Variabilité spatio-temporelle de l'humidité du sol et des sécheresses en France

Rapport intermédiaire du projet CLIMSEC

Jean-Philippe VIDAL





 $27 \ \mathrm{avril} \ 2009$

Résumé

Ce rapport présente les résultats d'une modélisation rétrospective de l'humidité du sol sur 50 ans avec la chaîne hydrométéorologique SAFRAN-ISBA-MODCOU et une analyse spatiotemporelle des événements de sécheresse à l'aide d'un indice standardisé cohérent spatialement. L'analyse des tendances sur l'humidité du sol sur la période 1958-2008 montre un assèchement statistiquement significatif des sols de la moitié sud pendant la période hivernale. Les caractéristiques des événements de sécheresse révèlent des disparités régionales notamment en termes de durée et de sévérité moyenne sur la période considérée. Des procédures ont enfin été implémentées afin de procéder à une analyse régionale par événements, et cela à plusieurs échelles de temps.

Le présent document est une version synthétique du rapport intermédiaire du projet CLIM-SEC (« Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol »). Il constitue un des livrables du lot 1 : « Étude de la variabilité de l'eau du sol sur la période 1958-2008 sur la France ».

Table des matières

Introduction

1	Réanalyse Safran-Isba-Modcou 1958-2008	3
	1.1 Réanalyse atmosphérique SAFRAN	3
	1.1.1 Présentation du système d'analyse	3
	1.1.2 Validation	3
	1.2 Simulation hydrologique	5
2	Variabilité spatio-temporelle de l'humidité du sol	7
	2.1 Humidité du sol	7
	2.2 Résultats	8
3	Étude des sécheresses	11
	3.1 Définition d'un indice de sécheresse	11
	3.2 Caractérisation spatio-temporelle des événements	13
	3.3 Résultats	13
Co	Conclusions	
\mathbf{A}	Publications relatives au projet	20

 $\mathbf{2}$

Introduction

Ce rapport présente les grandes lignes des résultats obtenus à l'issue de la première année du projet CLIMSEC (« Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol »). Il constitue un des livrables du lot 1 : « Étude de la variabilité de l'eau du sol sur la période 1958-2008 sur la France ».

Une grande partie de cette première année a été consacrée à la construction et la validation d'une analyse atmosphérique de la période 1958-2008 à l'aide du système SAFRAN, au pas de temps horaire et à la résolution spatiale de 8 km sur la France. La qualité de cette réanalyse atmosphérique conditionne en effet toutes les étapes suivantes du projet, puisqu'elle va constituer à la fois la référence en termes de climat présent sur la France et les données d'entrée des simulations hydrologiques – et donc d'humidité du sol – sur la période 1958-2008. La validation de la réanalyse atmosphérique SAFRAN a fait l'objet d'un article en cours de soumission à l'*International Journal of Climatology* (Vidal *et al.*, 2009) et sera présentée de manière succincte dans le chapitre 1 avec une rapide description de la simulation hydrologique avec le schéma de surface ISBA.

Le chapitre 2 présente les résultats obtenus en termes de modélisation de l'humidité du sol et de sa variabilité spatio-temporelle, et le chapitre 3 décrit l'approche utilisée pour caractériser les événements de sécheresse de manière locale et régionale.

Chapitre 1

Réanalyse Safran-Isba-Modcou 1958-2008

1.1 Réanalyse atmosphérique SAFRAN

1.1.1 Présentation du système d'analyse

SAFRAN¹ est un système d'analyse permettant de reconstruire des profils verticaux de l'atmosphère sur des zones climatiquement homogènes, à partir d'observations au sol et de produits de modèles de circulation générale à grande échelle. Ces profils sont ensuite projetés spatialement et verticalement sur une grille régulière de 8 km sur la France. Le système SAFRAN, développé à l'origine pour la prévision d'avalanches sur les Alpes (Durand *et al.*, 2009), a récemment été étendu à l'ensemble du territoire français et a fait l'objet d'une validation approfondie (Le Moigne, 2002; Quintana-Seguí *et al.*, 2008). Dans le cadre du projet, SAFRAN a été exécuté sur la période courant du 1^{er} août 1958 au 31 juillet 2008 à partir de l'ensemble des observations au sol disponibles dans la base de données climatologique de Météo-France et des produits de réanalyse grande échelle du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (Uppala *et al.*, 2005; ECMWF, 2008).

