



HAL
open science

Projet ClimSec. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. Rapport final

J.M. Soubeyroux, Jean-Philippe Vidal, J. Najac, N. Kitova, M. Blanchard, P. Dandin, E. Martin, Christian Pagé, F. Habets

► **To cite this version:**

J.M. Soubeyroux, Jean-Philippe Vidal, J. Najac, N. Kitova, M. Blanchard, et al.. Projet ClimSec. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. Rapport final. [Rapport de recherche] irstea. 2011, pp.72. hal-02595492

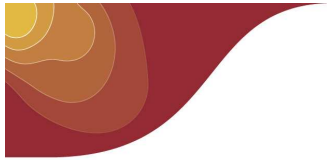
HAL Id: hal-02595492

<https://hal.inrae.fr/hal-02595492>

Submitted on 15 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Projet ClimSec

Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol

Rapport final du projet
Mai 2011

Réalisé par la Direction de la Climatologie de Météo-France (1)

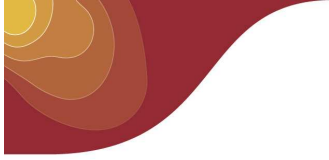
En partenariat avec :

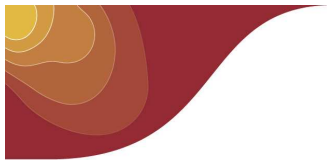
- *CNRS GAME : Centre National de Recherches Météorologiques (2)*
- *CERFACS (3)*
- *UMR SISYPHE (Mines Paris Tech) (4)*
- *CEMAGREF (5)*

Avec le soutien de la FONDATION MAIF

Auteurs : J.-M. Soubeyroux¹, J.-P. Vidal^{2,5}, J. Najac², N. Kitova², M. Blanchard¹, P Dandin¹, E. Martin², C. Pagé³, F. Habets⁴







Remerciements :

Les travaux de recherche menés dans le cadre du projet CLIMSEC, ont été réalisés dans le cadre d'un partenariat associant des équipes scientifiques à la Direction de la Climatologie de Météo-France. Les chercheurs, au premier rang desquels il faut saluer les post doc impliqués dans le projet : Jean-Philippe Vidal, Julien Najac et Nadia Kitova, et les ingénieurs ont œuvré en synergie étroite, et se sont mutuellement enrichis de leurs expériences et savoirs.

De nombreuses personnes ont contribué au succès de cette entreprise. Les porteurs du projet et les auteurs de ce rapport final souhaitent tout particulièrement remercier :

- les services administratifs de la Délégation Régionale Midi-Pyrénées du CNRS et leurs correspondants au CNRS GAME (CNRM), qui ont permis et facilité le bon déroulement du projet en l'accompagnant dans toutes ses étapes,
- les partenaires et collègues qui ont apporté un soutien régulier au projet, notamment : Bernard Seguin de l'INRA, Caroline Wittwer du SCHAPI puis BRGM, Didier Treinsoutrot du LRPC Sud Ouest, Michel Galliot de l'ONERC
- Pierre Bessemoulin, Président de la Commission de Climatologie de l'Organisation Météorologique Mondiale, qui a suggéré une candidature au Prix Norbert Gerbier,
- les spécialistes des bases de données, des traitements et méthodes, des analyses du climat, notamment : Jean Marc Moisselin, Fabienne Régimbeau, Martine Baillon et Laurent Franchistéguy de la DCLim, Serge Planton et Aurélien Ribes du CNRS GAME / CNRM,
- l'ensemble des agents de la DCLim, pour leur accueil de l'équipe projet et leur appui constant,
- la Fondation MAIF à travers son Directeur, Hubert Oliviero, et le Président de son Conseil Scientifique, Bernard Massinon, pour leur présence et leur soutien depuis la genèse du projet.

Le mécénat de la Fondation MAIF a permis que les travaux de recherche appliquée menés en hydro-climatologie au CNRS et à Météo-France avancent dans des conditions idéales : qu'elle en soit remerciée, ainsi que tous les acteurs de ce projet exemplaire et aux résultats nombreux et importants.

Avec toute l'équipe projet,
Jean-Michel Soubeyroux & Philippe Dandin.

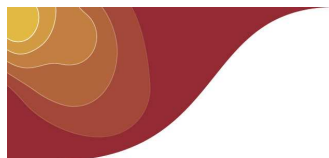
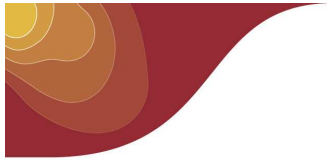


Table des matières

SYNTHESE	5
Contexte général du projet	6
Objectifs généraux et méthodologie	7
Résultats obtenus	9
Recommandations et limites éventuelles	12
Applications et valorisations	14
Quelques références	15
Résumé	16
RAPPORT SCIENTIFIQUE	17
Introduction	17
Phase 1 : Etude de la variabilité spatio-temporelle de l'eau du sol en climat présent	19
Chapitre 1 : La réanalyse Safran-Isba-Modcou 1958-2008	19
1.1 L'analyse atmosphérique SAFRAN	19
1.2 Simulation hydrologique	22
Chapitre 2: Variabilité spatio-temporelle de l'humidité du sol	24
2.1 Humidité du sol	24
2.2 Résultats	25
Chapitre 3: Méthodologie d'étude des sécheresses	28
3.1 Définition d'un indice de sécheresse	28
3.2 Caractérisation spatio-temporelle des évènements	30
3.3 Résultats	31
Chapitre 4 Caractérisation des évènements passés	34
4.1 Sélection des indices de sécheresse	34
4.2 Comparaison spatio-temporelle des évènements	34
4.3 Identification des évènements de référence	36
Phase 2 : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique ...	38
Chapitre 1 : Données et méthodes	38
1.1 Les différentes projections climatiques	38
1.2 La chaîne hydrométéorologique Isba-Modcou (IM)	39
1.3 Construction des indices de sécheresse	40
Chapitre 2: Choix du référentiel	43
2.1 Sensibilité au climat de référence	43
2.2 Objets de comparaison	44
2.3 Différents types d'approche	45
2.4 Représentation des évènements de sécheresse selon l'approche choisie	46
Chapitre 3: Caractérisation et incertitudes	50
3.1 Incertitudes liées aux modèles climatiques	50
3.2 Incertitudes liées aux scénarios socio-économiques	53
3.3 Incertitudes sur les méthodes de descente d'échelle	57
3.4 Évaluation comparative des sources d'incertitude	61
3.5 Évolution saisonnière des sécheresses	62
Chapitre 4: Evolution attendue des sécheresses	65
Références bibliographiques	67



SYNTHESE

Projet ClimSec

Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol

Convention Fondation MAIF/CNRS du 7 février 2008

Sur décision du conseil scientifique de la Fondation MAIF du 11 juin 2007

Durée du projet : 39 mois (fin en mai 2011)

Coordinateur scientifique du projet : Jean-Michel Soubeyroux

Météo-France, Direction de la Climatologie

42 avenue Gaspard Coriolis

31057 Toulouse Cédex 1

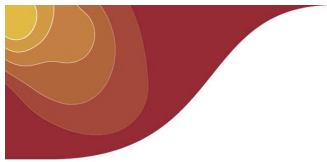
jean-michel.soubeyroux@meteo.fr

Partenaires du projet : CNRS GAME, CERFACS, UMR SISYPHE, CEMAGREF

Membres de l'équipe projet :

PARTENAIRES	PERSONNES	STATUT
METEO-FRANCE	Jean-Philippe Vidal* (21 mois) Julien Najac* (3 mois) Nadia Kitova* (11 mois) Martine Baillon Michèle Blanchard Laurent Franchisteguy Laure Desmaizières Nathalie Bargerie Jean-Michel Soubeyroux	Chercheur Post Doc Chercheur Post Doc Chercheur Post Doc Technicien Ingénieur Ingénieur Ingénieur Ingénieur Ingénieur
CNRS GAME	Eric Martin Aurélien Ribes Serge Planton	Chercheur Chercheur Chercheur
CERFACS	Christian Pagé	Ingénieur de Recherche
UMR SISYPHE	Florence Habets	Chercheur
CEMAGREF	Jean-Philippe Vidal	Chercheur

* Rémunérés sur contrat CLIMSEC



Contexte général du projet

La composition chimique de l'atmosphère est altérée depuis plus le début de la révolution industrielle par le rejet croissant des gaz à effet de serre et les aérosols. Les caractéristiques naturelles du climat sont modifiées par l'ajout d'une composante anthropique à l'effet de serre naturel. Si la température est le premier paramètre directement concerné il est manifeste que d'autres composantes du climat ont ou vont changer. Parmi les questions majeures qui sont posées, figurent celles liées à l'eau, ressource déterminante pour le développement.

