

## IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN FRANCE SUR LA SÉCHERESSE ET L'EAU DU SOL

### IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON DROUGHT AND SOIL MOISTURE IN FRANCE

Jean-Philippe VIDAL<sup>1</sup>, Jean-Michel SOUBEYROUX<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CNRM/GAME, CNRS et Météo-France, France

<sup>2</sup> Météo-France, Direction de la Climatologie, France

**RÉSUMÉ** – Cette communication présente la démarche engagée pour étudier l'impact du changement climatique en France sur l'humidité du sol et les événements de sécheresses associés – notamment géotechniques – en considérant les incertitudes liées aux projections pour le XXI<sup>e</sup> siècle.

**ABSTRACT** – This paper introduces the approach adopted to evaluate the impact of climate change on agricultural and geotechnical droughts in France, by taking account uncertainties in 21st century climate projections.

### 1. Introduction

Éléments naturels et récurrents de la variabilité climatique, les sécheresses sont susceptibles d'avoir d'importantes conséquences sur les populations et l'environnement. Un déficit pluviométrique persistant ou une sécheresse plus courte associée à des températures élevées peut ainsi conduire à un assèchement du sol en profondeur. Dans ces conditions, les constructions situées sur certains sols argileux se montrent particulièrement vulnérables au phénomène de retrait et de gonflement des sols. L'identification des situations hydroclimatiques passées ayant conduit à de tels impacts géotechniques ainsi que l'étude de leur occurrence dans un climat modifié permettent d'évaluer les risques futurs sur les constructions.

Cette communication présente les orientations proposées en ce sens 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, et qui vise d'une part à déterminer une hydroclimatologie des sécheresses pour la France sur les 50 dernières années, et d'autre part à caractériser les évolutions de ces événements pour le XXI<sup>e</sup> siècle.

### 2. Suivi et 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). On s'intéresse ici aux sécheresses dites agricoles, caractérisées par des déficits en eau du sol et donc étroitement liées aux risques sur les constructions.

#### 2.1. Évaluation du contenu en eau du sol

L'humidité en eau du sol est une variable difficile à mesurer de façon extensive et seules quelques campagnes de longue durée ont été réalisées en France, comme HAPEX-MOBILHY (Habets et al., 1999) et plus récemment SMOSREX (De Rosnay et al., 2006).

La modélisation numérique permet de pallier cette difficulté en fournissant une évaluation du contenu en eau du sol à partir des forçages atmosphériques. L'humidité du sol calculée par les modèles est actuellement largement utilisée pour évaluer les sécheresses agricoles dans le

monde, et notamment aux États-Unis. Lakshmi et al. (2004) ont ainsi utilisé directement le contenu en eau de la troisième couche de sol calculée par le modèle VIC (Liang et al., 1994) pour caractériser les extrêmes météorologiques sur le haut bassin du Mississippi. Sheffield et al. (2004) ont mis en place un indice de sécheresse basé sur les quantiles d'humidité des sols calculés par VIC sur l'ensemble des États-Unis. Narasimhan et Srinivasan (2005) ont quant à eux utilisé l'humidité du sol hebdomadaire calculée par le modèle SWAT (Arnold et al., 1998) pour définir le *Soil Moisture Deficit Index*. Les variables relatives à l'humidité du sol provenant de la réanalyse hydroclimatique nord-américaine (Mesinger et al., 2006) ont par ailleurs été utilisées par Mo et Chelliah (2006) pour remplacer les calculs de bilan hydrique dans le *Palmer Drought Severity Index (PDSI)* ; Palmer, 1965).

## 2.2. Outils de suivi à Météo-France

Météo-France utilise, depuis plus de dix ans, deux outils différents pour effectuer un suivi des sécheresses en mode opérationnel et répondre à des besoins sur l'estimation de la ressource en eau, notamment pour l'agriculture et la prévision des feux de forêts (Blanchard et al., 2007). Le premier outil est un modèle de bilan hydrique à deux réservoirs appliqué actuellement au pas de temps quotidien sur plus de 300 postes météorologiques (Jacquart et Choissel, 1995).

Le deuxième outil auquel il est fait appel dans le cadre du projet en cours est le modèle hydrométéorologique 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 modèles de prévision à grande échelle (Quintana Seguí et al., 2007). Le deuxième composant ISBA calcule les échanges d'eau et d'énergie à l'interface sol-atmosphère (Boone et al., 1999). Ce module permet ainsi d'obtenir des valeurs d'humidité du sol qui ont été validées par des mesures in situ et comparées à des données radar (Baghdadi et al., 2007 ; Pellarin et al., 2006). 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).