1.1.2 Validation

83 stations synoptiques présentes sur l'ensemble de la période 1958-2008 et représentatives du climat français ont été sélectionnées comme stations de validation. Les mesures de précipitations, température, humidité relative, vitesse du vent et rayonnement visible effectuées par ces stations ont été comparées aux résultats correspondants de l'analyse SAFRAN. La Figure 1.1 montre l'évolution temporelle du biais et de l'erreur quadratique moyenne – calculés à pas de temps journalier – par rapport à l'ensemble des stations de validation pour les variables mesurées. L'analyse SAFRAN présente un biais très faible par rapport à ces données non-indépendantes pour l'ensemble des variables considérées. Ce biais est par ailleurs relativement constant sur l'ensemble de la période. On peut néanmoins constater quelques changements dans les années 1990 – notamment pour la température et l'humidité de l'air – coïncidant avec la forte augmentation de la densité du réseau de mesures sur la France. L'évolution du biais sur le vent peut être relié à des changements de technologies des capteurs anémométriques dans

¹Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige



FIG. 1.1 – Évolution temporelle du biais (carrés) et de l'erreur quadratique moyenne (RMSE, disques) moyennés sur les stations de validation. De gauche à droite et de haut en bas Sont représentés les précipitations totales (P), la température de l'air (T), l'humidité relative (RH), la vitesse du vent (W) et le rayonnement visible (SR). Le graphe en bas à droite montre le nombre de stations (sur 83) ayant effectivement fourni des observations pour chaque année.

les années 1980. L'erreur quadratique moyenne est elle aussi relativement faible et constante dans le temps, montrant la qualité de la réanalyse atmosphérique.

De nombreux autres éléments de validation, notamment avec des données indépendantes, sont décrits en détail dans l'article en cours de soumission. La climatologie SAFRAN est en outre comparée aux climatologies spatialisées obtenues avec la méthode AURELHY (Bénichou et Le Breton, 1987), et les tendances sur les précipitations et température comparées aux tendances correspondantes sur des séries homogénéisées (Moisselin *et al.*, 2002).

1.2 Simulation hydrologique

L'analyse atmosphérique SAFRAN a été utilisée pour forcer le schéma de surface ISBA² sur la période considérée. ISBA est un schéma de transfert sol-végétation-atmosphère, simulant les échanges d'eau et d'énergie entre la surface du sol, la végétation et les basses couches de l'atmosphère (Noilhan et Mahfouf, 1996). Son fonctionnement est représenté sur la Figure 1.2. La végétation est dérivée de la base de données ECOCLIMAP (Masson *et al.*, 2003) et la texture du sol est représentée par un pourcentage de sable et d'argile donné sur la Figure 1.3.



FIG. 1.2 – Schéma simplifié du fonctionnement du modèle de surface ISBA, d'après Quintana Seguí (2008). Les flèches montrent les principaux flux d'eau.



FIG. 1.3 – Pourcentage de sable et d'argile pour chacune des mailles de la grille ISBA.

Le drainage et le ruissellement de surface produit par le modèle de surface ISBA est ensuite fourni au modèle hydrogéologique MODCOU qui simule le transfert de l'eau vers et dans les

²Interface Sol-Biosphère-Atmosphère

rivières ainsi que l'évolution des nappes aquifères (Ledoux *et al.*, 1989). L'ensemble de la chaîne hydrométéorologique a été validé sur l'ensemble de la France par Habets *et al.* (2008) par comparaison à des observations quotidiennes de débit, hauteurs de nappes et hauteurs de neige sur la période 1995-2005.

Dans le cadre du projet, les modèles ISBA et MODCOU ont été appliqués sur la période 1958-2008. Trois ans de spin-up ont été utilisés pour initialiser la simulation ISBA en 1958. Les niveaux initiaux des nappes dans MODCOU ont été initialisés en régime permanent.

