile en raison de la difficulté d'isoler une source d'incertitude des autres et de la disponibilité limitée des données.

Dans notre étude, nous considérons trois scénarios d'émissions de GES (A2, A1B, B1), deux versions du modèle climatique ARPEGE et deux méthodes de descente d'échelle. De plus, la comparaison entre le SSWI obtenu par désagrégation directe du SWI simulé par le modèle ARPEGE et le SSWI obtenu à partir du SWI simulé par le modèle de sol Isba, nous permet d'estimer l'impact du modèle de sol. Il est également envisagé de traiter plusieurs projections climatiques issues des modèles utilisés dans le cadre du dernier rapport du GIEC

publié en 2007 (IPCC, 2007), afin d'estimer plus précisément l'incertitude due aux modèles climatiques.

L'évolution des sécheresses au cours du XXI<sup>e</sup> siècle est ainsi étudiée en utilisant différentes combinaisons « scénario+modèle+méthode de descente d'échelle ». Il est mis en évidence un accroissement très important de la fréquence et de l'intensité des sécheresses sur la France au cours de la seconde moitié du XXI<sup>e</sup> siècle (Fig.1), en lien avec la baisse des précipitations moyennes sur le pays et l'augmentation des températures. Dans certaines régions, l'assèchement est tel que l'état de sécheresse demeure ininterrompu pendant plusieurs décennies à la fin du siècle (Fig.1). Cela pose la question de la pertinence de la définition de seuils de sécheresse en climat actuel pour caractériser des sécheresses en climat perturbé (Vidal *et al.*, 2010c). La représentation de l'évolution d'indicateurs standardisés dans un climat en forte évolution est donc discutée pour répondre à la fois aux besoins de comparaison à une référence connue (le climat actuel) tout en mettant en évidence les adaptations progressives que les sociétés devront mettre en œuvre. L'évolution différenciée des différentes caractéristiques des sécheresses (durée, magnitude, sévérité, étendue spatiale...) est également examinée.

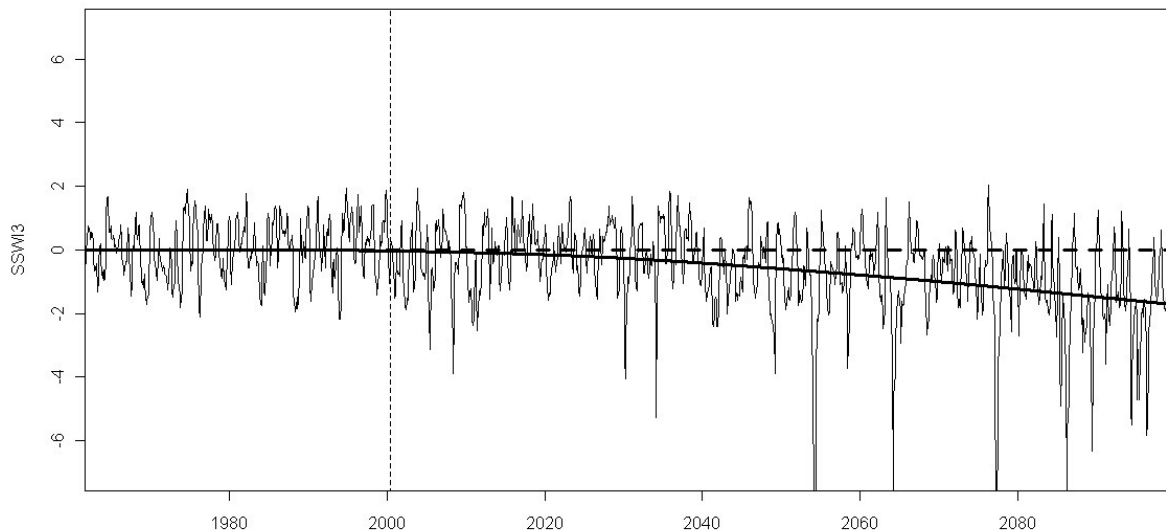


Figure 1 : Evolution au cours du temps de l'indice SSWI3 en un point de grille proche de Toulouse. L'indice SSWI3 a été obtenu à partir des simulations Modcou réalisées après désagrégation avec la méthode de Boé *et al.* (2006) des variables de forçages atmosphériques simulées par le modèle SAMM (Somot *et al.*, 2006) sous scénario A2, pour la période 1960-2100.

La figure 2 présente ainsi l'évolution du nombre d'évènements de sécheresse météorologique au cours du XXI<sup>e</sup> siècle, déterminé à l'aide de deux méthodes de descente d'échelle appliquées à la même projection climatique (modèle SAMM sous scénario A2). Elle met en évidence la nécessité de prendre en compte plusieurs méthodes afin d'estimer l'incertitude liée à cette étape de descente d'échelle (Najac *et al.*, 2010).

