

# Typologie des sécheresses sur la France et outils de suivi de la ressource en eau utilisés à Météo-France

**M. BLANCHARD,  
L. FRANCHISTÉGUY**

Météo-France,  
Direction de la Climatologie  
42, ave G. Coriolis  
31057 Toulouse Cedex  
michele.blanchard@meteo.fr

**F. HABETS**

CNRS/UMR-Sisyphe 7619  
Paris

**É. MARTIN, J. NOILHAN**

CNRM-GAME  
(Météo-France, CNRS)  
Toulouse

## Résumé

La France a subi des sécheresses en 2003, 2005 et 2006, dont les conséquences notamment sur les bâtiments ont mis en lumière l'importance de ce risque naturel. En raison de ses missions, Météo-France suit l'ensemble des phénomènes météorologiques, dont les sécheresses, via la quantification des déficits pluviométriques observés par un important réseau de mesure de précipitations et des systèmes d'analyse atmosphérique. Dans cet article, on présente les différents types de sécheresse et la comparaison des sécheresses récentes par rapport aux sécheresses connues dans le passé. De plus, Météo-France utilise des modèles de suivi du bilan en eau comme le modèle Safran Isba Modcou (SIM) pour mieux appréhender les conséquences des déficits pluviométriques et de la demande évaporative sur l'extension et l'intensité de la sécheresse. SIM permet de calculer des bilans d'eau spatialisés et en particulier un indice d'humidité du sol et un stock de neige sur les montagnes. Ces données sont utilisées dans le suivi hydrologique en France. Les caractéristiques et quelques résultats en terme de contenu en eau du sol de deux de ces modèles sont présentés.

**Mots-clés :** sécheresse, ressources en eau, hydrométéorologie, changement climatique.

# Typology of droughts over France and tools for estimation of water resources used at Météo-France

## Abstract

France has recently underwent several drought in 2003, 2005 and 2006, with important damage on the building. Météo-France, the french weather service, monitor the evolution of the dryness, via the quantification of the pluviometric deficits based on an important observation network of precipitations and some atmospheric analysis. In this article, the various types of dryness and the comparison of the recent drynesses compared to the older ones are presented. Météo-France also monitors the water budget by using models as the Safran Isba Modcou (SIM) model. Such model allows to estimate the consequences of the pluviometric deficits and the evaporative demand on the soil water content, and thus, on the extension and the intensity of the dryness. The characteristics and some results in term of soil moisture from two of these models are presented. SIM allows calculating assessments of water and in particular indication of humidity of the ground and stock of snow on mountains. These data are used in the hydrological follow-up in France.

**Key words:** drought, water resources, hydrometeorology, climate change.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 avril 2008.

## Introduction

La sécheresse géotechnique est la conséquence visible sur le bâti de mouvements de terrain liés au changement de volume du sol (principalement argileux) subissant un assèchement inhabituel. Cette notion de sécheresse géotechnique est donc proche de la notion de sécheresse, mais, restreinte plus particulièrement à certains types de sol (argileux et pentus par exemple). Dans cet article, on s'intéressera à la notion de sécheresse, dans le sens générique du terme, qui peut être défini de la manière suivante : la sécheresse correspond au maintien sur des périodes de longueur variable (de la semaine à plusieurs années) de conditions hydriques déficitaires par rapport à un seuil critique (état normal, maximal ou nécessaire au bon développement de la végétation).

La sécheresse se caractérise donc par un déficit de précipitation, dont l'effet peut être accentué par une forte demande évaporative de l'atmosphère. Météo-France est particulièrement engagé dans les actions de suivi de sécheresse. Il a en effet pour mission le suivi des cumuls de précipitations, à partir d'un réseau d'observation (pluviomètres et radars) assez étendu, d'analyse et aussi de prévision. De plus, Météo-France, via les modèles de prévision du temps et de climat, a acquis une expertise sur la modélisation du bilan hydrique en surface. Cette expertise est utilisée depuis plusieurs années pour le suivi opérationnel du bilan hydrique, qui est géré en temps réel, et permet notamment de répondre à des besoins sur l'estimation de la ressource en eau, pour l'agriculture, et pour la prévision des feux de forêts.

Dans cet article, on présente tout d'abord les causes météorologiques conduisant à une sécheresse, les différents types de sécheresse ainsi que celles ayant le plus marqué par leur amplitude ou leur intensité. Ensuite, on présente les outils utilisés pour réaliser le suivi de la ressource en eau en temps réel, et quelques résultats obtenus dans la dernière décennie. Enfin, on aborde l'impact attendu du changement climatique sur les sécheresses, dans le monde et en France.

## Causes et localisation

Les sécheresses permanentes concernent les zones arides soumises à des manques de précipitation chroniques. Ces zones sont en général des régions continentales éloignées des océans (on ne traitera pas de ce type de sécheresse par la suite). Les sécheresses de durée limitée se chiffrant en semaines ou en mois peuvent être observées pratiquement partout ailleurs et notamment en France métropolitaine.

Les sécheresses de durée limitée sont en général liées à des anomalies de circulation atmosphérique de grande échelle favorisant les hautes pressions tant au sol qu'en altitude. De ce fait, il s'agit toujours de phénomènes s'étendant sur plusieurs centaines de km<sup>2</sup> (Fig. 1). Par ailleurs, des phénomènes de grande échelle comme celui d'El Niño qui modifie la circulation de l'océan Pacifique interfère par exemple sur la circulation atmosphérique et provoque des conditions arides en Indonésie, en Inde ou en Australie.

En France, les causes de sécheresse sont souvent liées à la persistance d'un anticyclone qui rejette les perturbations vers le nord.

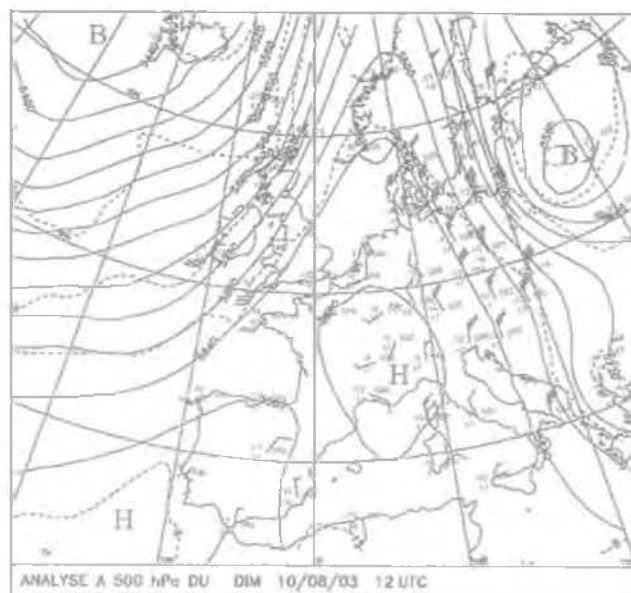


FIG. 1 Situation météorologique type provoquant des épisodes de sécheresse marqués.  
Typical meteorological situation provoking marked episodes of drought.