La variabilité spatiale du contenu en eau du sol est évaluée à l'aide du *SWI (Soil Wetness Index)* défini comme suit :

$$SWI = \frac{W - W_{wilt}}{W_{fc} - W_{wilt}} \quad (1)$$

où  $W$  est le contenu intégré en eau du sol calculé par ISBA ;  $W_{wilt}$ , 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 et permet de produire des cartes d'humidité du sol intégrées au Bulletin de Suivi Hydrologique national ([www.meteofrance.com](http://www.meteofrance.com)). La Figure 1 présente l'évolution du *SWI* moyenné sur la France pour l'année 2003, dont la sécheresse a donné lieu à des dégâts importants sur les constructions dans plus de 7000 communes françaises.

## 3. Développement d'une hydroclimatologie des sécheresses

### 3.1. Réanalyse hydroclimatique 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. 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. L'analyse atmosphérique SAFRAN sera donc étendue à la période 1958-1970 à partir des

données de la réanalyse ERA40 (Uppala et al., 2005) et servira de point d'entrée pour la simulation hydrologique ISBA-MODCOU sur la période 1958-2008.

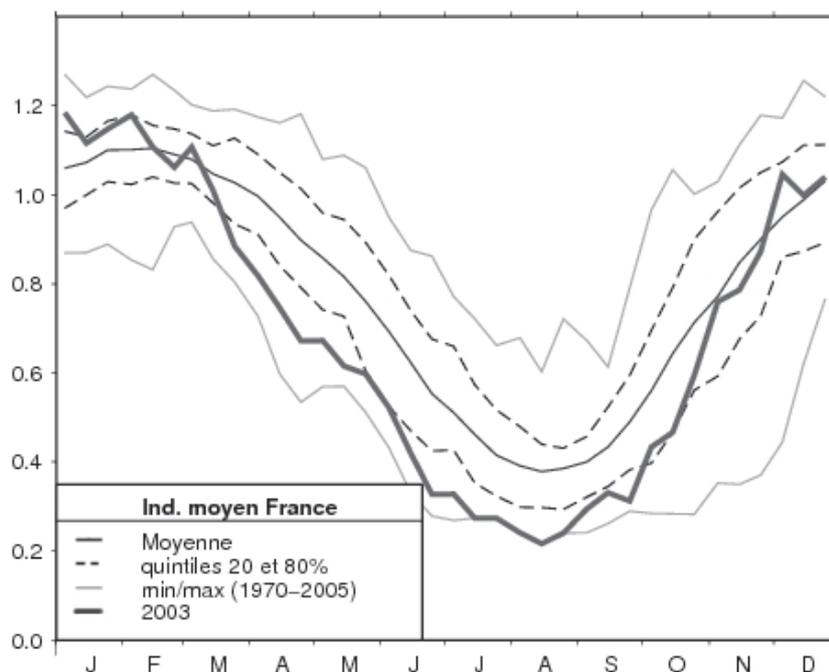


Figure 1. Évolution décadaire de l'indice d'humidité des sols SWI (moyenne sur la France) pour l'année 2003 (trait épais) et comparaison à la moyenne (trait fin), les quintiles 20% et 80% (pointillés) ainsi que les extrêmes (traits fins gris) calculés sur la période 1970-2005.

### 3.2. Détermination des caractéristiques des sécheresses

L'utilisation d'indices comme le SWI ou le PDSI permet de dégager les caractéristiques des événements de sécheresse en termes de fréquence, de durée, d'intensité, mais aussi d'extension spatiale. Cette caractérisation sera réalisée à partir des produits de la réanalyse SIM suivant l'exemple de l'étude réalisée à l'échelle globale par Sheffield et Wood (2007). Des comparaisons avec des données géoréférencées de déclarations de sinistre pourront être menées, en prenant en compte les différents types de sécheresse géotechnique reconnus à ce jour selon la procédure réglementaire « catastrophes naturelles » : sécheresses hivernales de longue durée de type 1989-1991 ou sécheresse estivale intense de type 2003.

## 4. Évolution des sécheresses sous changement climatique

### 4.1. Projections climatiques pour l'hydrologie

Les modèles de circulation générale intègrent des schémas de surface générant des projections d'humidité du sol qui permettent de déterminer à l'échelle globale l'évolution des conditions de sécheresse (Wang, 2005 ; Sheffield et Wood, 2008). La résolution spatiale de ces projections ne correspond toutefois pas aux échelles pertinentes des processus hydrologiques en France, et il importe donc de disposer de forçages atmosphériques à haute résolution pour évaluer les sécheresses futures (Vidal et Wade, 2008a). La méthode de désagrégation spatiale 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 sur l'ensemble du territoire français (Boé, 2007) à partir des projections climatiques de grande échelle réalisées dans le cadre du quatrième exercice du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (Christensen et al., 2007).