Chapitre 2

Variabilité spatio-temporelle de l'humidité du sol

2.1 Humidité du sol

La variabilité spatio-temporelle de l'humidité du sol est évaluée dans le cadre de ce projet à l'aide d'un modèle hydrologique à grande échelle – ici ISBA –, méthode qui a fait ses preuves, notamment aux États-Unis (Maurer *et al.*, 2002; Sheffield *et al.*, 2004, voir par ex.). L'humidité du sol est représentée dans ISBA par les contenus en eau des trois couches de sol schématisées sur la Figure 1.2. Ce contenu en eau est intégré sur la profondeur du sol puis adimensionalisée par les contenus caractéristiques du sol et de la végétation de la maille considérée pour calculer l'indice d'humidité du sol *SWI (Soil Wetness Index)* selon la formule suivante :

$$SWI = \frac{w - w_{wilt}}{w_{fc} - w_{wilt}} \tag{2.1}$$

où w contenu en eau intégré sur la profondeur du sol, w_{wilt} contenu en eau au point de flétrissement et w_{fc} contenu en eau à la capacité au champ.

Cet indice d'humidité du sol a fait l'objet de nombreuses comparaisons à des mesures in-situ et/ou des données satellite (Habets *et al.*, 1999*a*; Pellarin *et al.*, 2006; Baghdadi *et al.*, 2007; Paris Anguela *et al.*, 2008; Albergel *et al.*, 2008). Il permet de disposer d'une vision spatiale et à long terme de l'humidité du sol sur la France, impossible à obtenir au travers des campagnes de mesures locales et/ou ponctuelles comme HAPEX-MOBILHY (Habets *et al.*, 1999*b*) ou SMOSREX (de Rosnay *et al.*, 2006), ou bien grâce à des données satellites disponibles uniquement pour des périodes récentes.

Les critères actuels de la procédure de classement en état de *Catastrophe Naturelle Séche*resse utilisent les résultats d'un modèle de bilan hydrique appliqué sur 84 stations en France, avec une réserve utile de 200 mm. La Figure 2.1 compare l'évolution de cette réserve utile pour la station de Blagnac à celle du SWI sur la maille de la grille ISBA la plus proche. On peut voir que les deux indices sont très bien corrélés, et les écarts résultent de la différence de représentativité spatiale du sol et de la végétation : locale pour le bilan hydrique, et maille de 64 km^2 pour ISBA. Une étude spatiale poussée est en cours à la Direction de la Climatologie de Météo-France pour établir une correspondance entre ces deux indices, afin de baser à l'avenir



FIG. 2.1 – Comparaison d'indices d'humidité du sol au pas de temps mensuel sur les dix dernières années. En haut, pourcentage de la réserve utile d'une réserve de 200 mm pour la station de Blagnac. En bas, *Soil Wetness Index* sur la maille la plus proche de cette station.

les critères Catastrophe Naturelle sur le SWI et disposer ainsi d'une meilleure représentation spatiale sur l'ensemble de la France.

2.2 Résultats

La Figure 2.2 présente les valeurs moyennes mensuelles du SWI sur la période 1958-2008. L'échelle de couleur a été limitée à la valeur 1 correspondant à une saturation des sols pour la végétation ($w = w_{fc}$). Ces cartes montrent que les sols sont en moyenne saturés durant les mois de janvier à mars sur l'ensemble de la France, à l'exception notable de la Sologne et des Bouches du Rhône. On peut aussi distinguer d'autres régions plus petites où la recharge des sols en eau n'est pas totalement complète pendant l'hiver, comme les vallées de l'Allier, de la Loire et de la Garonne, la Gironde, la plaine d'Alsace et le littoral méditerranéen. L'humidité du sol suit généralement un cycle annuel avec un minimum en août, avec des valeurs proches du point de flétrissement en Corse, dans les bouches du Rhône et sur la facade atlantique jusqu'en Beauce. L'humidité du sol est systématiquement plus élevée sur les reliefs, en raison de précipitations généralement plus élevées et d'une évapotranspiration plus limitée.