## Types de sécheresse

On distingue les sécheresses, selon les effets résultants :

- la sécheresse de l'atmosphère correspondant à un déficit d'humidité de l'air, résultant de l'absence de précipitations, d'une évaporation (ou évapotranspiration) limitée, du fait de contenus en eau du sol et/ou de la végétation réduits ou insuffisamment mobilisables; elle est le premier maillon d'un ensemble de processus qui affectent les milieux naturels et les activités humaines ;
- la sécheresse du sol superficiel ou profond (nappes phréatiques), liée à des précipitations déficitaires, à une évaporation importante ou à un ruissellement de surface important. C'est ce type de sécheresse qui affectera les constructions ;
- la sécheresse de la végétation, liée à un déficit d'hydratation des tissus végétaux, résultant d'une alimentation en eau insuffisante de la plante.

L'effet de la sécheresse dépend de sa durée et de son intensité, de la période où elle intervient, mais aussi des réserves en eau du sol et du stade de développement des végétaux :

- la sécheresse hivernale affectera en priorité le remplissage des nappes phréatiques ;
- la sécheresse printanière ou estivale aura un fort impact sur la végétation et les milieux vivants aquatiques ;
- les sécheresses pluriannuelles cumuleront ces effets et auront ainsi un fort impact tant écologique qu'économique.

## Les sécheresses historiques

A l'étranger, les événements extrêmes les plus souvent cités font état de 3 à 10 millions de morts en Inde (1769-1770), 9,5 millions de morts en 1877-1879 en Chine, 100 000 morts dans l'état du Ceara au Brésil l'été suivant, 5 millions de morts en Russie (1921-1922), 3 millions de morts au Bengale en 1942-1943 et plus près de nous de 400 000 victimes au Sahel dans les années 1970-1980.

Parmi les grandes sécheresses que la France a connues au XX<sup>e</sup> siècle, celle de 1976 est particulièrement exceptionnelle par sa durée (décembre 1975-août 1976) et par son intensité (l'été 1976 a été l'un des plus secs du siècle). Elle a surtout touché la moitié nord-ouest du pays. De décembre 1975 à août 1976, les précipitations mensuelles ont été majoritairement déficitaires sur la plupart des régions. Pour certains mois tels que février et juillet, les écarts à la normale n'étaient pas très importants ; par contre, décembre 1975, puis janvier, mai et surtout juin 1976 ont présenté des précipitations particulièrement faibles. La sécheresse intense s'est poursuivie au mois d'août dans la moitié nord du pays, alors que la moitié sud était touchée par des pluies fortement excédentaires. Le tableau I fournit des valeurs du rapport à la normale des pluies du 1/12/1975 au 31/7/1976 pour quelques stations représentatives.

Pour cette période, Brochet (1976) a estimé en étudiant des séries centenaires sur 25 sites et en calculant les quantiles de durée de retour moyen, qu'un rapport pluviométrique  $< 0,4$  avait une durée de retour supérieure à 100 ans,  $< 0,5$  une durée de retour supérieure à 50 ans,  $< 0,6$  une durée de retour supérieure à 20 ans. Bien sûr, la diversité des régimes pluviométriques ne permet pas d'appliquer ces résultats sur une région particulièrement.

La sécheresse de 1989 (qui a démarré dès août 1988 pour s'achever en novembre 1989) a surtout frappé le sud et le sud-est, avec une amplitude comparable à celle de 1976. L'hiver 1988/1989 a été remarquable par son manque de neige en montagne.

A la canicule de l'été 2003 a été associée une sécheresse estivale sévère qui a affecté tout particulièrement

les bâtis. Les températures élevées, tant diurnes que nocturnes, ont nettement aggravé les effets du déficit pluviométrique.

Plus récemment, la sécheresse a affecté le centre et la façade ouest du pays durant les années 2005 et 2006 mettant à mal le remplissage de grandes nappes phréatiques comme celle de la Beauce.

Le tableau II indique quelques sécheresses en France au siècle dernier.

## Suivi de la sécheresse à Météo-France

L'apport en eau par les précipitations et l'état hydrique du sol constituant des facteurs communs pour les différents types de sécheresse, les météorologistes caractérisent la sécheresse en utilisant ces deux facteurs, en particulier pour déterminer la nature exceptionnelle de certaines périodes.

Afin d'assurer un suivi de la ressource en eau sur la France, la direction de l'Eau (DE) du ministère de l'Écologie, de l'Aménagement et du Développement durable réalise mensuellement un bulletin de situation hydrologique national. Météo-France contribue à ce bulletin en alimentant les rubriques « eau dans le sol » et « manteau neigeux » avec des sorties du modèle hydrométéorologique SIM (Safran-Isba-Modcou) et par la fourniture de données permettant une cartographie des précipitations et des précipitations efficaces ainsi que leur rapport à la normale. La DE a, par ailleurs, confié à l'établissement l'élaboration de la partie météorologique des bulletins de situation hydrologique régionaux avec la fourniture de cartes et de données pour les paramètres précipitations, pluies efficaces et évapotranspiration potentielle. Durant la période d'étiage, Météo-France réalise un bulletin décadaire de suivi de la sécheresse et contribue aux comités sécheresse locaux et nationaux. Une expertise est aussi assurée sur les dossiers de catastrophes naturelles inondations et sécheresse soumis à la commission Catastrophes naturelles qui est présidée par la direction de la Défense et de la Sécurité civiles.

**TABLÉAU I** Valeurs du rapport à la normale des pluies du 1/12/1975 au 31/7/1976 pour quelques stations représentatives.  
Values of the report in the normal of the rains of 1/12/1975 in 31/7/1976 for some representative stations.

Abbeville	0,40	Bourges	0,59
Lille	0,47	Nevers	0,44
Cherbourg	0,36	Limoges	0,69
Beauvais	0,37	Clermont-Ferrand	0,62
Reims	0,43	Lyon	0,64
Chartres	0,39	Grenoble	0,53
Paris Orly	0,45	Bourg-St-Maurice	0,43
Langres	0,39	Agen	0,56
Metz	0,58	Bordeaux	0,69
Strasbourg	0,62	Toulouse	0,57
Le Mans	0,44	Nîmes	1,05
Lorient	0,38	Marseille	1,35
Brest	0,44	Nice	0,86
Rennes	0,46	Ajaccio	0,84

**TABLEAU II** Quelques sécheresses en France au siècle dernier.  
Some droughts in France in the last century.

Date	Extension géographique
1995-1998	Nord-Pas-de-Calais, Picardie, Haute-Normandie
1997	Sud-Est
1996	Lorraine
Été 1995	Centre-Est
Novembre 1990 à juin 1991	Sécheresse record dans le Puy-de-Dôme
Hiver 1989-été 1990	Centre-Est
1986	Vendée
1985 et 1983	Centre-Est
1978	Sud
1972	Alsace
1954	Hiver en Lorraine et Franche-Comté
1940	Été en région parisienne
1933	Été dans les Bouches-du-Rhône
1924-1925	Hiver en Roussillon