Un ensemble de projections sera ainsi considéré afin de prendre en compte l'incertitude prédominante liée à la configuration des modèles de circulation générale (Vidal et Wade, 2008b, 2008c). Plusieurs scénarios d'émissions – et notamment les scénarios A1B et A2 (Nakićenović et Swart, 2002) – seront de plus considérés dans cette étude. Enfin, plusieurs horizons temporels seront traités et des simulations transitoires sur l'ensemble du XXI<sup>e</sup> siècle effectuées récemment avec le modèle à résolution variable ARPEGE seront mises à profit (Somot et al., 2008).

#### **4.2. Caractéristiques futures des sécheresses**

Le modèle ISBA sera enfin forcé par ces différentes projections climatiques désagrégées pour évaluer les valeurs futures d'humidité du sol. Des schémas de transfert sol-végétation-atmosphère non couplés pour la détermination d'indices de changement climatique ont été précédemment utilisés par Hayhoe et al. (2007) sur le nord-est des États-Unis.

Une première expérience a ainsi été réalisée en évaluant les changements attendus sur le *SWI* défini au paragraphe 2.2., sur la base des projections désagrégées issues de 15 modèles du GIEC sous le scénario A1B. La Figure 2 montre que l'humidité du sol devrait diminuer en moyenne de façon significative sur l'ensemble du territoire, mais ne fournit pas d'indications sur les changements en termes de fréquence des événements. L'étape finale du projet consistera à définir les caractéristiques futures des sécheresses aux horizons considérés et à les comparer aux résultats obtenus pour la période de référence 1958-2008.

### **5. Conclusions**

Cette étude s'emploie d'une part à déterminer sur une période de référence de 50 ans les caractéristiques des événements de sécheresse survenues en France : fréquence, durée, magnitude, sévérité et extension spatiale. Elle vise d'autre part à déterminer sur l'ensemble du territoire les modifications de ces caractéristiques pour le siècle à venir ainsi que les incertitudes associées liées à la dispersion des projections climatiques, afin de contribuer à la définition de stratégies d'adaptation à ces phénomènes extrêmes.

### **6. 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), Laurent Franchistéguy (Météo-France, Direction de la Climatologie) et Éric Martin (CNRM/GAME) pour la préparation et mise à disposition des illustrations.

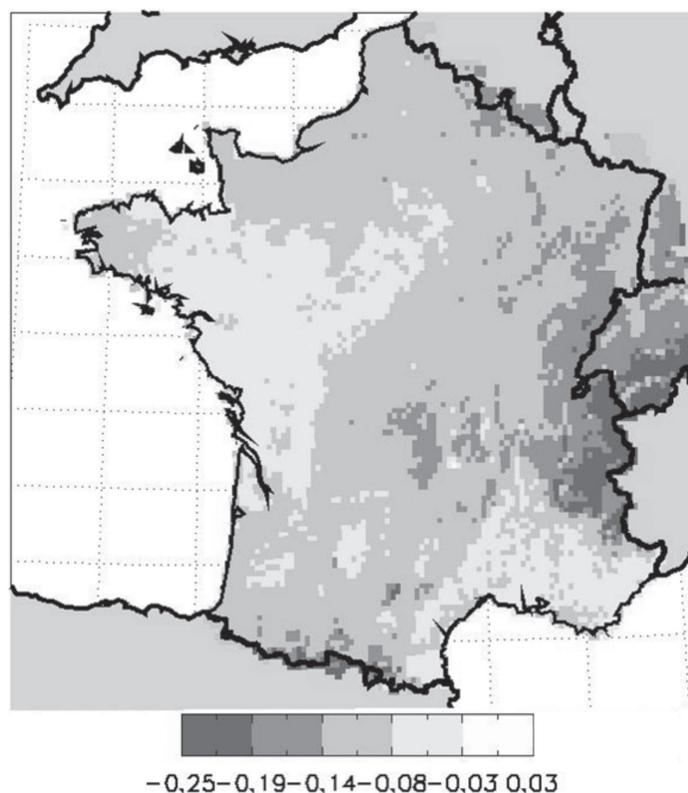


Figure 2. Projection multi-modèles pour la période 2046-2065 sous le scénario A1B, par rapport à la période 1970-1999 : changement sur le SWI moyen de juin à août.