La Figure 2.3 présente les tendances linéaires du SWI sur la période considérée ainsi que leur significativité statistique. On peut constater que l'humidité du sol tend généralement à diminuer au cours de cette période, avec des baisses significatives sur une grande partie de la moitié sud du pays en hiver et au printemps, lorsque les sols stockent habituellement l'eau. On peut relier cette baisse aux tendances observées d'une part sur les précipitations, qui montrent une baisse (non significative) sur la moitié sud du pays, et d'autre part sur les températures qui



FIG. 2.2 – Moyennes mensuelles du SWI sur la période 1958-2008. La couleur bleu foncé indique une humidité supérieure à la capacité au champ.



FIG. 2.3 – Tendances linéaires du SWI (an^{-1}) sur la période 1958-2008. Les points indiquent des tendances statistiquement significatives (test de Mann-Kendall à 95%).

ont augmenté sur l'ensemble du pays (Moisselin *et al.*, 2002). Cette modélisation suggère ainsi un assèchement généralisé des sols français sur la période 1958-2008, marqué plus nettement en hiver et dans la moitié sud du pays.

Chapitre 3

Étude des sécheresses

3.1 Définition d'un indice de sécheresse

L'indice de sécheresse en termes d'humidité du sol – sécheresse « agricole » selon la terminologie communément adoptée de Wilhite et Glantz (1985) – développé ici s'inspire des travaux réalisés depuis plusieurs années sur les sécheresses « météorologiques » (déficits pluviométriques) avec le *Standardized Precipitation Index* (Vidal et Wade, 2009). La variable considérée ici est le *SWI* moyenné sur n mois, avec n pouvant varier de 1 à 24 afin de considérer des déficits d'humidité du sol sur des échelles de temps différentes. Le principe est de projeter la distribution statistique de cette variable pour chaque mois de l'année sur une distribution normale centrée réduite.

Le calcul de l'indice standardisé est décrit en détail dans de nombreuses publications mettant en œuvre le *Standardized Precipitation Index* (voir par ex. McKee *et al.*, 1993; Llyod-Hughes et Saunders, 2002). Il nécessite ici le calage de distributions statistiques pour chacune des mailles de la grille ISBA sur la France (soit 8602 mailles), pour chacun des mois de l'année, et pour chacune des échelles de temps considérées. Ce calage a été effectué ici selon une approche d'estimateurs à noyaux gaussiens, compte tenu de la diversité de formes que peuvent emprunter les distributions de l'humidité du sol et que n'auraient pu reproduire des lois classiques.

La Figure 3.1 présente un exemple du *Standardized SWI* à échelle de temps 1 mois – noté à partir de maintenant SSWI-1 – pour une maille près de Toulouse. On peut noter sur le graphe du haut le cycle saisonnier du *SWI* dont le SSWI-1 s'affranchit. Sont identifiés par des couleurs différentes sur la Figure 3.1 trois événements de sécheresses pour un seuil dont la valeur est dépassée seulement 10% du temps en moyenne sur la période 1958-2008. Cette figure illustre la capacité du SSWI d'identifer des événements aussi bien hivernaux qu'estivaux, indépendamment de la valeur absolue de l'humidité du sol.

Un événement local de sécheresse comme ceux identifiés sur la Figure 3.1 peut ainsi être défini par une période où le SSWI-n est constamment négatif et que son minimum est inférieur à un seuil donné. Sa *durée* correspond à la période de temps où l'indice est négatif, sa *sévérité* comme la valeur minimum de l'indice sur la durée de l'événement, et sa *magnitude* comme la somme des valeurs de l'indice sur cette même durée.



FIG. 3.1 - Exemple de SWI et SSWI-1 pour une maille près de Toulouse. En haut, évolution temporelle du SWI avec les seuils correspondant au point de flétrissement (0) et à la capacité au champ (1). En bas, évolution correspondante du SSWI-1 et identification de trois événements de sécheresse dépassant le seuil correspondant à une probabilité de 10%.