La question de la ressource en eau dans les décennies à venir ne sera pas déterminée par les seuls changements climatiques. L'évolution de la demande, la gestion des infrastructures, les politiques qui seront mises en œuvre seront autant d'éléments déterminants tant pour la quantité que la qualité de l'eau. Pour être en mesure de prendre les décisions adaptées à une gestion durable, il est impératif de comprendre au mieux les évolutions passées et futures de cette ressource et de prendre en compte le changement climatique dans toute réflexion. Cette obligation a par exemple été formulée en France dans la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques de décembre 2006 et figurera au Plan National d'Adaptation au Changement Climatique pour les différents secteurs, ressources et milieux impactés.

L'assèchement estival attendu et déjà observé a des connaissances multiples : santé des arbres, ressources naturelles, agriculture, ressources en eau, approvisionnement en hydro-électricité, établissement humain (Houghton, 2001).

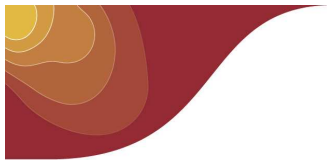
Comme les résultats de travaux récents l'ont confirmé (Caballero et al, 2007), (Moisselin et al, 2006), la France est particulièrement concernée par le risque d'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur et des sécheresses. Concernant le second de ces risques, les études antérieures se sont cependant surtout focalisées sur l'évolution des précipitations ou des débits des rivières, sans prise en compte particulière des paramètres hydriques du sol.

L'objectif du projet ClimSec était donc de compléter ces analyses par une étude de l'évolution passée et future des réserves d'eau des couches superficielles des sols en mettant l'accent sur les évolutions attendues à la fin du siècle mais aussi dans quelques décennies.

L'emploi d'un modèle physique atmosphère/sol/végétation pour l'étude de la ressource en eau plutôt qu'une approche paramétrique classique basée sur l'évapotranspiration (ETP), est une des grandes originalités de cette étude. Le modèle SIM a été retenu car ce modèle communautaire, fruit de travaux de recherche entrepris depuis plus de 20 années, est également au cœur de la production quotidienne de Météo-France. C'est une autre grande originalité de ce travail, mené avec un souci d'échange entre pratiques opérationnelles et recherche climatique.

L'architecture de cette étude d'impact est classique.

- Dans un premier temps (phase 1), une réanalyse forcée par la réanalyse du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT) a été effectuée pour obtenir une référence climatologique des paramètres et des phénomènes extrêmes considérés ; les indices de sécheresses seront définis et étudiés sur cette période récente et documentée.



- Dans un deuxième temps (phase 2), l'évolution de ces paramètres et indices est simulée à l'aide de projections climatiques obtenues à partir des scénarios régionalisés français ; le climat futur est ainsi éclairé sous un angle nouveau, celui des sécheresses.

Objectifs généraux et méthodologie

Ce projet, à vocation de recherche appliquée, a visé à exploiter au maximum les systèmes en place, tant les modèles numériques que les simulations déjà menées, afin de se concentrer sur la définition d'indicateur de sécheresse, leur étude sur une période récente et l'étude de leur évolution.

Le projet a été mené en 2 phases :

Phase 1 : Etude de la variabilité de l'eau du sol sur la période 1958-2008 sur la France

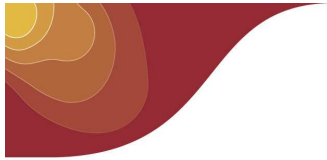
Le modèle hydrométéorologique SIM (Safran-Isba-Modcou), qui a bénéficié de nombreux travaux de recherche au CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques) et en particulier d'évaluations à l'échelle des bassins de l'Adour, du Rhône, de la Garonne et de la Seine sur des périodes de simulation allant de 10 à 20 années, a été étendu à l'ensemble de la France métropolitaine en 2002 (Habets et al, 2008), (Habets, 2011). Opérationnel à Météo-France depuis 2003, le modèle SIM permet d'assurer un suivi continu et quotidien des paramètres atmosphériques de surface, des bilans d'eau et d'énergie à échelle fine sur l'ensemble de la France.

Une simulation historique a été constituée, afin de disposer d'une référence climatologique. Cette réanalyse SIM s'appuie sur l'ensemble des données du réseau climatologique et les réanalyses atmosphériques ERA40 du CEPMMT.

De nombreuses applications opérationnelles s'appuient à ce jour sur le système SIM opéré au quotidien: les rubriques « ressources en eau du sol » et « état du manteau neigeux » des bulletins de situation hydrologique (BSH) nationaux édités par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDDTL) sont par exemple alimentés mensuellement par les produits issus du système SIM sur la France depuis avril 2005, et ces informations constituent un des éléments d'entrée utile pour l'évaluation et le suivi des sécheresses par le MEDDTL (notamment dans le cadre du Comité sur l'Eau).

→ Une première étape de la phase 1 a consisté à étendre la réanalyse SIM actuelle qui couvrait la période 1970-2007 à la période 1958-2008, permettant ainsi de disposer d'une base de données d'eau dans le sol de 50 ans sur l'ensemble de la France. Cette profondeur est nécessaire pour de nombreuses applications, d'autant plus qu'elle correspond à celle de l'accélération du réchauffement climatique. Elle permet notamment de mieux représenter les distributions statistiques des différents paramètres liés à la ressource en eau. On a disposé ainsi d'un jeu novateur de paramètres atmosphériques à la résolution temporelle horaire et à la résolution spatiale de 8 kilomètres sur 50 ans et sur l'ensemble du pays (base SAFRAN). Un effort particulier a été porté à la validation de cette nouvelle base de données afin de vérifier notamment son degré d'homogénéité temporelle. Après projection de ce forçage sur la grille Isba, une simulation couplée Isba-Modcou a été réalisée sur la période complète 1958-2008 sur l'ensemble de la France.

→ La seconde étape de cette phase a été consacrée à l'analyse et à la valorisation de la climatologie 1958-2008 précédemment reconstituée. On s'est attaché plus particulièrement à



examiner la variabilité spatiale et temporelle des paramètres caractéristiques de l'eau du sol et à mener des analyses d'homogénéité ou recherche de tendances sur les principaux paramètres caractéristiques de la ressource en eau ainsi reconstitués. La disponibilité de cette simulation et les résultats associés constituent un apport essentiel sur cette thématique, à une résolution spatio-temporelle inédite et suivant une méthodologie de modélisation originale.

Une action spécifique a ensuite été menée sur la définition d'indicateurs de sécheresse basés sur l'utilisation de paramètres SIM (utilisation de l'indice d'humidité des sols intégré, en complément d'indices basés sur les précipitations et les débits). Le choix s'est porté sur les indicateurs standardisés permettant une meilleure analyse spatio-temporelle sur le territoire. Ces indicateurs ont été ensuite appliqués à l'ensemble de la période temporelle 1958-2008 disponible pour caractériser les événements sécheresses et leur dynamique au sein de la réanalyse SIM.

Les résultats de cette phase sont d'ores et déjà très nombreux mais la pleine valorisation des travaux réalisés durera encore longtemps tant la base d'informations obtenues est considérable.

Phase 2: Impact des changements climatiques sur l'eau du sol

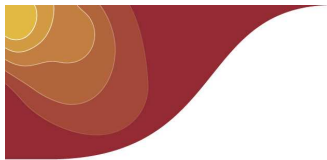
L'approche la plus classique dans les études d'impact du changement climatique est l'utilisation d'un modèle climatique global forcé par un scénario d'émission anthropique (gaz à effet de serre et aérosols), régionalisé et couplé à un modèle d'impact. L'étape de régionalisation de ces scénarios climatiques à grande échelle, nommée désagrégation ou descente d'échelle, consiste à introduire les hétérogénéités spatiales non résolues par les modèles climatiques de grande échelle pour les simulations régionales (hydro-météorologiques dans notre cas). Le modèle d'impact hydrologique est ici la partie Isba-Modcou de la chaîne Safran-Isba-Modcou (SIM) décrite dans la phase 1.

Cette suite d'opérations cumule des incertitudes nombreuses, introduites à chaque étape, et qu'il faut prendre en compte dans l'exercice de prospective exploitant les évolutions attendues. Ce fait a motivé une analyse des sécheresses en fonction des sources d'incertitude

La seconde partie de l'étude a ainsi valorisé les différentes projections climatiques issus des travaux AR4 du GIEC ayant bénéficié d'une régionalisation sur la France, et a généré de nouvelles simulations hydrologiques avec la chaîne Isba/Modcou à partir de ces projections. Une première étape de l'analyse a consisté en une réflexion méthodologique sur l'utilisation des indicateurs¹ standardisés en climat non stationnaire.

Les différentes sources d'incertitude et leur variabilité spatio-temporelle ont ensuite été caractérisées et un bilan a été établi sur les éléments convergents des différents scénarios dans l'évolution attendue des sécheresses.

¹ « Un indicateur se veut être une sorte de *résumé* d'informations complexes offrant la possibilité à des acteurs différents (scientifiques, gestionnaires, politiques et citoyens) de dialoguer entre eux. ». In <http://fr.wikipedia.org/wiki/Indicateur>

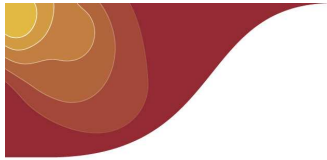


Résultats obtenus

Les principaux résultats sont présentés en suivant la logique temporelle : climat passé ; climat futur.