## 7. Références bibliographiques

- Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams J.R. (1998) Large area hydrologic modeling and assessment – Part 1: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34 (1), 73-89.
- Baghdadi N., Aubert M., Cerdan O., Franchisteguy L., Viel C., Martin E., Zribi M., Desprats J.F. (2007) Operational mapping of soil moisture using synthetic aperture radar data: Application to the Touch basin (France). *Sensors* 7 (10), 2458-2483.
- Blanchard M., Franchistéguy L., Habets F., Martin É., Noilhan J. (2007) 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.
- 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.
- 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.
- 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, Royaume-Uni and New York, NY, États-Unis.
- De Rosnay P., Calvet J.C., Kerr Y., Wigneron J.P., Lemaître F., Escorihuela M.J., Sabater J.M., Saleh K., Barrié J., Bouhours G., Coret L., Cherel G., Dedieu G., Durbe R., Fritz N.E.D., Froissard F., Hoedjes J., Kruszwski A., Lavenu F., Suquia D., Waldteufel P. (2006) SMOSREX: A long term field campaign experiment for soil moisture and land surface processes remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 102 (3/4), 377-389.
- Habets F., Noilhan J., Golaz C., Goutorbe J., Lacarrère P., Leblois É., Ledoux E., Martin É., Ottlé C., Vidal-Madjar D. (1999) The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area – Part 1: Model and database. *Journal of Hydrology*, 217 (1-2), 75-96.
- 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 (2008) *Journal of Geophysical Research*, 113, D06113.
- Hayhoe K., Wake C.P., Huntington T.G., Luo L.F, Schwartz M.D., Sheffield J., Wood E.F., Anderson B., Bradbury J., DeGaetano A., Troy T.J., Wolfe D. (2007) Past and future changes in climate and hydrological indicators in the US Northeast. *Climate Dynamics*, 28 (4), 381-407.
- Jacquart C., Choisnel E. (1995) Un modèle de bilan hydrique simplifié à deux réservoirs utilisable en agrométéorologie. *La Météorologie*, 9, 29-44.
- Lakshmi V., Piechota T., Narayan U., Tang C. (2004) Soil moisture as an indicator ow weather extremes. *Geophysical Research Letters* 31, L11401.
- 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.), 435-454, NATO Sciences Service.
- Liang X., Lettenmaier D.P., Wood E.F., Burges S. J. (1994) A simple hydrologically based model of land-surface water and energy fluxes for general-circulation models. *Journal of Geophysical Research* 99 (D7), 14415-14428.
- Mesinger F., Dimego G., Kalnay E., Mitchell K., Shafran P.C., Ebisuzaki W., Jović D., Woolen J., Rogers E., Berbery E.H., Ek M.B., Fan Y., Grumbine R., Higgins W., Li H., Lin Y., Manikin, G., Parrish D., Shi W. (2006) North American regional analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87 (3), 343-360.
- Mo K.C., Chelliah M. (2006) The modified Palmer Drought Severity Index based on the NCEP North American Regional Reanalysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45 (10), 1362-1375.
- Nakićenović N., Swart R. (Eds.) (2002) *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 612 p.
- Narasimhan B., Srinivasan R. (2005) Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133 (1-4), 69-88.
- Palmer W. C. (1965) *Meteorological drought*. Research Paper 45, US Department of Commerce, US Weather Bureau, Office of Climatology, 58 p.
- Pellarin T., Calvet J.C., Wganer W. (2006) Evaluation of ERS scatterometer soil moisture products over a half-degree region in southwestern France. *Geophysical Research Letters* 33, L17401.
- Quintana Seguí P., Le Moigne P., Durand Y., Martin É., Habets F., Baillon M., Canellas C., Franchistéguy L., Morel S. (2008) Analysis of near surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN reanalysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47 (1), 92-107.
- Sheffield J., Goteti G., Wen F., Wood E.F. (2004) A simulated soil moisture based drought analysis for the United States. *Journal of Geophysical Research*, 109, D24108.

- Sheffield J., Wood E.F. (2007) Characteristics of global and regional drought, 1950-2000: Analysis of soil moisture data from off-line simulation of the terrestrial hydrologic cycle. *Journal of Geophysical Research*, 112, D17115.
- Sheffield J., Wood E.F. (2008) Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate Dynamics*, sous presse.
- Somot S., Sevault S., Déqué M., Crépon M. (2008) 21<sup>st</sup> century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled atmosphere-ocean regional climate model. *Global and Planetary Change*, sous presse.
- 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., Balmaseda 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 multimodel assessment of future climatological droughts in the UK. *International Journal of Climatology*, accepté.
- Vidal J.-P., Wade S.D. (2008b) A framework for developing high-resolution multi-model climate projections: 21st century scenarios for the UK. *International Journal of Climatology*, 28 (7), 843-858.
- Vidal J.-P., Wade S.D. (2008c) Multimodel projections of catchment-scale precipitation regime. *Journal of Hydrology*, 353 (1-2), 143-158.
- Wang G. (2005) Agricultural drought in a future climate: Results from 15 climate models participating in the IPCC 4th assessment. *Climate Dynamics*, 25 (7-8), 739-753.
- Wilhite D.A., Glantz M.H. (1985) Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10 (3), 11-120.