3.2 Caractérisation spatio-temporelle des événements

Une sécheresse est un événement qui s'étend à la fois dans l'espace et dans le temps. Il est donc important d'identifier l'ensemble des événements indépendants ayant frappé la France au cours des derniers 50 ans afin de déterminer leurs caractéristiques – et notamment l'évolution de leur extension spatiale – et analyser leur fréquence d'apparition. Une telle approche permet de plus d'identifier les événements de référence pour une caractéristique donnée (durée ou extension maximale, etc.)

La méthode développée ici s'inspire des travaux réalisés dans le cadre du projet européen $ARIDE^1$ portant sur les sécheresses météorologiques (précipitations) et hydrologiques (débits) (Santos *et al.*, 2002), ainsi que de récentes études sur l'humidité du sol réalisées aux États-Unis (Andreadis *et al.*, 2005). La caractérisation spatio-temporelle des sécheresses se déroule ainsi en plusieurs étapes, implémentées sous forme de fonctions en langage interprété R^2 :

- 1. Choix d'une échelle de temps (n);
- 2. Choix d'un seuil sur l'indice de sécheresse (SSWI-n) pour l'état de sécheresse;
- 3. Regroupement spatial des zones contiguës en état de sécheresse pour chaque mois de la période étudiée, et sélection des zones supérieures à une aire donnée;
- 4. Regroupement temporel des zones affectées de manière continue et liées par une aire supérieure à un seuil donné. Cette étape nécessite de prendre en compte des événements se divisant ou se regroupant spatialement au cours du temps;
- 5. Calcul des caractéristiques moyennes de chaque événement (aire maximale affectée, magnitude totale, sévérité moyenne, etc.);
- 6. Calcul pour chaque événement des courbes Sévérité-Aire-Durée (SAD) inspirée des travaux de l'OMM (1969) sur les relations entre intensité, durée et extension des événements précipitants. Cette approche a été reprise récemment pour l'analyse des caractéristiques spatio-temporelles des sécheresses par Andreadis *et al.* (2005) sur les États-Unis et par Sheffield *et al.* (submitted) à l'échelle globale.

3.3 Résultats

L'analyse locale des événements de sécheresse permet d'avoir une vue spatialisée des caractéristiques moyennes de ces événements, à l'instar des travaux réalisés par Sheffield et Wood (2007, 2008*a*). La Figure 3.2 en présente quelques exemples, sur la base du SSWI-1 avec un seuil à 10%. On peut constater que le nombre d'événements distincts est relativement important sur le relief des Pyrénées, des Alpes du Nord et du Jura, ainsi que sur le Cotentin. Ces événements apparaissent de fait assez courts sur ces même régions (Figure 3.2 au milieu). On peut aussi noter les résultats particuliers sur la région parisienne dus au caractère intégralement urbain de cette zone. La Figure 3.2 montre aussi que les sécheresses débutent préférentiellement en janvier ou février au nord de la Loire, mais seulement à la fin du printemps dans les Alpes et sur l'ensemble des contreforts pyrénéens.

La reconnaissance des années concernées par la sécheresse peut s'effectuer à partir de cette analyse locale en calculant la superficie du territoire affectée par la sécheresse pour chaque mois de la période considérée, comme représenté sur la Figure 3.3. On peut reconnaître les

¹Assessment of the Regional Impacts of Droughts in Europe (www.hydrology.uni-freiburg.de/forsch/aride/) ²www.r-project.org



FIG. 3.2 - Exemples de caractéristiques moyennes des événements de sécheresses sur la période 1958-2008, avec le SSWI-1 et un seuil de sécheresse fixé à 10%.

sécheresses bien connues de 1976, 1989-1990 et 2003, mais aussi d'autres événements comme celui de l'automne 1978.

La représentation spatiale des valeurs du SSWI permet quant à elle de saisir l'évolution de l'extension de l'événement considéré, comme le montrent les Figures 3.4 et 3.5 pour les sécheresses de 1976 et 2003. Les résultats de l'analyse régionale par événements seront présentés dans un rapport ultérieur.



FIG. 3.3 – Superficie affectée par la sécheresse, exprimée en pourcentage de la superficie de la France et calculée à partir du SSWI-1 avec un seuil à 10%.