6

## Outils de suivi de la sécheresse à Météo-France

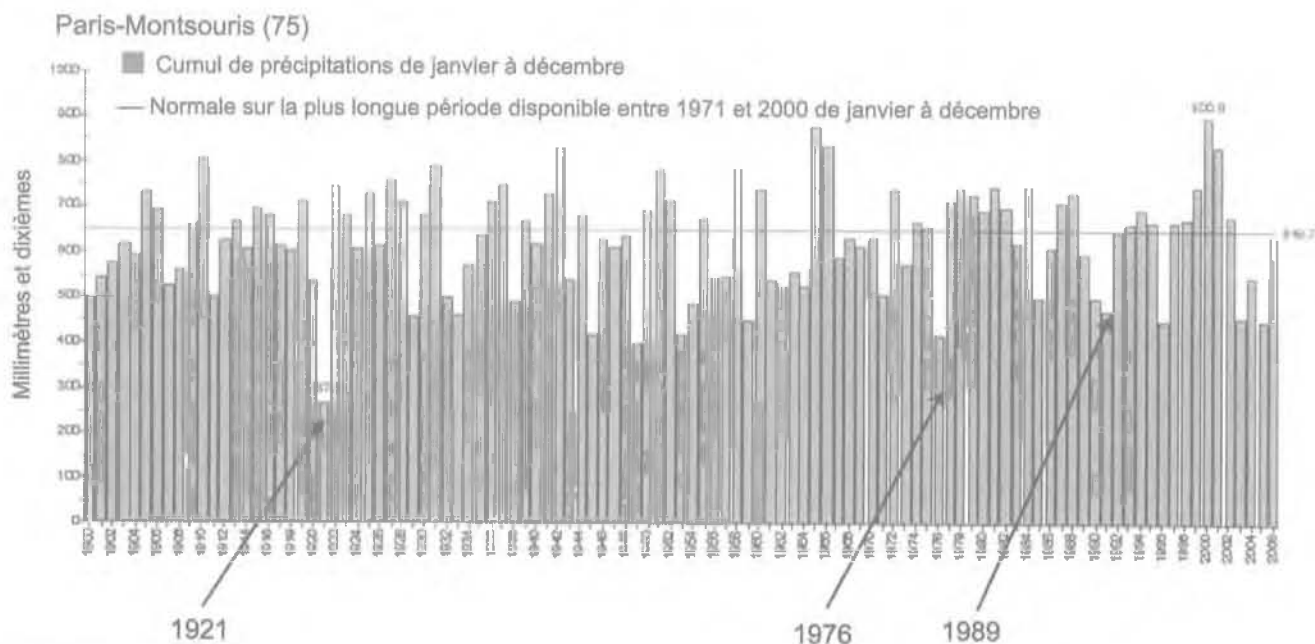
Météo-France utilise depuis plus de dix ans des outils de modélisation permettant de suivre l'impact des conditions climatiques sur le contenu en eau du sol, et donc, ainsi, suivre et quantifier l'état de sécheresse. Un premier modèle, d'origine agronomique, a tout d'abord été utilisé. Ce modèle est utilisé sur un certain nombre de points représentatifs, et ne prend en compte que l'impact sol-végétation-atmosphère. Depuis environ cinq ans, un deuxième modèle a été implémenté. Ce modèle permet de couvrir l'ensemble de la France et permet de simuler, en plus des relations sol-végétation-atmosphère, le débit des rivières et le niveau de certaines nappes phréatiques. De plus, la

couverture neigeuse, qui peut avoir localement un rôle important sur le bilan hydrique, est prise en compte explicitement. Ces deux modèles sont présentés ci-dessous.

6.1

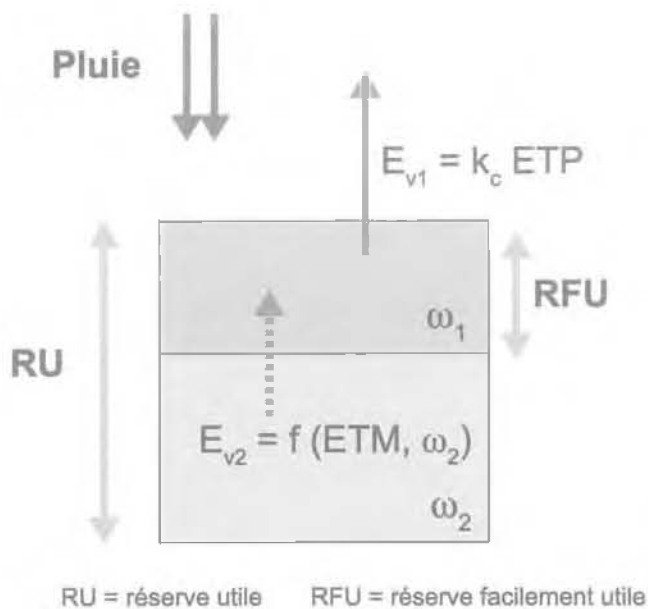
### Modèle de bilan hydrique à deux réservoirs

Le modèle simplifié (Jacquart et Choissel, 1995) est couramment utilisé à Météo-France pour des besoins agrométéorologiques avec des réserves utiles variant de 50 à 200 mm selon le type de couvert végétal et/ou la profondeur des sols. On considère qu'en pratique, trois valeurs de réserve utile convenablement choisies permettent de couvrir l'éventail des réserves utiles rencontrées pour les types de sol d'un département.



**FIG. 2** Cumul annuel de pluie sur le poste Paris-Montsouris sur la période 1900-2006.  
Annual rainy accumulation on the Paris-Montsouris station over the period 1900-2006.

Le principe du modèle est de considérer que c'est par l'intermédiaire du système racinaire du couvert végétal considéré que l'eau est extraite du sol (mécanisme d'évapotranspiration). Le réservoir de surface est évaporé au taux potentiel pondéré par le coefficient cultural. Le réservoir profond n'est évaporé qu'une fois le réservoir de surface vide, à un taux diminuant avec son contenu (réponse linéaire par rapport à l'état du réservoir) (Fig. 3).



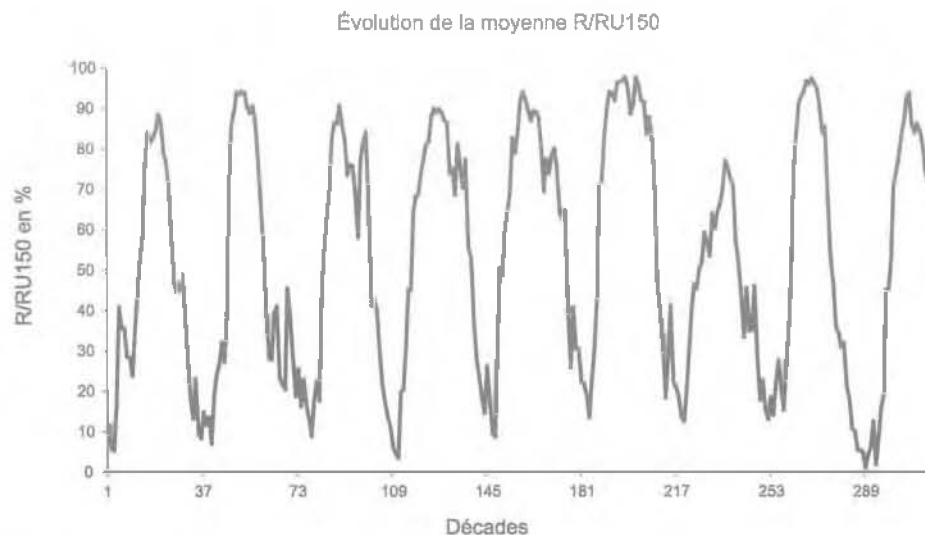
**FIG. 3** Principe du modèle de bilan hydrique à deux réservoirs.  
Principle of the model of assessment hydrique of 2 reservoirs.