Climat passé :

- L'homogénéité spatio-temporelle de la réanalyse Safran sur la période 1958-2008 a été qualifiée et a confirmé sa robustesse pour les études hydro-climatologiques, et ce malgré l'évolution de la densité des observations météorologiques sur la période entre 1958 et 2008.
- Une climatologie originale de l'humidité du sol sur la période 1958-2008 à haute résolution spatio-temporelle a été réalisée sur la France. Elle a mis en évidence les variations régionales et saisonnières de ce paramètre (sols plus secs sur les régions Méditerranéennes mais aussi dans l'Ouest) ainsi que les tendances statistiquement significatives de l'assèchement des sols sur le pays, et notamment en hiver et début de printemps sur une large moitié sud et en été dans les zones de montagne. Cette climatologie est disponible pour d'autres travaux.
- Des indicateurs standardisés de sécheresse, conformes aux préconisations de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM, 2009), ont été définis pour les différents types de sécheresse identifiables au cours du cycle hydrologique (météorologique, agricole et hydrologique). La construction de ces indicateurs à partir d'une même modélisation physique des bilans hydriques en métropole (chaîne SIM) permet d'étudier de manière cohérente la propagation des sécheresses tout au long du cycle hydrologique aux différentes échelles de temps et d'espace : du déficit de précipitation à l'assèchement des sols et la diminution des écoulements. L'originalité de cette étude et les résultats obtenus ont été récompensés par l'obtention du prix Norbert Gerbier Mumm 2010 de l'OMM.
- Ces différents indicateurs ont été calculés sur les 50 ans de la réanalyse et appliqués pour la mise en évidence des caractéristiques moyennes des sécheresses en métropole, notamment leur durée et intensité. Ainsi la durée des sécheresses des sols s'avère plus longue sur la Provence mais aussi les Pays de Loire, le Bassin Parisien ainsi que les plaines d'Alsace et de Limagne.
- Ces indicateurs permettent également d'une identification et une analyse particulière des événements majeurs de sécheresse rencontrés en France depuis 1958 : compréhension de la propagation le long du cycle hydrologique et inter-comparaison aux différentes échelles de temps et d'espace. Les événements de 1976, 1989 et 2003 ont été particulièrement étudiés : si l'événement de sécheresse de 1976 reste majeur en France en terme de déficit de précipitation de 3 à 12 mois, l'événement de 1989 est prépondérant pour la sécheresse des sols à partir de la durée 6 mois et dépasse largement l'événement de 2003, de forte intensité mais de durée courte.



Climat futur :

→ Différentes approches méthodologiques pour l'application des indicateurs standardisées en climat futur ont été testées et évaluées en regard des problématiques spécifiques de l'adaptation. Il a été ainsi montré que ces choix méthodologiques sont à relier aux stratégies mises en œuvre ou imaginées pour les mesures d'adaptation.

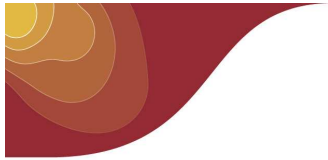
→ L'analyse des différentes sources d'incertitude (modèles climatiques, scénarios de concentration, méthode de désagrégation) dans l'évolution attendue des sécheresses au XXI^e siècle, a permis de mettre en évidence leur variabilité spatiale et leur évolution temporelle :

- Pour les modèles climatiques, les incertitudes dans la représentation des sécheresses des sols sont beaucoup plus fortes que celles des sécheresses météorologiques.
- L'influence des scénarios de concentration de gaz à effet de serre n'est sensible qu'à partir du milieu du XXI^e siècle : les écarts restent faibles entre les scénarios A2 et A1B même à la fin du siècle mais ils sont plus marqués avec le scénario de concentration plus modeste B1.
- L'influence des effets liés aux méthodes de descente d'échelle sont relativement faibles, sauf à la fin du siècle.

→ L'évolution des sécheresses en métropole au cours du XXI^e siècle, étudiée à partir des différentes projections climatiques des modèles de l'AR4 du GIEC montre de grandes cohérences dans leur déroulement spatio-temporel. Les principaux résultats sont :

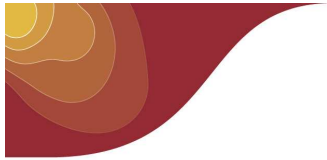
- Pour le premier tiers du siècle (années 2020), les changements semblent peu marqués même si la probabilité de sécheresse agricole semble s'accroître, notamment pour les sécheresses longues;
- Au milieu du siècle (années 2050), malgré une évolution encore limitée du régime pluviométrique, des évolutions majeures commencent à concerner les sécheresses agricoles. Des sécheresses inhabituelles en termes d'expansion spatiale ou d'intensité sont simulées dans l'ensemble des projections climatiques. Les projections indiquent également que certaines régions, et notamment les zones montagneuses, du fait de probables modifications du régime nival, pourraient connaître les évolutions les plus marquées en matière d'assèchement des sols ;
- A la fin du siècle (années 2080), des sécheresses météorologiques plus fortes apparaissent, notamment en été et les sécheresses du sol pourraient devenir extrêmes (par comparaison au climat actuel) sur la majeure partie du territoire. La durée de ces sécheresses extrêmes (plusieurs années ou décennies) relève de typologie de phénomène totalement inconnu dans le climat actuel.

→ Il convient de noter que ce sont les régions connaissant les sols les plus humides en moyenne aujourd'hui (Nord et Nord Est notamment) qui pourraient connaître les évolutions les plus fortes par rapport au climat actuel. Ce résultat est essentiel pour l'adaptation et montre à quel point l'impact du changement climatique sur la ressource en eau concerne l'ensemble de notre pays.



→ Ces travaux montrent également que la prise en compte des précipitations comme seule variable explicative des sécheresses s'avère tout à fait inadaptée pour décrire l'évolution des déficits hydriques, passés (voir année 2003) et bien sûr à venir. Il est particulièrement notable que l'assèchement des sols sous l'effet de la hausse de l'évaporation sera un élément essentiel de l'évolution du cycle hydrologique au cours du XXI^e siècle. L'emploi d'un modèle physique végétation/sol/atmosphère a permis ce résultat qui permet d'affiner les précédents travaux menés avec des approches paramétriques.

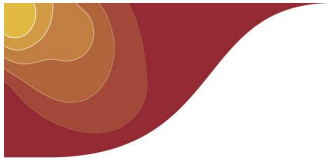
→ Le caractère non-linéaire des changements attendus au cours du siècle et l'accentuation rapide des sécheresses dans la seconde moitié du XXI^e siècle est un élément à prendre à compte pour la préparation des mesures d'adaptation. D'autant que cette non-linéarité est également combinée à une augmentation de la variabilité (différences d'intensité entre périodes sèches et humides) des sécheresses futures.



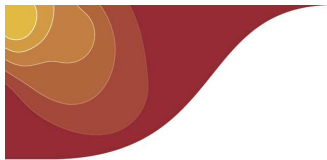
Recommandations et limites

Ce travail de recherche a sans aucun doute fait progresser la connaissance disponible sur la ressource en eau en France métropolitaine et sur son devenir possible en lien avec le changement climatique. Il ne fait cependant qu'ouvrir une voie de recherches à poursuivre. En voici quelques pistes :

- ➔ L'analyse des sécheresses sur des périodes plus longues serait utile pour mieux caractériser encore les événements passés les plus rares rencontrés dans le climat récent, comme ceux de 1945, 1921, 1911, voire 1818 (Garnier, 2010). Une valorisation de longues séries climatologiques pluviométriques et thermométriques suffisamment denses sur le territoire (actions de « data rescue » et d'homogénéisation entretenues à Météo-France) pourrait permettre prochainement de produire des analyses temporelles spatialisées sur la France de bilan hydrique simplifié sur de longues périodes (depuis au moins le dernier quart du XIX^e siècle). Une extension de la réanalyse SIM au début du XX^e siècle serait également souhaitable, permettant d'affiner les distributions climatologiques associées et ainsi de mieux capturer, notamment, les extrêmes. Une telle réanalyse est aussi en projet, dans le cadre de travaux de recherche sur la prévisibilité décennale.
- ➔ Malgré le caractère très éprouvé de la modélisation Safran/Isba/Modcou, différentes actions de recherche en cours pourront permettre d'améliorer dans les années à venir la représentation des différents processus pour l'analyse des sécheresses: représentation explicite d'un plus grand nombre de nappes souterraines (Somme, Alsace, Normandie, Loire), évolution de la végétation en fonction du cycle du carbone, transferts hydriques dans le sol à partir d'un schéma de surface représentant mieux la stratification des sols.
- ➔ L'indicateur Standardized Soil Wetness Index (SSWI) pourra être comparé avec d'autres indicateurs de sécheresse agricole d'approche plus conceptuelle développés dans le monde ces dernières années et également adaptés pour l'étude des tendances climatiques tels que le Standardized Précipitation Evaporation Index _SPEI_ (Vincente-Serrano et al, 2010) ou le Palmer Drought Severity Index _PDSI_ (Dai, 2010).
- ➔ Des études de comparaison du Standardized Flow Index (SFI) issu de la modélisation SIM avec les observations de débit de la banque hydro permettraient de quantifier l'apport d'une approche climatologique issue de modélisation en complément des observations, notamment pour les bassins ne disposant pas de séries de qualité en nombre suffisant, ou trop influencées par les effets anthropiques. L'analyse complète des sources d'incertitude sur les scénarios d'évolution des sécheresses au XXI^e siècle pourrait intégrer la comparaison de différents modèles hydrologiques y compris la modélisation de surface (module Isba)
- ➔ La propagation des sécheresses du sol sur les débits des cours d'eau (SFI) et les réservoirs souterrains au cours du XXI^e siècle n'a pas été étudié ici mais la cohérence observée des 3 types de sécheresse en climat présent, incite à penser que les conséquences seront très fortes également.