FIG. 3.4 – Représentation de la sécheresse de 1976 avec le SSWI-1. L'échelle de couleur est dérivée de la classification traditionnelle du *Standardized precipitation Index*.



FIG. 3.5 – Représentation de la sécheresse de 2003 avec le SSWI-1.

Conclusions

Ce rapport présente les résultats d'une modélisation rétrospective de l'humidité du sol sur 50 ans avec la chaîne hydrométéorologique SAFRAN-ISBA-MODCOU et une analyse spatiotemporelle des événements de sécheresse à l'aide d'un indice standardisé cohérent spatialement. L'analyse des tendances sur l'humidité du sol sur la période 1958-2008 montre un assèchement statistiquement significatif des sols de la moitié sud pendant la période hivernale. Les caractéristiques des événements de sécheresse révèlent des disparités régionales notamment en termes de durée et de sévérité moyenne sur la période considérée. Des procédures ont enfin été implémentées afin de procéder à une analyse régionale par événements, et cela à plusieurs échelles de temps.

Le Standardized Soil Wetness Index présenté dans le chapitre 3 est particulièrement adapté aux études d'impact du changement climatique, puisqu'il est calculé en référence aux distributions statistiques de l'humidité du sol sur la période de référence considérée, ici 1958-2008. Le calcul de cet indice à partir de projections hydrologiques futures s'effectuera en référence aux mêmes distributions et permettra d'identifier rapidement d'éventuels impacts sur les caractéristiques spatio-temporelles des événements de sécheresse, suivant les méthodes mises en œuvre par Sheffield et Wood (2008b) et Vidal et Wade (2009).

Bibliographie

- ALBERGEL, C., RÜDIGER, C., PELLARIN, T., CALVET, J.-C., FRITZ, N., FROISSARD, F., SUQUIA, D., PETITPA, A., PIGUET, B. et MARTIN, E. (2008), From near-surface to root-zone soil moisture using an exponential filter : an assessment of the method based on in-situ observations and model simulations. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 12, n° 6, p. 1323–1337.
- ANDREADIS, K. M., CLARK, E. A., WOOD, A. W., HAMLET, A. F. et LETTENMAIER, D. P. (2005), Twentieth-century drought in the conterminous United States. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 6, n^o 6, p. 985–1001.
- BAGHDADI, N., AUBERT, M., CERDAN, O., FRANCHISTÉGUY, L., VIEL, C., MARTIN, E., ZRIBI, M. et DESPRATS, J.-F. (2007), Operational mapping of soil moisture using synthetic aperture radar data : application to the Touch basin (France). Sensors, vol. 7, nº 10, p. 2458–2483.
- BÉNICHOU, P. et LE BRETON, O. (1987), Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. La Météorologie, vol. 19, p. 23–34.
- 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., KRUSZEWSKI, A., LAVENU, F., SUQUIA, D. et WALDTEUFEL, P. (2006), SMOSREX : A long term field campaign experiment for soil moisture and land surface processes remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, vol. 102, n° 3/4, p. 377– 389.
- DURAND, Y., LATERNSER, M., GIRAUD, G., ETCHEVERS, P., LESAFFRE, B. et MÉRINDOL, L. (2009), Reanalysis of 44 years of climate in the French Alps (1958-2002) : Methodology, model validation, climatology and trends for air temperature and precipitation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 48, n° 3, p. 429–449.
- ECMWF (2008), Changes to the operational forecasting system. *ECMWF Newsletter*, vol. 114, p. 3–4.
- HABETS, F., BOONE, A., CHAMPEAUX, J.-L., ETCHEVERS, P., FRANCHISTÉGUY, L., LEBLOIS, E., LE-DOUX, E., LE MOIGNE, P., MARTIN, E., MOREL, S., NOILHAN, J., QUINTANA SEGUÍ, P., ROUSSET-REGIMBEAU, F. et VIENNOT, P. (2008), The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, p. D06 113.
- HABETS, F., NOILHAN, J., GOLAZ, C., GOUTORBE, J.-P., LACARRÈRE, P., LEBLOIS, E., LEDOUX, E., MARTIN, E., OTTLÉ, C. et VIDAL-MADJAR, D. (1999b), The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area – Part I : Model and database. *Journal of Hydrology*, vol. 217, n° 1-2, p. 75–96.
- HABETS, F., NOILHAN, J., GOLAZ, C., GOUTORBE, J.-P., LACARRÈRE, P., LEBLOIS, E., LEDOUX, E., MARTIN, E., OTTLÉ, C. et VIDAL-MADJAR, D. (1999a), The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area – Part II : Simulation of streamflows and annual water budget. *Journal of Hydrology*, vol. 217, nº 1-2, p. 97–118.