L'écoulement (qu'il soit ruissellement de surface ou écoulement profond) n'est pas distingué et se produit lorsque la réserve calculée dépasse la réserve utile.

On considère que l'eau profonde située au-delà de la limite des racines les plus profondes n'est pas disponible en surface (les remontées capillaires étant faibles). Ceci a par exemple été confirmé par les mesures d'humidité des sols lors de l'expérience Murex près de Toulouse, sol argileux couvert par une jachère vieille de plusieurs années. On a bien constaté que l'humidité du sol au-delà de 120 cm restait pratiquement constante au cours de l'année. Le gazon est la couverture de surface de ce modèle. Cette méthode ne rend pas compte des caractéristiques pédologiques du sol, si ce n'est par le biais simplifié de la réserve utile. La neige, le gel dans le sol ainsi que les bilans énergétiques et thermiques du sol ne sont pas intégrés. En revanche, ce modèle robuste et à l'approche agronomique a l'avantage de se focaliser sur une gamme de réserve utile commune à l'ensemble des sites simulés.

Dans ce modèle, le calcul du bilan hydrique s'effectue sur les postes du réseau de Météo-France et est conditionné par la disponibilité des paramètres nécessaires à ce calcul (environ 140 postes à ce jour). Pour chaque poste, le calcul est effectué avec des réserves utiles de 50, 100, 150 et 200 mm. La profondeur du réservoir superficiel est fixée à 40 % de la réserve utile. Ce modèle effectue un bilan à l'aide des précipitations et des évapotranspirations (ETP) quotidiennes puis simule les échanges entre le réservoir superficiel et le réservoir profond avec un 'frein' appliqué à la récupération de l'eau stockée dans le réservoir profond.

La figure 4 présente les résultats obtenus par ce modèle en terme d'évolution du réservoir d'eau disponible sur la période 1995-2004 et en moyenne sur l'ensemble des postes disponibles en France.



**FIG. 4** Moyenne du rapport entre le contenu en eau du réservoir et la réserve utile (R/RU) pour une réserve utile de 150 mm. Les résultats sont moyennés sur l'ensemble des postes disponibles sur la France, sur la période 1995-2004.

## Modèle hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou (SIM)

### 6.2.1

#### Principe

SIM (Habets *et al.*, 1999a ; Habets *et al.*, 2007) est un modèle hydrométéorologique constitué de l'assemblage de 3 modèles, qui permet d'estimer les bilans d'eau et d'énergie en surface, sur l'ensemble de la France, à une résolution spatiale de 8 km, ainsi que le niveau de plusieurs nappes souterraines et les débits des rivières à plus de 900 postes. Ce système initialement développé sur les bassins de l'Adour, du Rhône, de la Garonne et de la Seine a été étendu sur la France en 2002 puis mis en opérationnel en 2003.

Ce modèle repose sur l'enchaînement de trois éléments : Safran, Isba et Modcou.

Les variables atmosphériques (précipitations, température, rayonnements solaire et infrarouge, vent et humidité de l'air) sont analysées par le système SAFRAN (Durand *et al.*, 1992), qui prend en compte l'ensemble des observations disponibles, des analyses de modèle opérationnel, et des données climatiques, pour produire des cartes de 8 variables atmosphériques au pas de temps horaire, et à une résolution de 8 km.

Le module ISBA (Interactions-Sol-Biosphère-Atmosphère, schéma de surface utilisé ici dans sa version hydrologique à 3 couches, (Noilhan et Planton, 1989 ; Noilhan et Mahfouf, 1996 ; Boone *et al.*, 1999) calcule les bilans d'eau et d'énergie sur l'ensemble sol-végétation, en prenant en compte la composante nivale (très importante sur les massifs montagneux), au pas de temps de 5 minutes. Ce schéma est en outre utilisé dans les modèles opérationnels de prévisions atmosphériques de Météo-France. ISBA prend en compte de manière explicite les paramètres de texture de sol

(base des sols de l'INRA à 1km) et le type de végétation (base ECOCLIMAP, Masson *et al.*, 2003, modifiée sur la France pour distinguer les types de cultures ayant différents cycles annuels, voir figure 5).

Enfin, le module MODCOU (Ledoux *et al.*, 1989), développé par l'École des mines de Paris, simule le niveau des nappes, leur interaction avec les rivières, et les débits quotidiens sur plus de 900 postes en France.

### 6.2.2

#### Suivi du bilan hydrique estimé par SIM

Les simulations de SIM sont réalisées en double : une première analyse est réalisée en temps « quasi » réel (traitement quotidien de la période J-1, 6h à J, 6h), et utilise les observations disponibles sans délai. Ainsi, l'analyse quotidienne 'temps réel' de précipitations utilise approximativement 1 200 à 1 300 postes de mesures pluviométriques par jour sur le territoire. Une deuxième analyse est réalisée en temps différé (J+45, donc avec plus d'un mois de délai), afin de collecter l'ensemble des données du réseau climatologique d'état. Dans cette analyse, on dispose alors de plus de 3 000 postes pluviométriques.

Cela permet de constituer une base de données des paramètres météorologiques interpolés par Safran (une critique détaillée de ces analyses a été réalisée par Quintana Seguí *et al.*, 2007) mais aussi des termes du bilan hydrique, constituant ainsi une référence pour une analyse plus pertinente des situations du temps présent. Actuellement, l'archive historique du modèle déterminée en utilisant le réseau climatologique complet couvre la période début août 1970 à 2007.