- Les résultats de nos travaux suggèrent enfin une aggravation particulière des sécheresses dans des régions connaissant aujourd'hui en moyenne des sols assez humides. Les conséquences sur les différents écosystèmes de ces variations relatives très fortes, mériteraient d'être particulièrement étudiées

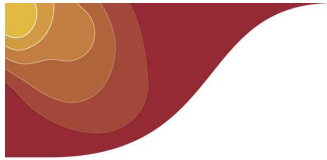


Applications et valorisations

Un document spécifique est dédié aux valorisations scientifiques des travaux. Seules les principales applications opérationnelles sont présentées ici.

- ➔ Les travaux sur la réanalyse SIM mises en œuvre dans le cadre du projet ont pris en compte également la capacité de mise à jour régulière du système, aux pas mensuel et annuel pour les différentes applications hydro-climatologiques en métropole.
- ➔ Des applications de ces travaux sur les sécheresses sont en cours d'évaluation pour un transfert opérationnel dans différentes productions ou fonctions portées par la Direction de la Climatologie et les Directions Inter-Régionales de Météo-France, ainsi que pour les services déconcentrés du MEDDTL (DREAL notamment). Ainsi est-il prévu que ces nouveaux indicateurs puissent être prochainement utilisés pour le suivi climatique de la ressource en eau et les applications institutionnelles aux différentes échelles nationale et régionale, notamment accessibles à travers les Bulletins de Situation hydrologique (BSH) du MEDDTL ou l'information du Comité sur l'Eau. De même l'analyse des événements extrêmes bénéficiera largement de ces travaux avec une première application mise en place en 2010 pour le dispositif Catastrophes Naturelles.
- ➔ Une étude est en cours pour la caractérisation spatio-temporelle des sécheresses géotechniques en France depuis 1958 à partir de la réanalyse SIM. Cette action est menée avec la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) et s'inscrit dans un effort de la communauté française pour mieux comprendre et diagnostiquer cet aléa aux conséquences importantes en cas de présence d'argile et d'exposition des bâtis (projet ANR/ARGIC²).
- ➔ Les résultats du projet CLIMSEC ont été largement communiqués au fur et à mesure de leurs avancées pour les différentes missions institutionnelles, et ont été notamment mis à disposition en 2010 du Conseil Général Environnement et Développement Durable (CGEDD) pour la contribution au rapport interministériel « Changement Climatique et extension des zones sensibles au feu de forêt » ainsi que pour la DATAR dans le cadre de l'étude « Adaptation des territoires au changement climatique » qui alimente désormais toutes les préparations de SRCAE dans les Régions métropolitaines. Le projet CLIMSEC est identifié et contribue aux travaux en cours de l'AR5 du GIEC.
- ➔ De nouveaux jeux de données issus de projections hydrologiques sur le XXI^e siècle (forçage Arpège V4.6, désagrégé types de temps, scénario A2, A1B, B1, modèle hydrologique Isba/Modcou) ainsi que l'ensemble des résultats sur les indicateurs de sécheresse, sont à disposition de la communauté scientifique pour les nouvelles actions de R&D.

² ANR/ARGIC : Analyse du Retrait Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions : <http://www.argiles.fr/files/RP-57011-FR.pdf>



Quelques références

→ Vidal, J.-P., Martin, E., Baillon, M., Franchistéguy, L. et Soubeyrou, J.-M. (2010a), SAFRAN 50-year high-resolution meteorological reanalysis over France. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1627–1644. DOI : 10.1002/joc.2003

→ Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Habets, F., Soubeyrou, J.-M., Blanchard, M. et Baillon, M. (2010b), Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(3), 459-478. DOI : 10.5194/hess-14-459-2010

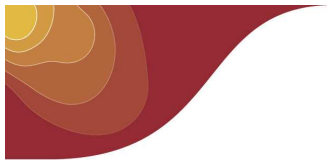
Prix Norbert Gerbier Mumm 2010 de l'OMM

→ Najac, J., Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L. & Soubeyrou, J.-M. (2010) Changes in drought characteristics in France during the 21st century. *Geophysical Research Abstracts*, 12, EGU2010-8975

→ Vidal, J.-P., Najac, J., Martin, E., Franchistéguy, L. & Soubeyrou, J.-M. (2010) Assessing changes in drought characteristics with standardized indices. *Geophysical Research Abstracts*, 12, EGU2010-10555

→ Kitova N, Najac J, Vidal J.-P., Soubeyrou J.-M., Martin E., (2010) Caractérisation des sécheresses en France au cours du XXI^{ème} siècle. Actes du XXIII^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie «Risques et changement climatique», Rennes, 1-4 Septembre 2010, p.433

→ Kitova N., Vidal J.-P., Soubeyrou J.-M., Martin E., Pagé C. Meteorological, agricultural and hydrological drought projections over France for the 21st century, Présentation orale dans European Geosciences Union General Assembly 2011 Vienna (Austria) 03 – 08 April 2011



Résumé

Le projet CLIMSEC mené par la Direction de la Climatologie de Météo-France avec le soutien de la Fondation MAIF a permis de caractériser la typologie des sécheresses en métropole sur la période 1958-2008 et d'établir un diagnostic sur leurs évolutions attendues au cours du XXI^e siècle.

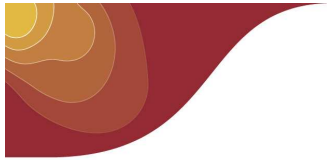
L'étude en climat actuel s'est appuyée sur une modélisation rétrospective de l'humidité du sol sur 50 ans avec la chaîne hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou (SIM). La réanalyse SIM établie dans le cadre du projet a fait l'objet d'une évaluation particulière pour vérifier son homogénéité temporelle et a permis d'établir une climatologie à haute résolution de l'humidité des sols en métropole.

Les différents types de sécheresse (météorologique, agricole, hydrologique) ont été caractérisés à partir d'indicateurs standardisés. Ces indicateurs permettent à la fois de garantir la cohérence spatiale des analyses à différents pas de temps et la détermination des caractéristiques des événements: début, fin, sévérité, magnitude. Cet outil a été d'abord utilisé à des fins de description comparative des épisodes marquants de sécheresse rencontrés au cours des 50 dernières années (tels que l'été 1976, les années 1989-1990, l'été 2003) en termes de caractéristiques moyennes (durée et surface moyennes, magnitude totale) mais aussi de déficits records sur la période considérée. Une climatologie spatialisée des sécheresses en métropole a ensuite été établie dont la valeur et l'originalité ont été notamment reconnues par l'attribution du prix Norbert Gerbier Mumm de l'OMM en 2010. Elle a mis en évidence les disparités régionales notamment en termes de durée, de sévérité moyenne puis a permis une qualification des événements extrêmes observés sur la période considérée.

La deuxième partie de l'étude a été consacrée à l'évaluation des caractéristiques futures des sécheresses sous changement climatique à l'aide des indices standardisés développés dans le projet et en s'appuyant sur les différentes projections climatiques régionalisées disponibles en métropole et issus des travaux de l'AR4 du GIEC. La caractérisation des sécheresses a pris particulièrement en compte les différentes sources d'incertitude, liées aux modèles climatiques globaux, aux scénarios socio-économiques et aux méthodes de régionalisation.

La pertinence des jeux de données et des différentes méthodes utilisées, notamment en contexte climatique non stationnaire, a fait l'objet d'une attention particulière. Les incertitudes sur l'évolution des caractéristiques des sécheresses ont été décrites à la fois dans leurs dimensions moyennes mais aussi en terme de variabilité régionale et saisonnière.

Au final, les convergences des résultats issus des différentes projections climatiques permettent d'apporter un diagnostic complet sur la compréhension des éléments majeurs de l'aggravation des sécheresses au cours du XXI^e siècle et une mise en perspective dans le cadre des démarches pour l'adaptation au changement climatique.