- LE MOIGNE, P. (2002), Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN. Note de centre CNRM/GAME 77, CNRM/GAME.
- LEDOUX, E., GIRARD, G., DE MARSILY, G. et DESCHENES, J. (1989), Spatially distributed modeling : conceptual approach, coupling surface water and ground-water. Dans : Unsaturated flow hydrologic modeling : theory and practice (H. J. Morel-Saytoux, éd.), vol. 275 de NATO ASI Series C, p. 435–454, Kluwer, Norwell, Massachussets.
- LLYOD-HUGHES, B. et SAUNDERS, M. A. (2002), A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, vol. 22, nº 13, p. 1571–1592.
- MASSON, V., CHAMPEAUX, J.-L., CHAUVIN, F., MERIGUET, C. et LACAZE, R. (2003), A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models. *Journal* of *Climate*, vol. 16, n° 9, p. 1261–1282.
- MAURER, E. P., WOOD, A. W., ADAM, J. C. et LETTENMAIER, D. P. (2002), A long-term hydrologically based dataset of land surface fluxes and states for the conterminous United States. *Journal of Climate*, vol. 15, n° 22, p. 3237–3251.
- MCKEE, T., DOESKEN, N. et KLEIST, J. (1993), The relationship of drought frequency and duration to time scales. Dans : *Preprints of the 8th Conference on Applied Climatology*, p. 179–184, Anaheim, California.
- MOISSELIN, J.-M., SCHNEIDER, M., CANELLAS, C. et MESTRE, O. (2002), Les changements climatiques en France au XX^e siècle. *La Météorologie*, vol. 38, p. 45–56.
- NOILHAN, J. et MAHFOUF, J.-F. (1996), The ISBA land surface parameterisation scheme. *Global and Planetary Change*, vol. 13, n° 1-4, p. 145–159.
- OMM (1969), Manual for depth-area-duration analysis of storm precipitation. *Rap. tech. 237.TP.129*, Organisation Météorologique Mondiale, Geneva, Switzerland.
- PARIS ANGUELA, T., ZRIBI, M., HASENAUER, S., HABETS, F. et LOUMAGNE, C. (2008), Analysis of surface and root-zone soil moisture dynamics with ERS scatterometer and the hydrometeorological model SAFRAN-ISBA-MODCOU at Grand Morin watershed (France). *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 6, nº 12, p. 1415–1424.
- PELLARIN, T., CALVET, J.-C. et WAGNER, W. (2006), Evaluation of ERS scatterometer soil moisture products over a half-degree region in southwestern France. *Geophysical Research Letters*, vol. 33, p. L17 401.
- QUINTANA SEGUÍ, P. (2008), Simulation hydrologique en région méditerranéenne avec SAFRAN-ISBA-MODCOU. Amélioration de la physique et évaluation des risques dans le cadre du changement climatique. Thèse de doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier.
- QUINTANA-SEGUÍ, P., LE MOIGNE, P., DURAND, Y., MARTIN, E., HABETS, F., BAILLON, M., CANEL-LAS, C., FRANCHISTÉGUY, L. et MOREL, S. (2008), Analysis of near surface atmospheric variables : Validation of the SAFRAN analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 47, nº 1, p. 92–107.
- SANTOS, M. J., VERÍSSIMO, R., FERNANDES, S., ORLANDO, M. et RODRIGUES, R. (2002), Meteorological droughts focused on a pan-European context. Dans : *FRIEND 2002 - REgional Hydrology : Bridging the Gap between Research and Practice* (H. A. J. van Lanen et S. Demuth, éds.), n° 274 dans IAHS Red Books, p. 273–280, IAHS.