Ainsi, les cumuls de précipitations totales (liquide et neigeuse) analysés par Safran permettent de situer une année donnée par rapport à la climatologie existante. La figure 6 présente la comparaison des cumuls annuels de précipitations pour la normale 1971-2000, et pour les cinq années sèches suivantes : 1976, 1989, 1990, 2003 et 2004. Il apparaît clairement que les

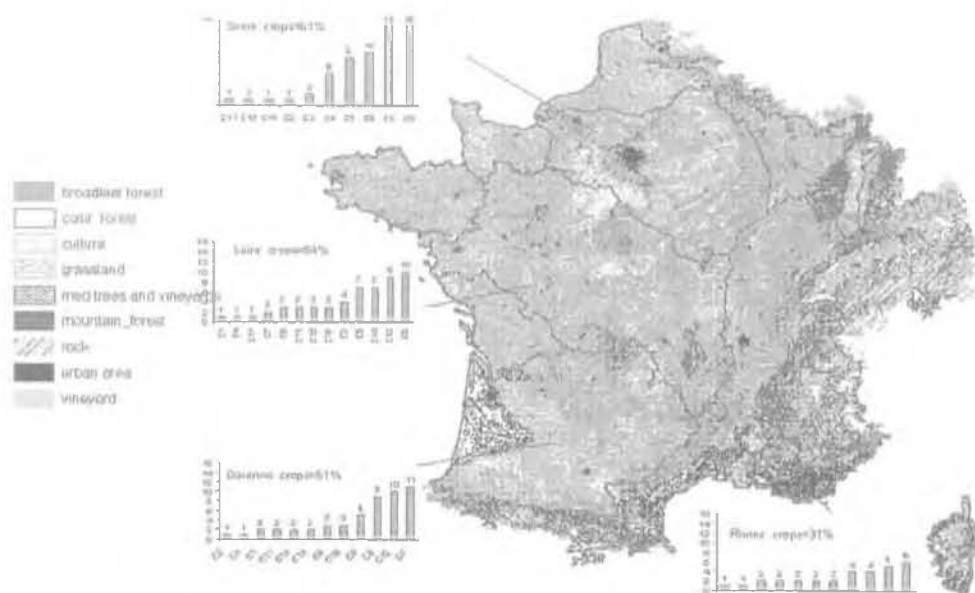


FIG. 5 Carte d'occupation des sols Ecoclimap sur la France.  
Soil type map Ecoclimap on France.

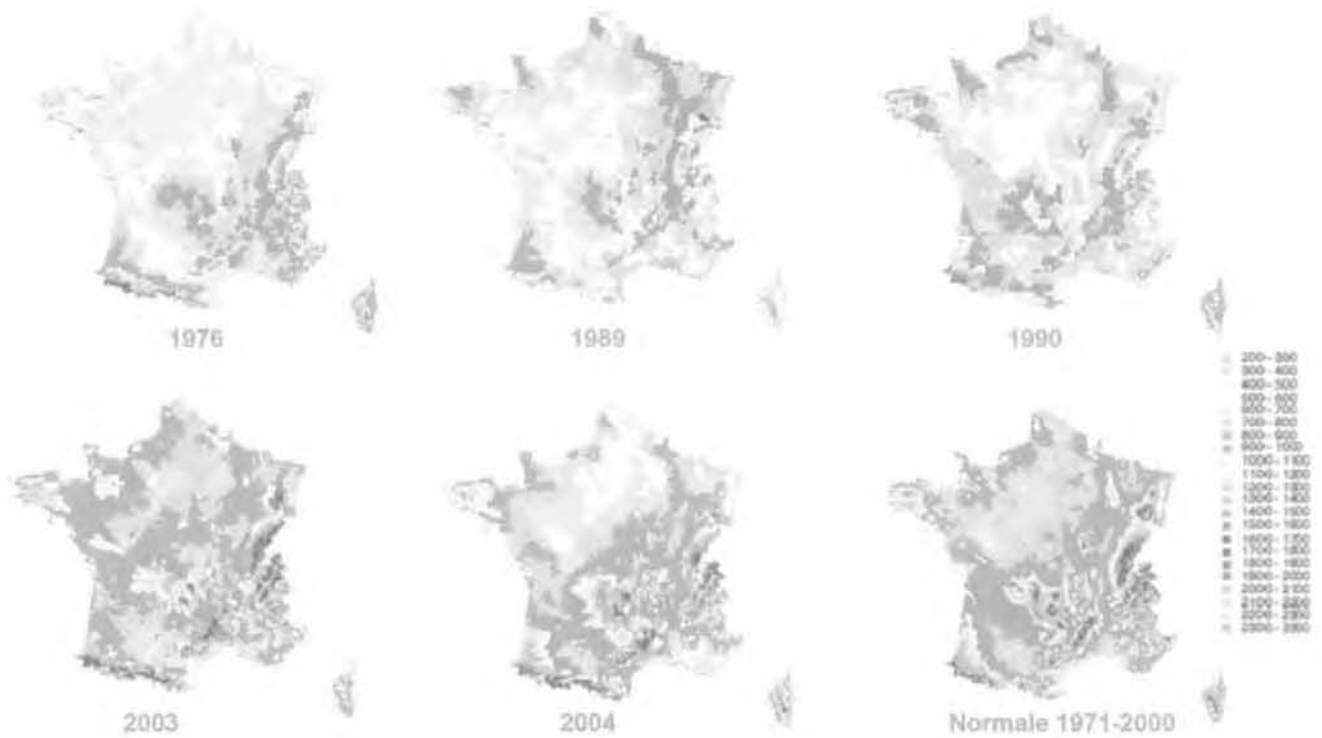


FIG. 6 Cumul annuel de précipitations Safran sur la France d'août à juillet et comparaison à la normale Aurelhy sur la période 1971-2000.

déficits de précipitations des années sèches varient beaucoup à la fois en intensité et dans l'espace.

Les termes du bilan hydriques simulés par SIM peuvent être partiellement validés, grâce à la comparaison entre les simulations et les observations de débits, de niveaux piézométriques et de hauteurs de neige. Ainsi, une analyse des résultats de SIM sur la décennie 1995-2005 a montré que l'évaporation annuelle était bien estimée, avec une erreur moyenne sur l'historique disponible de l'ordre de 4 % du flux d'évaporation annuel (Habets *et al.*, 2007). Cette erreur varie d'une année sur l'autre avec un maximum de l'erreur de 8 % pour l'année 2000-2001 sur le bassin du Rhône. Cela permet d'avoir une bonne confiance dans le bilan hydrique simulé par SIM.

Ainsi, on peut s'intéresser aux évolutions temporelle et spatiale du contenu en eau du sol.

Pour étudier les variabilités spatiales du contenu en eau du sol, on utilise l'indice d'humidité des sols SWI (Soil Wetness Index) défini par :

$$SWI = (W - W_{wilt}) / (W_{fc} - W_{wilt})$$

avec :

$W$  = contenu intégré en eau du sol ;

$W_{wilt}$  = contenu en eau du sol au point de flétrissement, seuil à partir duquel la plante ne peut plus capter l'eau du sol, trop rare ;

$W_{fc}$  = contenu en eau du sol à la capacité au champ, seuil au-dessus duquel il n'y a plus de drainage gravitationnel dans le sol.

Lorsqu'il est au-dessus de 1, le sol est humide, et les plantes ne sont pas stressées. En dessous de 1, il

y a stress hydrique, d'autant plus sévère que l'indice se rapproche de 0. L'évolution moyenne sur la France de l'indice d'humidité des sols simulée par SIM sur la période 1995-2005 est présentée figure 7. On constate que l'évolution temporelle de l'indice d'humidité des sols issu de SIM sur la France se compare bien à la moyenne décennale du pourcentage de remplissage du réservoir (R/RU à 150 mm) simulé par le modèle à deux réservoirs présenté figure 4. En particulier, on observe que les valeurs minimales sur cette période sont atteintes durant l'année 2003, suivie de l'année 1998.