RAPPORT SCIENTIFIQUE

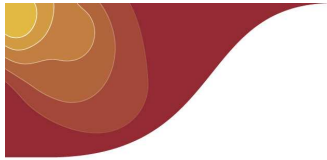
Introduction

La ressource en eau est une des questions majeures auxquelles le monde doit faire face. Les sécheresses, comme les autres événements extrêmes, peuvent amoindrir la capacité de développement des sociétés. En France métropolitaine, territoire d'abondance des ressources hydriques, les perturbations du cycle hydrologique peuvent fragiliser un équilibre en offre et demande dont on a pu, à plusieurs reprises dans l'histoire récente, mesurer combien il était précaire. Le changement climatique, qui provoque une altération du cycle hydrologique, sera à l'origine d'une évolution des caractéristiques des sécheresses, dont il convient d'étudier les différentes composantes hydrométéorologiques afin de proposer des stratégies d'adaptation. Dans cet objectif un grand nombre d'études (Dai, 2011) ont été réalisés sur le déficit en eau dans différentes régions de la Terre.

Le projet CLIMSEC pour l'étude de l'impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol, s'est particulièrement intéressé à la caractérisation des sécheresses relatives au contenu en eau des sols.

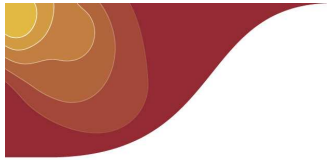
La première phase du projet a été consacrée à l'extension de la réanalyse SIM sur la période 1970-1958, la valorisation climatologique des données d'humidité des sols, la définition et l'application de critères de sécheresse pour leur caractérisation dans le climat actuel. La validation d'une analyse atmosphérique sur 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 a été particulièrement étudié car elle conditionnait les étapes suivantes du projet, constituant à la fois les données d'entrée des simulations hydrologiques – et donc d'humidité du sol – sur la période 1958-2008 et la référence en terme de climat présent sur la France pour les projections en climat futur. Ces travaux ont fait l'objet d'un article publié dans *l'International Journal of Climatology* (Vidal *et al.*, 2010a) dont les principaux résultats sont exposés dans le chapitre 1, avec une rapide description de la simulation hydrologique mise en œuvre 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. Le chapitre 3 décrit l'approche utilisée pour caractériser les événements de sécheresse de manière locale et régionale tandis que le chapitre 4 présente les résultats en matière de caractérisation climatologique des sécheresses et inter comparaison de la dynamique des événements majeurs rencontrés au cours des 50 dernières années. Les travaux conduits sur les chapitres 3 et 4 ont fait l'objet d'une publication dans la revue *Hydrology and Earth System Sciences* (Vidal *et al.*, 2010b), récompensée par le prix Norbert Gerbier Mumm 2010 de l'Organisation Mondiale de la Météorologie, destinée à mettre en valeur une étude scientifique originale consacrée à l'influence de la météorologie dans un des domaines des sciences physiques, des sciences naturelles ou des sciences humaines.

La deuxième phase du projet CLIMSEC s'est intéressée à l'évolution des caractéristiques des sécheresses en climat futur. Cette partie de l'étude a valorisé les différentes projections climatiques issus des travaux AR4 du GIEC ayant bénéficié d'une régionalisation sur la France, et a généré de nouvelles simulations hydrologiques avec la chaîne Isba/Modcou à partir de ces projections.



Les projections climatiques présentées dans le chapitre 1 ont visé à représenter le mieux possibles les différentes sources d'incertitudes : modèles de circulation générale, scénarios socio-économiques et méthodes de descente d'échelle. Les conditions d'application des indicateurs et des méthodes définies lors de la phase 1 pour les questions du changement climatique ont fait l'objet de discussions approfondies présentées dans le chapitre 2 et notamment l'influence du choix de la période de référence. Le chapitre 3 est consacré à l'analyse des différentes sources d'incertitudes sur l'évolution spatio-temporelle et saisonnière des sécheresses météorologiques et agricoles au cours du XXI^e siècle tandis que le chapitre 4 établit un bilan des résultats obtenus sur l'évolution attendue des caractéristiques des sécheresses.

Dans un contexte institutionnel de préparation des mesures d'adaptation aux effets du changement climatique, les résultats des travaux du projet CLIMSEC permettent d'apporter des informations plus précises pour les décideurs dans le domaine critique de l'évolution des caractéristiques des sécheresses du sol en lien avec les sécheresses météorologiques. Ces résultats, assortis de la qualification des différentes sources d'incertitude, mettent en lumière également les questions encore ouvertes sur ces problématiques, notamment en lien avec les autres composantes du cycle hydrologique.



Phase 1 : Etude de la variabilité spatio-temporelle de l'eau du sol en climat présent

Chapitre 1 : La réanalyse Safran-Isba-Modcou 1958-2008

1.1 L'analyse atmosphérique SAFRAN

1.1.1 Présentation du système

Safran³ 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. La Figure 1-1 présente le schéma de fonctionnement de Safran pour l'analyse horaire des différents paramètres atmosphériques. Le système Safran, développé à l'origine pour la prévision d'avalanches sur les Alpes (Durand et al., 2009), a été ultérieurement 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 ClimSec, Safran a été exécuté sur la période courant du 1 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).

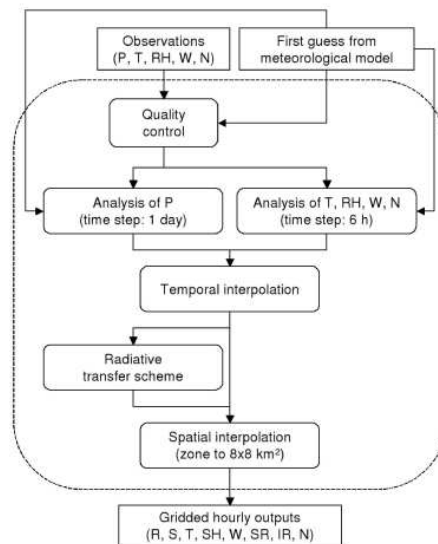
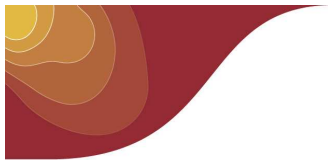


Figure 1-1 : Diagramme de fonctionnement de SAFRAN adapté de Quintana Seguí (2008). Les variables météorologiques sont les précipitations quotidiennes (P), les lames d'eau (R), la précipitation neigeuse (S), la température de l'air (T), la vitesse du vent (W), l'humidité relative (RH), l'humidité spécifique (SH), le rayonnement solaire incident (SR), le rayonnement infra rouge incident (IR) et la nébulosité (N).

³ Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige



1.1.2 Validation

La figure 2-1 présente la répartition spatiale des 83 stations synoptiques présentes sur l'ensemble de la période 1958-2008 et représentatives du climat français, qui 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.

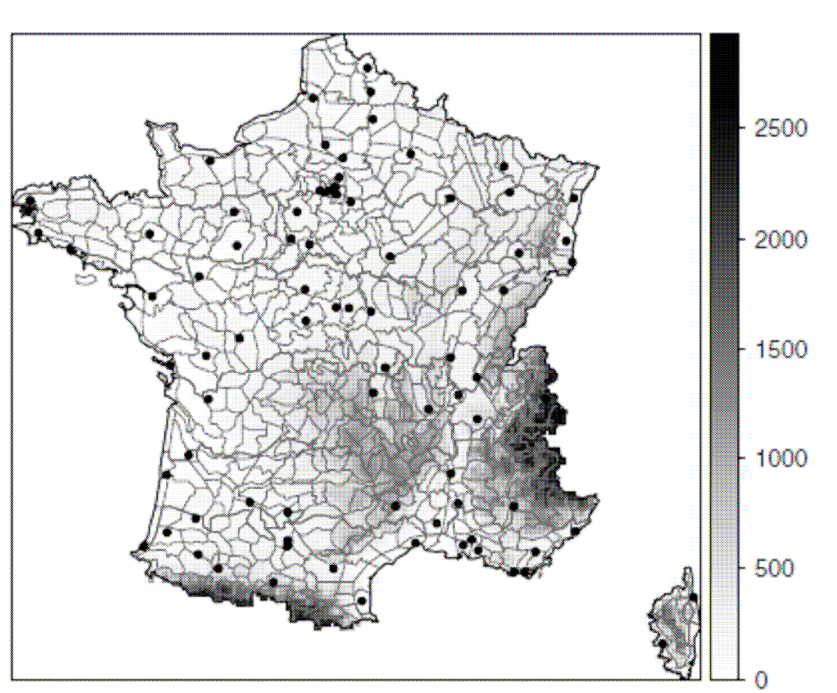
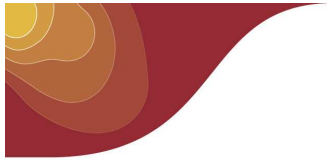


Figure 2-1 : Contour des zones climatiques homogènes, grille orographique 8 km (en m) et emplacement des stations synoptiques de validation.