- SHEFFIELD, J., ANDREADIS, K. M., WOOD, E. F. et LETTENMAIER, D. P. (submitted), Global and continental drought in the second half of the 20th century : severity-area-duration analysis and temporal variability of large-scale events. *Journal of Climate*.
- SHEFFIELD, J., GOTETI, G., WEN, F. et WOOD, E. F. (2004), A simulated soil moisture based drought analysis for the United States. *Journal of Geophysical Research*, vol. 109, p. D24108.
- SHEFFIELD, J. et 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*, vol. 112, p. D17 115.
- SHEFFIELD, J. et WOOD, E. F. (2008a), Global trends and variability in soil moisture and drought characteristics, 1950–2000, from observation-driven simulations of the terrestrial hydrologic cycle. *Journal of Climate*, vol. 21, n° 3, p. 432–458.
- SHEFFIELD, J. et WOOD, E. F. (2008b), Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate Dynamics*, vol. 31, nº 1, p. 79–105.
- 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, S., K.and Saarinen, 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., DRA-GOSAVAC, M., FISHER, M., FUENTES, M., HAGEMANN, S., HÓLM, E., HOSKINS, B. J., ISAKSEN, L., 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. et WOOLLEN, J. (2005), The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 131, n° 612, p. 2961–3012.
- VIDAL, J.-P., MARTIN, É., BAILLON, M., FRANCHISTÉGUY, L. et SOUBEYROUX, J.-M. (2009), SA-FRAN 50-year high-resolution meteorological renalysis over France. International Journal of Climatology, en préparation.
- VIDAL, J.-P. et WADE, S. D. (2009), A multimodel assessment of future climatological droughts in the UK. *International Journal of Climatology*, in press.
- WILHITE, D. A. et GLANTZ, M. H. (1985), Understanding the drought phenomenon : The role of definitions. *Water International*, vol. 10, n° 3, p. 111–120.

Annexe A

Publications relatives au projet

Articles

VIDAL, J.-P., MARTIN, É., BAILLON, M., FRANCHISTÉGUY, L. et SOUBEYROUX, J.-M. (2009), SAFRAN 50-year high-resolution meteorological renalysis over France. *International Journal* of *Climatology*, soumis.

SOUBEYROUX, J.-M., MARTIN, É., FRANCHISTÉGUY, L., HABETS, F., NOILHAN, J., BAILLON, M., REGIMBEAU, F., VIDAL, J.-P., LE MOIGNE, P. et MOREL, S. (2008), Un outil pour le suivi hydrométéorologique opérationnel et les études : l'application Safran–Isba–Modcou (SIM). La Météorologie, vol. 63, p. 40–45.

Communications

VIDAL, J.-P., MARTIN, É., FRANCHISTÉGUY, L., SOUBEYROUX, J.-M., BAILLON, M. et BLAN-CHARD, M. (2009), Multilevel drought reanalysis over France with Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. *Geophysical Research Abstracts*, vol. 11, n^o 7068. Communication orale à l'European Geosciences Union General Assembly 2009

VIDAL, J.-P. et MOISSELIN, J.-M. (2008), Impact du changement climatique sur les sécheresses en France. Dans : Actes du XXI^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie : Climat et risques climatiques en Méditerranée (F. Vinet, éd.), p. 655–660, AIC, Montpellier, France.

VIDAL, J.-P. et SOUBEYROUX, J.-M. (2008), Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. Dans : *SEC 2008 – Symposium International – Sécheresse et Constructions* (J.-P. Magnan, R. Cojean, Y.-J. Cui et P. Mestat, éds.), vol. 1, p. 25–31, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC, Marne-la-Vallée, France.

Rapport de stage

BORNOVILLE, L. et BOURNONVILLE, J. (2008), Évaluation de l'indice de sécheresse de Palmer avec les données issues du modèle SAFRAN-ISBA-MODCOU. Rapport de stage de fin d'études n°1122, École Nationale de la Météorologie.