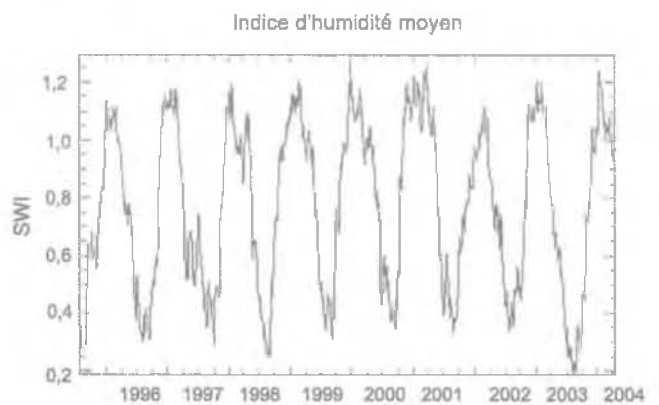


FIG. 7 Indice d'humidité moyen sur la France, fourni par le modèle SIM sur la période 1995-2004.

L'indice d'humidité des sols est estimé quotidiennement ainsi que l'écart par rapport à la climatologie du modèle SIM disponible sur la période 1995-2006.

Une telle estimation pour le début du mois de juin 2006 est présentée figure 8. La carte des écarts à la moyenne est très contrastée, avec une large zone bien excédentaire sur le Nord et l'Est du pays, et de nombreuses petites zones légèrement excédentaires. Le reste du pays est déficitaire. On note deux grandes régions présentant des déficits importants : une large bande allant de la Vienne à la Marne et surtout une grande partie du sud-ouest et de la bordure méditerranéenne, ainsi que la Corse. Ces résultats actualisés sont publiés régulièrement sur le site Internet de Météo-France ainsi que dans le bulletin national de situation hydrologique du ministère de l'Écologie de l'Aménagement et du Développement durable.

Afin de suivre l'état du bilan hydrique sur l'ensemble de la France, on utilise des courbes présentées figure 9. Elles représentent l'évolution temporelle de l'indice d'humidité des sols en moyenne sur l'ensemble de la France sur l'année étudiée (trait épais noir), comparée à la moyenne sur la climatologie 1970-2005 (trait fin noir), ainsi qu'aux valeurs extrêmes (en vert) et aux quintiles 20 %. Lorsque la courbe rouge atteint la courbe verte inférieure, cela signifie qu'à ce moment là, l'année étudiée est la plus sèche sur les 35 années étudiées. Quand elle atteint la courbe pointillée, cela signifie que le niveau de sécheresse a été atteint 1 année sur 5 en moyenne. Ainsi, on constate que la sécheresse de 2003 a conduit en juillet et en août aux valeurs d'indice d'humidité des sols les plus faibles en moyenne sur la France par rapport à la climatologie sur 35 ans et que des valeurs assez proches avaient déjà été atteintes en 1989 et 1990.

Le suivi du bilan hydrique est complété par le suivi du manteau neigeux. En effet, la fonte du manteau neigeux au printemps apporte un afflux d'eau, qui s'il est important, pourra atténuer l'effet d'une sécheresse, et même dans certains cas contribuer à des inondations.

On peut avoir une bonne confiance dans la représentativité du manteau neigeux simulé par SIM, car les hauteurs de neige simulées ont été comparées aux nombreuses observations disponibles à différentes

altitudes (Etchevers *et al.*, 2001 ; Voirin-Morel, 2003 ; Habets *et al.*, 2007). Les biais sont faibles (inférieurs à 3 cm pour les bandes altitudes inférieures à 2000m, et de l'ordre de 10 cm au-delà), et les variabilités journalières sont bien représentées (le coefficient de corrélation au carré est de l'ordre de 0,7 pour les tranches d'altitudes supérieures à 750 m).

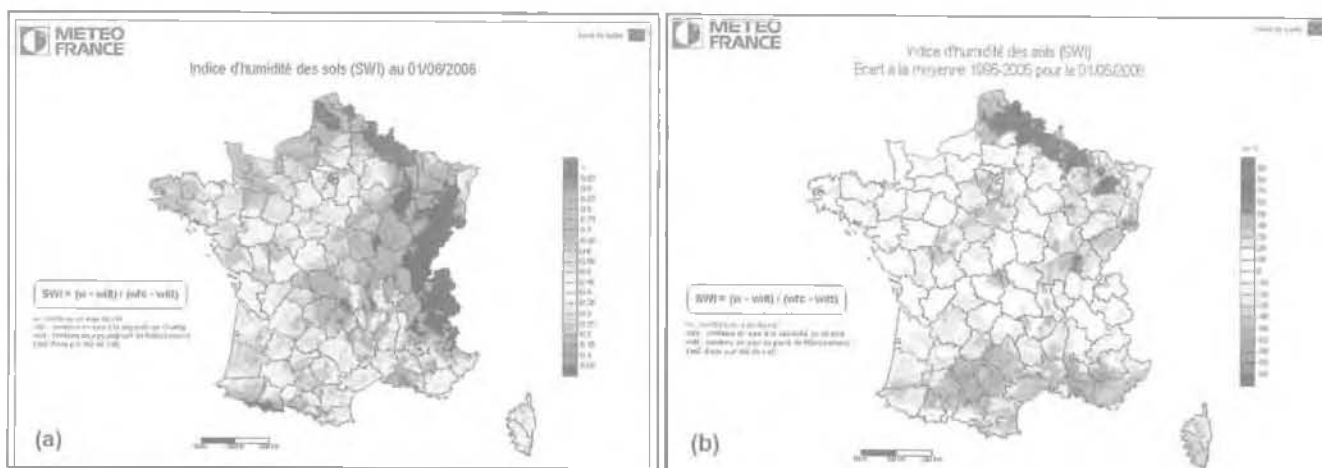
SIM estime la quantité d'eau stockée sous forme de neige (c'est l'équivalent en eau de la neige). La figure 10 présente la comparaison de ce stock au 1<sup>er</sup> avril 2006, et en moyenne sur la décennie 1995-2005 pour la même date dans les Alpes. Le stock d'eau est globalement équivalent à la moyenne des simulations pour cette date sur la période 1995-2005. La quantité d'eau stockée dans le manteau neigeux au 1<sup>er</sup> avril 2006 n'est légèrement supérieure à la moyenne que sur les Alpes suisses.

7

## Conclusion et perspectives : changement climatique et sécheresse géotechnique

Le suivi des sécheresses et des ressources en eau effectué par Météo-France se base de plus en plus sur la chaîne Safran-Isba-Modcou, opérationnelle depuis quelques années. Cet outil fournit une simulation spatialisée de l'humidité des sols basée sur les bilans couplés hydriques et énergétiques en surface. Le suivi de variables hydrologiques est affiné dans le temps et l'espace, ce qui permettra de mieux répondre aux demandes des autorités dans le domaine.