La figure 3-1 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, mis en évidence sur la figure 4-1. L'évolution du biais sur le vent peut aussi être reliée à des changements de technologies des capteurs anémométriques dans les années 1980. L'erreur quadratique moyenne est également 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 « A 50 year high resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran System » (Vidal et al., 2010a), publié dans la revue *International Journal of Climatology*.



L'impact de la densification du réseau a été particulièrement étudié avec la comparaison de 4 années hydrologiques particulières (1962-1963, 1986-1987, 1998-1999 et 2006-2007). La climatologie Safran a été 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).

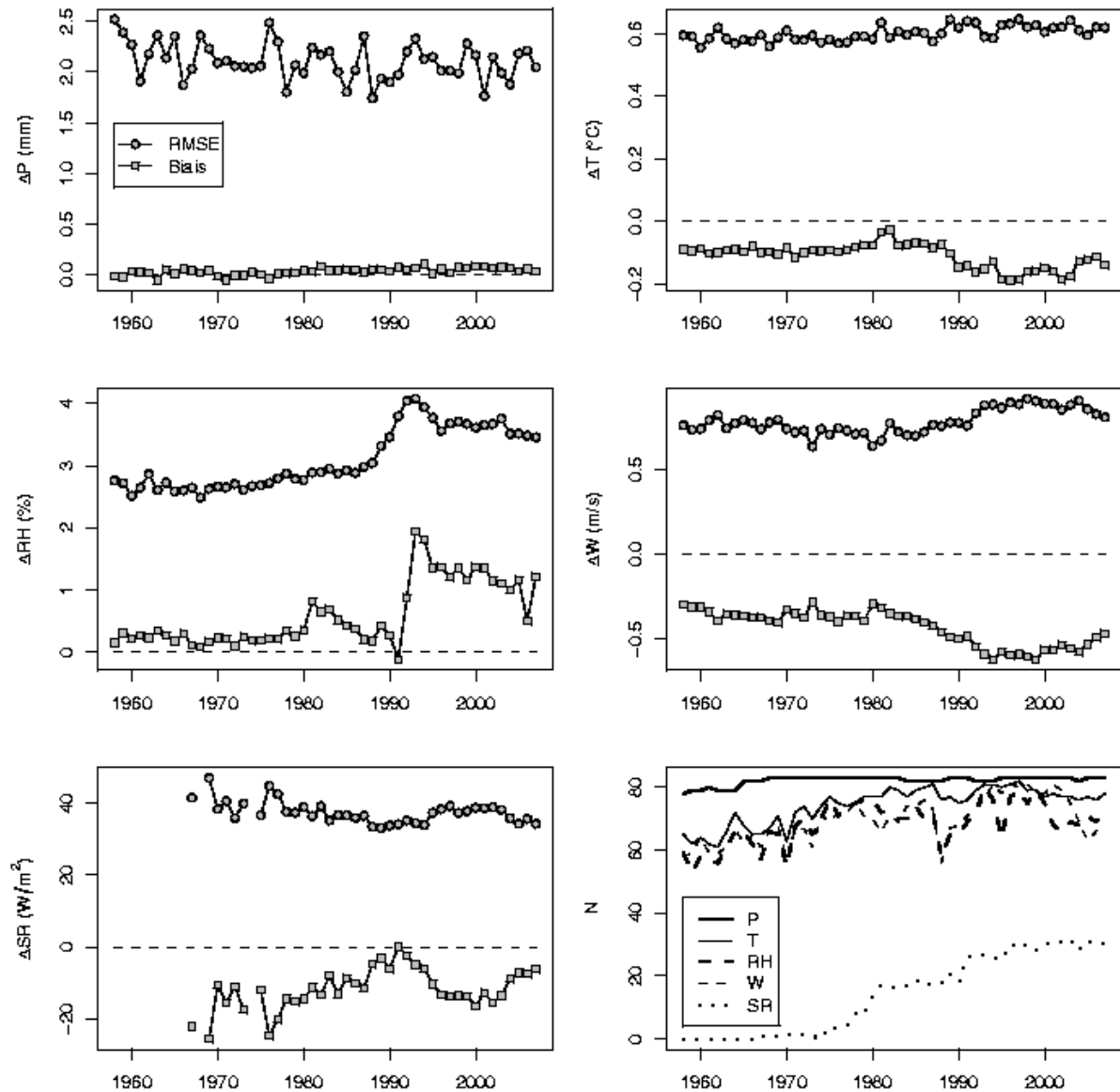


Figure 3-1 Évolution temporelle du biais (carrés) et de l'erreur quadratique moyenne (RMSE, disques) moyennés sur les stations de validation. De gauche à droite et de haut en bas Sont représentés les précipitations totales (P), la température de l'air (T), l'humidité relative (RH), la vitesse du vent (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.

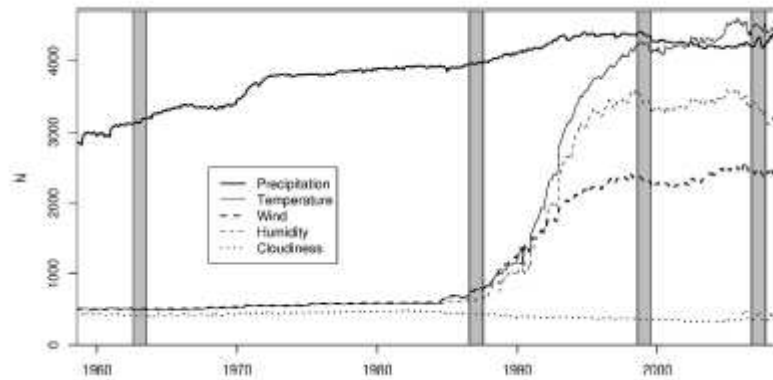
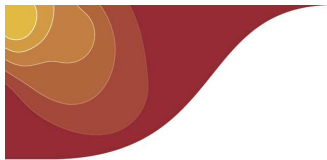


Figure 4-1 Évolution du nombre de données utilisées quotidiennement dans l'analyse. Quatre observations (00 UTC, 06 UTC, 12 UTC, 18 UTC) sont utilisées pour toutes les variables, exceptées les précipitations (une seule observation quotidienne). Les valeurs représentées sont des moyennes mensuelles. Les zones ombrées sont celles des années hydrologiques utilisées pour la validation.

1.2 Simulation hydrologique

L'analyse atmosphérique Safran a été utilisée pour forcer le schéma de surface Isba⁴ 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 4-1. 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 5-1.

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 rivières ainsi que l'évolution des nappes aquifères (Ledoux et al., 1989). La chaîne hydrométéorologique Safran / Isba / Modcou (SIM) a été validée 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. De nombreuses applications de la chaîne SIM pour les besoins R&D et opérationnels ont été développées ces dernières années à Météo-France (Soubeyroux *et al.*, 2009) ainsi que dans le cadre de l'UMR Sisyphe (Habets, 2011)

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.

⁴ Interface Sol-Biosphère-Atmosphère

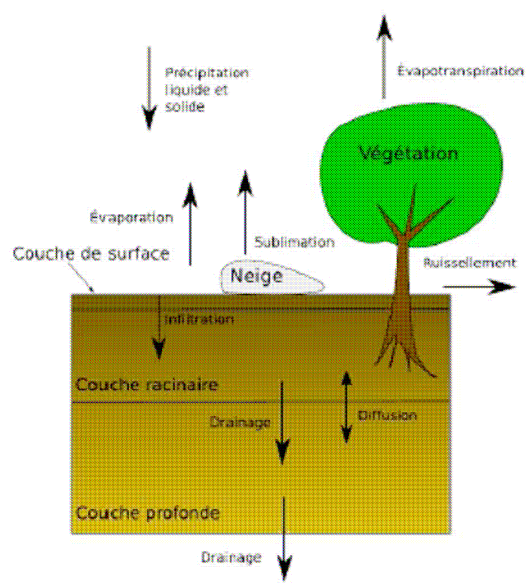
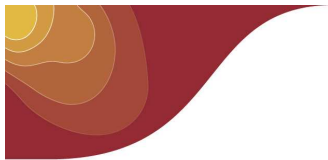


Figure 5-1 Schéma simplifié du fonctionnement du modèle de surface *Isba*, d'après Quintana Seguí (2008). Les flèches montrent les principaux flux d'eau.