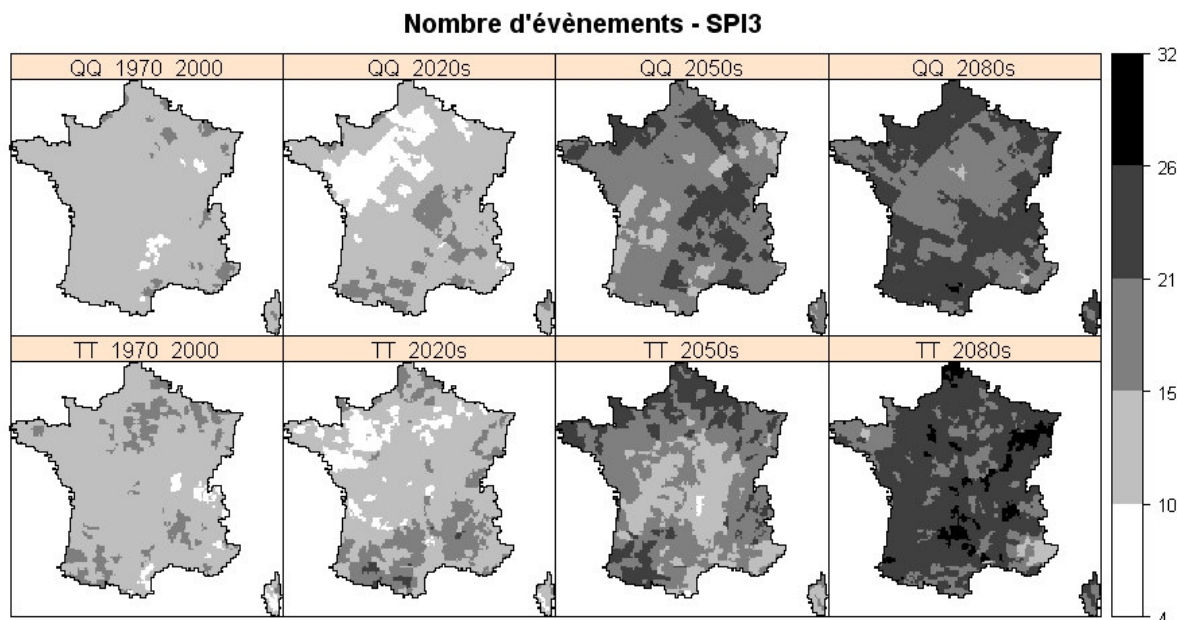


Figure 2 : Evolution du nombre d'évènements de sécheresse météorologique définis par l'indice SPI3 obtenus après désagrégation des précipitations simulées par le modèle SAMM (Somot *et al.*, 2006) sous scénario A2 avec la méthode de Déqué (2007) (en haut) et de Boé *et al.* (2006) (en bas), pour les périodes (de gauche à droite) 1970-2000, 2010-2040, 2040-2070 et 2070-2100.

## Conclusion

Cette étude vise à analyser l'évolution des caractéristiques des événements de sécheresses (durée, magnitude, sévérité, étendue spatiale...) au cours du XXI<sup>e</sup> siècle aux échelles régionales sur la France. Les incertitudes associées sont étudiées en utilisant un ensemble de projections climatiques obtenues avec plusieurs scénarios d'émissions, plusieurs modèles climatiques et plusieurs méthodes de descente d'échelle. La prise en compte de trois composantes du cycle hydrologique (précipitations, humidité du sol et débits) permet une vision complète de la propagation du déficit en eau dans le cycle hydrologique et des risques futurs sur les ressources en eau. Cette étude a donc pour vocation d'apporter des informations cruciales pour différents secteurs socio-économiques (agriculture, hydroélectricité, tourisme) et de contribuer aux travaux sur l'adaptation au changement climatique en métropole.

## Bibliographie

- 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**, Supplément 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.
- 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 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.
- 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**, 1-2.
- 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.
- IPCC, 2007 : Climate Change 2007: Synthesis Report. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Core Writing Team, R. K. Pachauri and A. Reisinger, (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 p.
- 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.
- Llyod-Hughes B., Saunders M. A., 2002 : A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, **22**, 13, 1571-1592.
- Moisselin J.-M., Dubuisson B., 2006 : Évolution des valeurs extrêmes de température et de précipitations au cours du XX<sup>e</sup> siècle en France. *La Météorologie*, **54**, 33-42.
- Najac J., Vidal J.-P., Martin E., Franchistéguy L., Soubeyrou J.-M., 2010 : *Geophysical Research Abstracts*, **12**, EGU2010-8975.
- Nakićenović N., Swart R. (Eds.), 2002 : *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 612 p.
- Somot S., Sevault F., Déqué M., 2006 : Transient climate change scenario simulation of the Mediterranean Sea for the 21<sup>st</sup> century using a high-resolution ocean circulation model. *Climate Dynamics*, **27**, 851-879.
- Soubeyrou J.-M., Martin E., Franchistéguy L., Habets F., Noilhan J., Baillon M., Regimbeau F., Vidal J.-P., Le Moigne P., Morel S., 2008 : Safran Isba Modcou (SIM) : un outil pour le suivi hydrométéorologique opérationnel et les études. *La Météorologie*, **63**, 40-45.
- Vidal J.-P., Moisselin J.-M., 2008 : Actes du XXI<sup>e</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie : Climat et risques climatiques en Méditerranée, 655-660.
- Vidal J.-P., Martin E., Franchistéguy L., Baillon M., Soubeyrou J.-M., 2010a : A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, in press.
- Vidal J.-P., Martin E., Franchistéguy L., Habets F., Soubeyrou J.-M., Blanchard M., Baillon M., 2010b : Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. *Hydrology and Earth System Sciences*, **14**, 459-478.
- Vidal J.-P., Najac J., Martin E., Franchistéguy L., Soubeyrou J.-M., 2010c : *Geophysical Research Abstracts*, **12**, EGU2010-10555.
- Wilhite D. A., Glantz M. H., 1985 : Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, **10**, 11-120.