Les efforts actuels portent sur la reconstitution d'une climatologie de Safran-Isba-Modcou sur une longue période (remontant jusqu'en 1970, et si possible jusqu'en 1958). On espère mieux caractériser la variabilité inter annuelle des différents paramètres, et qualifier les périodes de sécheresses futures par comparaison avec les événements marquants du passé, comme 1976, 1989 ou 2003.



**FIG. 8** Contribution de Météo-France à la rubrique ressources en eau du BSH national : (a) indice d'humidité de sol sur la France au 1<sup>er</sup> juin 2006 ; (b) écart à la référence 1995-2005 de l'indice d'humidité des sols. Contribution of Météo-France to the column water resources of the national BSH : (a) Soil wetness index over France on June 1st, 2006, (b) Anomaly with 1995-2005 climatology of SIM.

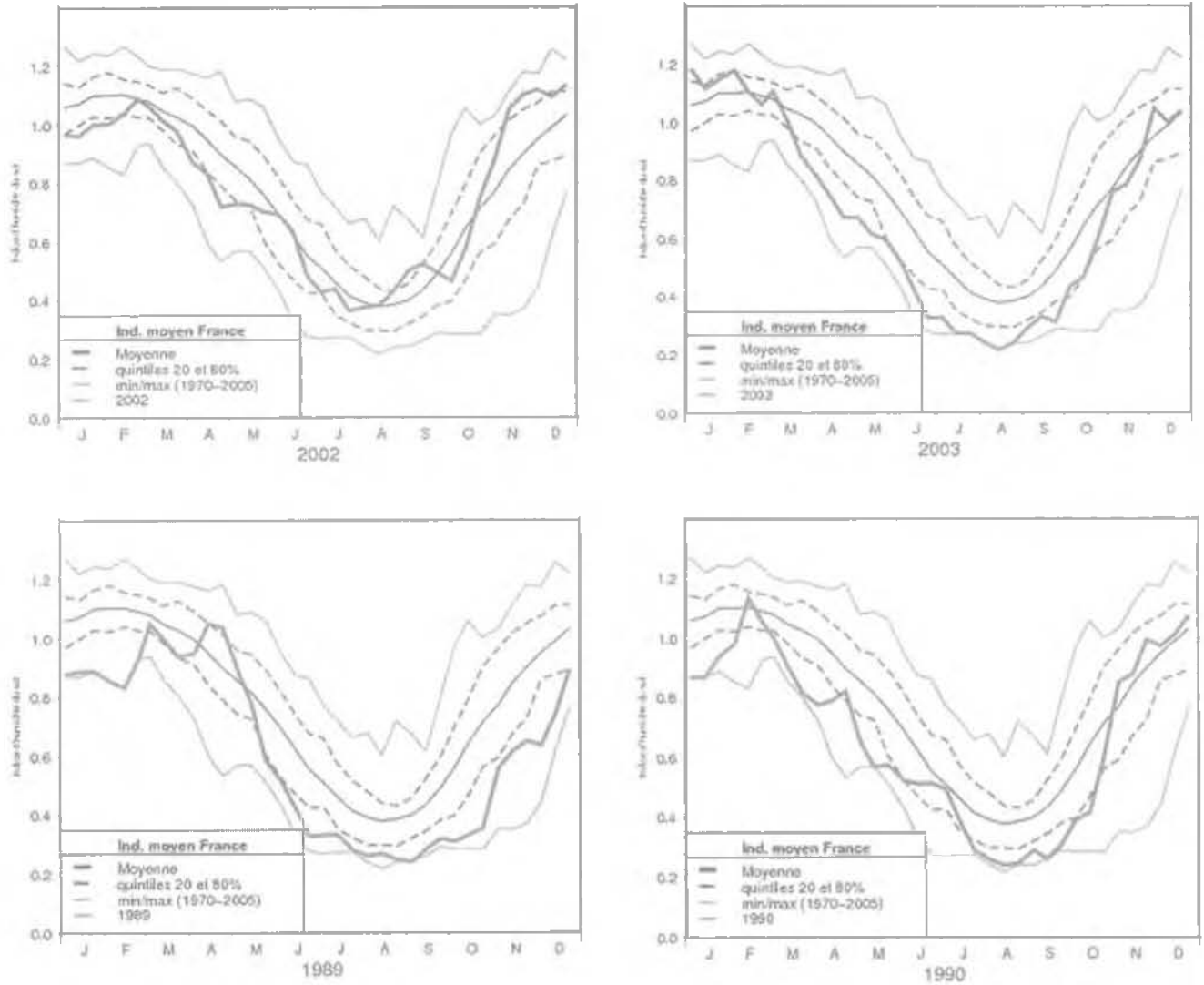


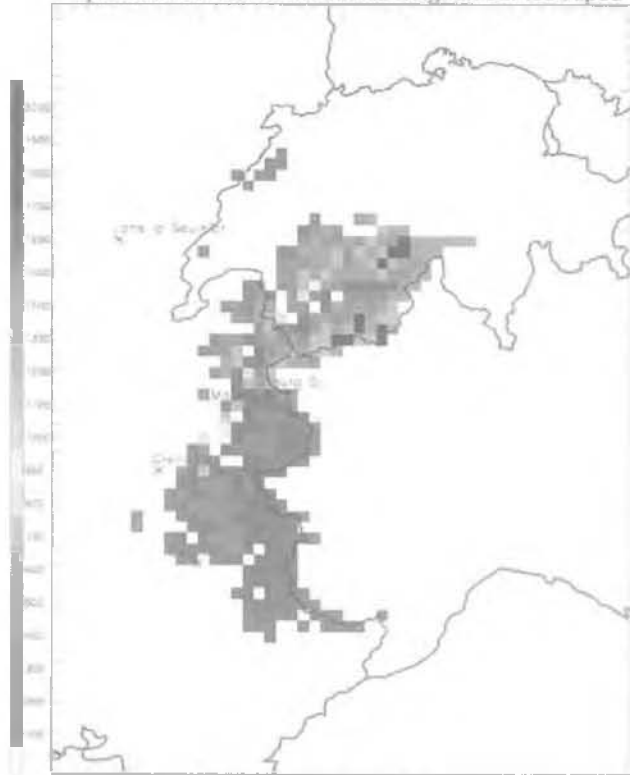
FIG. 9 Suivi opérationnel de l'indice d'humidité des sols en moyenne sur l'ensemble de la France. Operational monitoring of Soil Wetness Index over France and comparison to the climatological statistics of SIM.

Les simulations climatiques prenant en compte les scénarios d'évolution des concentrations en gaz à effet de serre indiquent pour la fin du siècle une augmentation des précipitations hivernales sur le nord de la France, mais aussi une accentuation des périodes de sécheresses en été, particulièrement sur le sud. On assistera probablement en parallèle à une augmentation de la demande en eau, ce qui fait que la question des ressources en eau deviendra cruciale. Des études d'impact du changement climatique sur la ressource en eau de grands bassins versants français ont été menées. Pour les bassins versants montagneux comme le Rhône et la Garonne, l'élévation de la température conduira certainement à une fonte du manteau neigeux plus précoce, ce qui aura pour conséquence de prolonger la période de basses eaux (Etchevers *et al.*, 2002 ; Caballero *et al.*, 2007). Sur le bassin versant de la Seine, la situation estivale dépendra essentiellement de la recharge des nappes dans la période hivernale

(Ducharne *et al.*, 2007). Ces études d'impacts seront poursuivies et développées dans le cadre de programmes de recherches en cours, comme le projet HyMeX (Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment), centré sur la zone méditerranéenne.