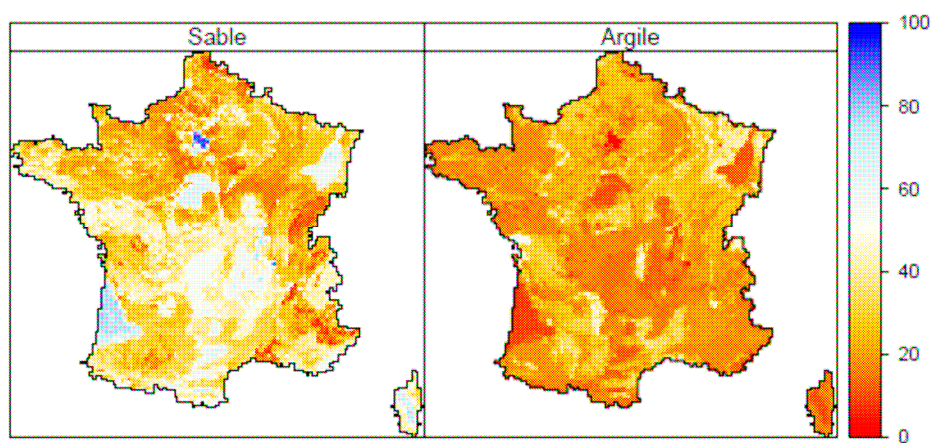
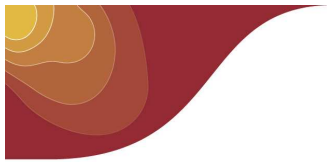


Figure 6-1 Pourcentage de sable et d'argile pour chacune des mailles de la grille *Isba*.



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 (voir par ex. Maurer et al., 2002; Sheffield et al., 2004). L'humidité du sol est représentée dans Isba par les contenus en eau des trois couches de sol schématisées sur la figure 4-1. Ce contenu en eau est intégré sur la profondeur du sol puis adimensionalisé 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:

$$SWI = \frac{w - w_{wilt}}{w_{fc} - w_{wilt}} \quad (2.1)$$

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., 1999a; Pellaren et al., 2006; Baghdadi et al., 2007; Paris Angela 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., 1999b) ou SmosRex (de Rosnay et al., 2006), ou bien grâce à des données satellites disponibles uniquement pour des périodes récentes.

La référence opérationnelle en matière de suivi climatologique des bilans hydriques en France (procédure CatNat notamment) s'est appuyée jusqu'à ces dernières sur des modèles agronomiques à deux réservoirs (Choisnel, 1977) avec des profondeurs de sol variables.

La figure 1-2 compare pour la station de Blagnac et une réserve utile de 200mm, l'évolution de la réserve 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 km² pour Isba. A noter que depuis 2010, la Commission CatNat a adopté le SWI du modèle SIM comme référence pour le calcul des critères de sécheresse géotechnique et disposer ainsi d'une meilleure représentation spatiale sur l'ensemble de la France.

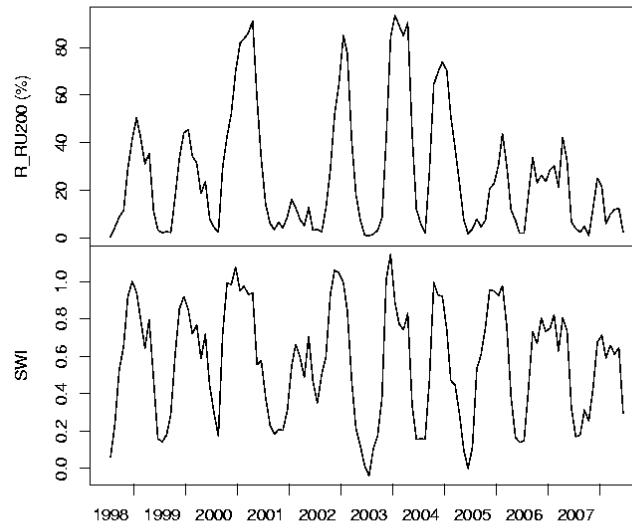
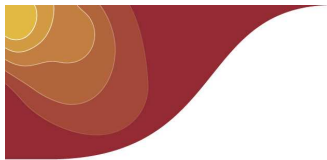
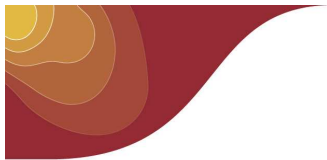


Figure 1-2 Comparaison d'indices d'humidité du sol simulé par 2 approches au pas de temps mensuel sur les dix dernières années. En haut, pourcentage de la réserve utile d'une réserve de 200 mm pour la station de Blagnac simulé par le modèle Bilhy (Choisnel,1977). En bas, *Soil Wetness Index* simulé par ISBA sur la maille la plus proche de cette station.

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 satisfaction des besoins en eau pour la végétation ($w=w_{fc}$). Ces cartes montrent que les sols sont en moyenne bien alimentés en eau durant les mois de janvier à mars sur l'ensemble de la France, à l'exception notable de la Sologne (sol très sablonneux) 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 façade 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 3-2 présente les tendances linéaires du SWI mensuel 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 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.

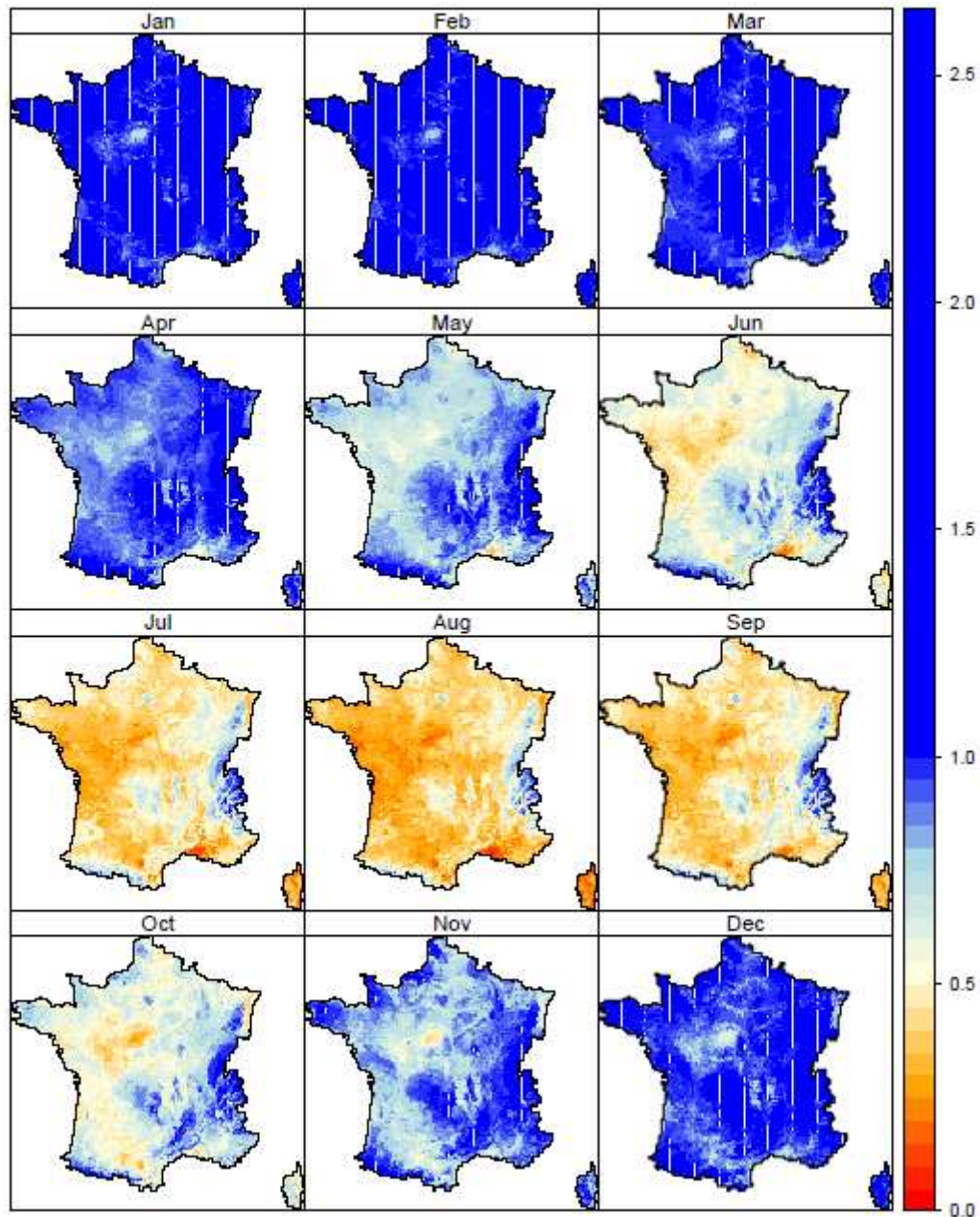


Figure 2-2 Moyennes mensuelles du SWI sur la période 1958-2008. La couleur bleu foncé indique une humidité supérieure à la capacité au champ.