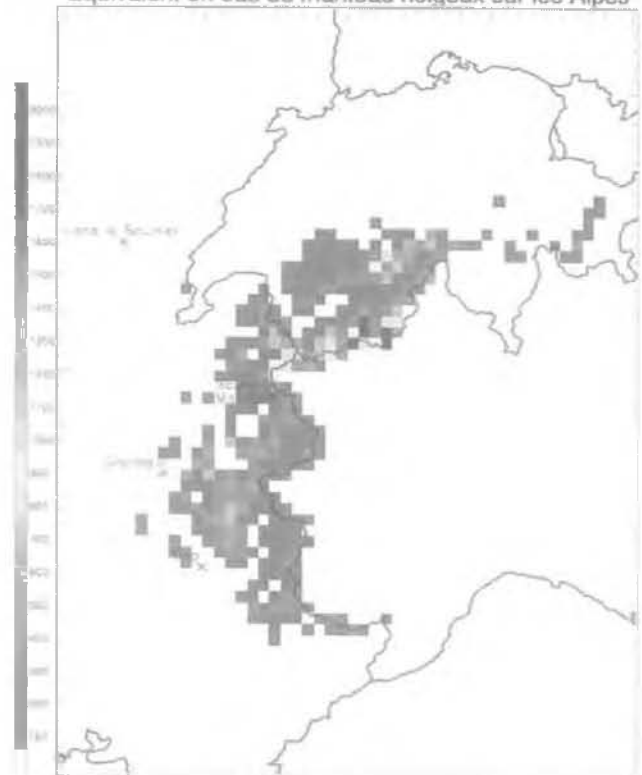
Dans sa version actuelle, la chaîne Safran-Isba-Modcou utilisée dans la version d'ISBA opérationnelle (deux températures et trois réservoirs pour l'hydrologie dans le sol), n'est pas la version la plus adaptée au problème posé. On espère, à l'avenir utiliser une version plus évoluée (version multicouche), qui devrait être mieux à même de reproduire les phénomènes à prendre en compte (transferts verticaux, gradients de texture, extraction racinaire). Cette nouvelle version devra être construite et validée grâce aux données et modèles détaillés existants, comme ceux du projet ARGIC, et grâce à de nouveaux projets à mettre en place avec les équipes ayant développé un savoir-faire sur ce sujet.

Equivalent en eau du manteau neigeux sur les Alpes



Le 1er avril 2006

Equivalent en eau du manteau neigeux sur les Alpes



Le 1er avril (1995-2005)

FIG. 10

Contribution de Météo-France à la rubrique manteau neigeux du BSH national : (a) équivalent en eau du manteau neigeux sur les Alpes au 1<sup>er</sup> avril 2006 (kg/m<sup>2</sup>/s); (b) moyenne de l'équivalent en eau du manteau neigeux au 1<sup>er</sup> avril sur la période 1995-2005.

Contribution of Météo-France to the column snow-covered coat of the national BSH : (a) snow water equivalent over the Alps on April 1st, 2006 (kg/m<sup>2</sup>/s) ; (b) average of the snow water equivalent over the Alps on April 1st over the period 1995-2005.

## Bibliographie

- Boone A., Calvet J.C., Noilhan J. - Inclusion of a third layer in a land surface scheme using the force restore. *J. Appl Meteor*, 38(11), 1999, p. 1611-1630.
- Brochet - Aspects climatiques de la sécheresse 1976. *La Météorologie*, 6<sup>e</sup> série, n° 7, décembre 1976.
- Caballero Y., Morel S., Habets F., Noilhan J., Le Moigne P., Lehenaff A., Boone A. - Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. *Water Resources Research*, 2007.
- Ducharne A., Baubion C., Beaudoin N., Benoit M., Billen G., Brisson N., Garnier J., Kieken H., Lebonvallet S., Ledoux E., Mary B., Mignolet C., Poux X., Sauboua E., Schott C., Théry S., Viennot P. - Long term prospective of the Seine river system: Confronting climatic and direct anthropogenic changes. *Science of the Total Environment*, vol. 375, Issues 1-3, 2007, p 292-311.
- Durand Y., Brun E., Mérindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., Martin E. - A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annales Geophysicae*, 18, 1992, p. 65-71.
- Etchevers P., C. Golaz, Habets F. - Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin from 1981 to 1994. *J. Hydrol.* 244, 2001, p. 60-85.
- Etchevers P., Golaz C., Habets F., Noilhan J. - Impact of climate change on the Rhone river catchment hydrology. *Journal of Geophysical Research*, 107, n° D16, 10.1029/2001JD000490, 2002, p. 1-18.
- Habets F., Etchevers P., Golaz C., Leblois E., Ledoux E., Martin E., Noilhan J., Otle C. - Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin. *Journal of Geophysical Research*, vol. 104, 1999, p. 31145-31172.
- Habets F., Boone A., Champeaux J.-L., Etchevers, P., Franchistéguy L., Leblois E., Ledoux E., LeMoigne P., Martin E., Morel S., Noilhan J., Quintana Segui P., Rousset Regimbeau F., Viennot P. - The Safran-Isba-Modcou hydrometeorological model applied over France. Soumis au *Journal of Geophysical Research*, 2007.
- Jacquart C., Choissnel E. - Un modèle de bilan hydrique simplifié à deux réservoirs utilisables en agrométéorologie. *La Météorologie*, 8<sup>e</sup> série, n° 9, 1995.
- Ledoux E., Girard G., De Marsily G., Deschenes J. - Spatially distributed modelling: Conceptual approach, coupling surface water and ground-water. *Unsaturated flow hydrologic modeling: theory and practice*, H. J. Morel-Seytoux (ed.), 1989, p 434-454, NATO Sciences Service.
- Masson V., Champeaux J.-L., Chauvin F., Meriguet C., Lacaze R. - A global database of land surface parameters at 1 km resolution in meteorological and climate models. *Journal of Climatology*, 16, 2003, p. 1261-1282.
- Noilhan J., Planton S. - A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Review*, 117, 1989, p. 536-549.
- Noilhan J., Mahfouf J.F. - The ISBA land surface parameterization scheme. *Global Planetary Change*, 13, 1996, p. 145-159.
- Quintana Segui P., Le Moigne P., Durand Y., Martin E., Habets F., Baillon M., Canellas C., Franchistéguy L., Morel S. - Analysis of near surface atmospheric variables: validation of the Safran analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007.
- Voirin-Morel, S. *Modélisation distribuée des flux d'eau et d'énergie et des débits à l'échelle régionale du bassin Adour Garonne*. PhD Thesis, université Toulouse III, Toulouse, France, 2003 (<http://www.cig.enscm.fr/~hydro/THE/the.htm>).