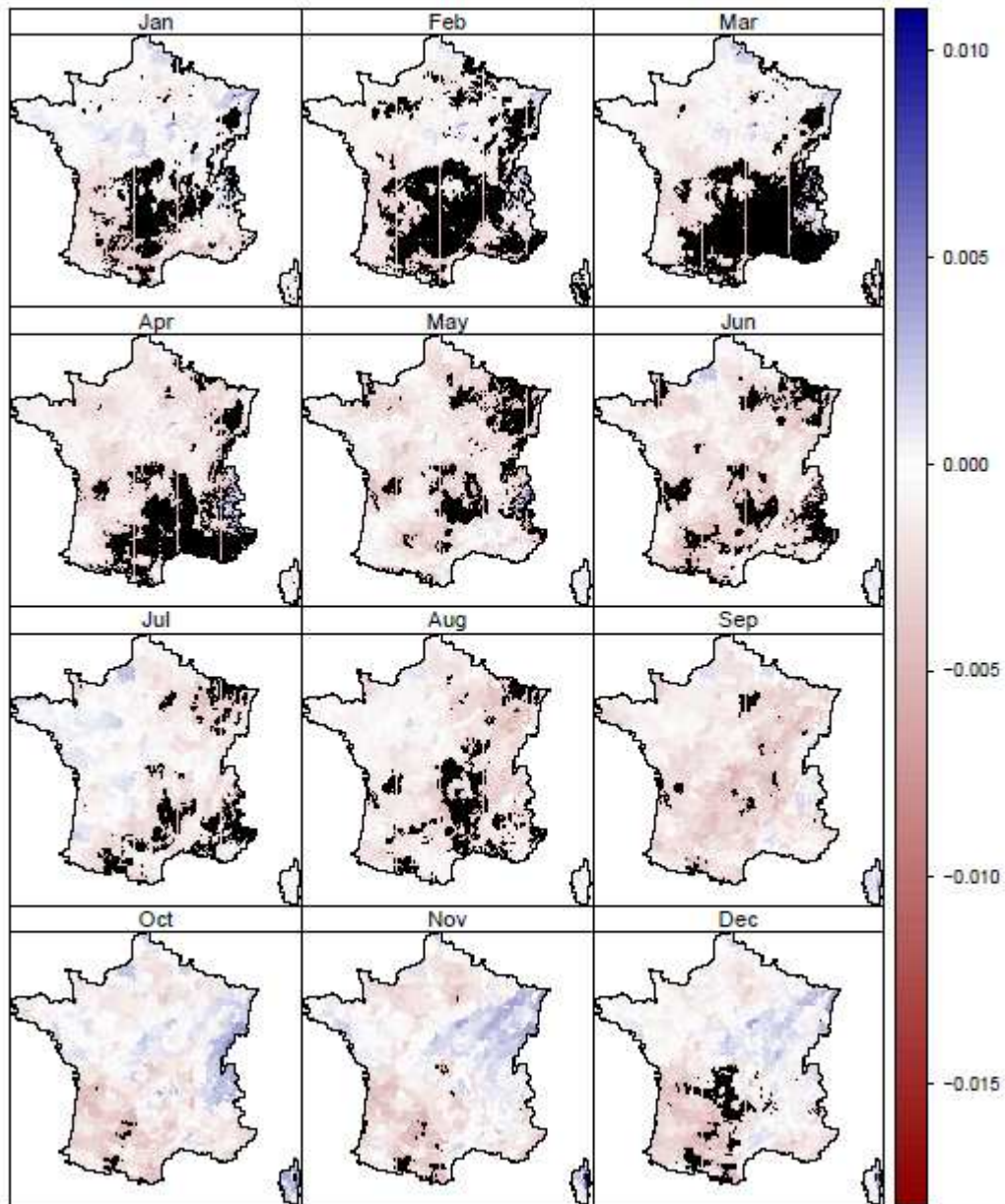
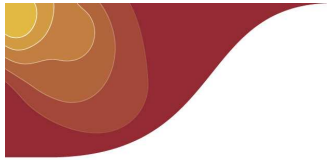
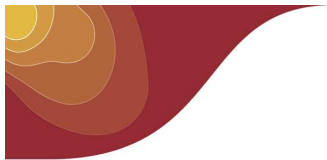


Figure 3-2 Tendances linéaires du SWI (an^{-1}) sur la période 1958-2008. Les points indiquent des tendances statistiquement significatives (test de Mann-Kendall à 95%).



Chapitre 3: Méthodologie d'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.

Considérons par exemple une valeur de SWI moyen de Janvier à Mars. Cette valeur correspond à une probabilité P dans la distribution des 50 valeurs moyennes de Janvier à Mars sur la période 1958-2008. La valeur correspondante de l'indice de sécheresse Standardized SWI est pris comme la valeur correspondant à cette même probabilité P dans une distribution normale centrée réduite. Cette opération est répétée pour l'ensemble de la chronique de SWI pour obtenir la série correspondante de Standardized SWI. La distribution locale du Standardized SWI est par construction normale centrée réduite, une valeur de 0 correspondant donc à une moyenne interannuelle.

La figure 1-3 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 1-3 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'identifier 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 2-3 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.

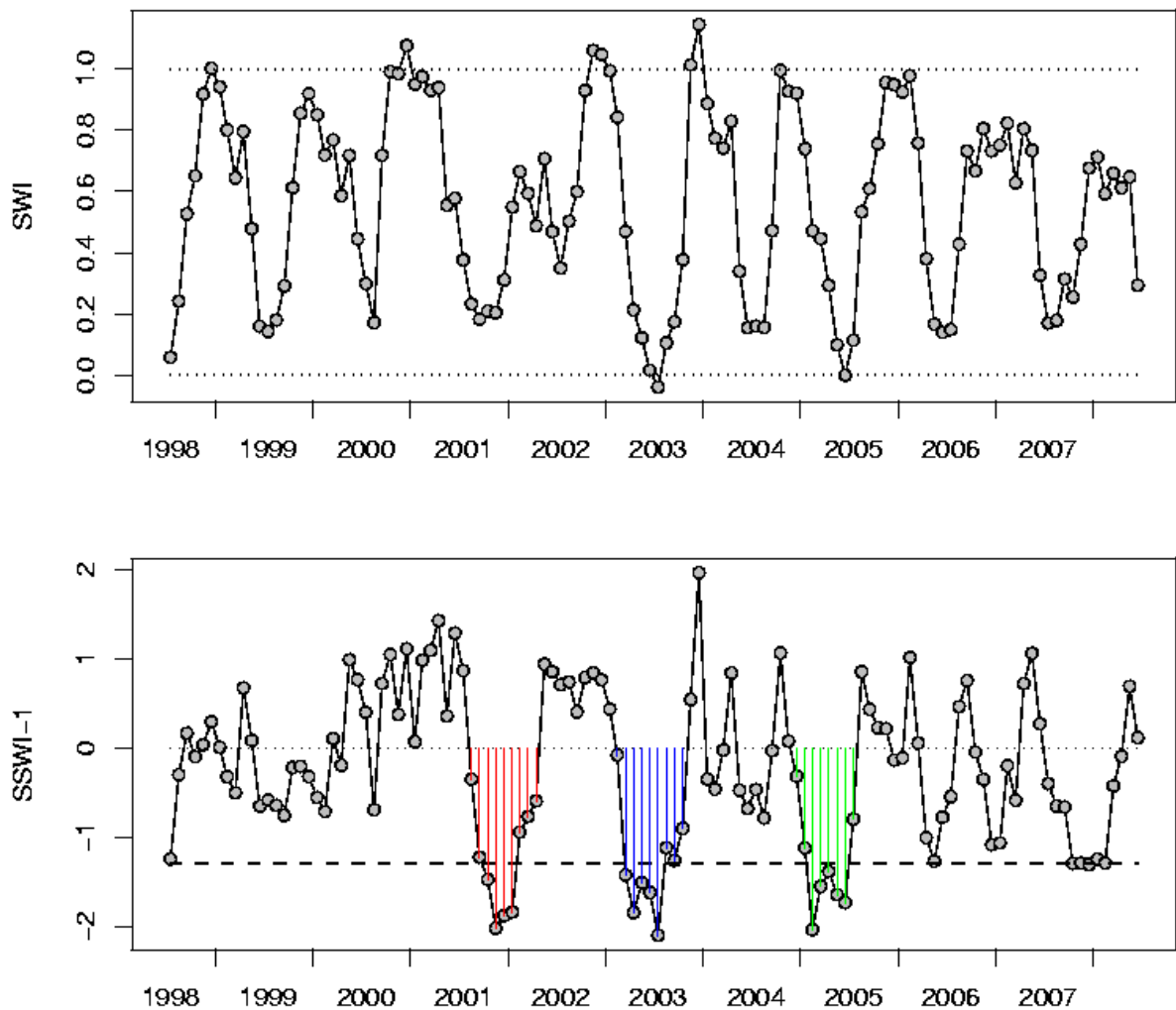
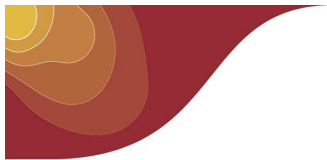


Figure 1-3 Exemple de SWI et SSWI-1 pour une maille près de Toulouse. En haut, évolution temporelle du SWI avec les seuils correspondant au point de flétrissement (0) et à la capacité au champ (1). En bas, évolution correspondante du SSWI-1 et identification de trois événements de sécheresse dépassant le seuil correspondant à une probabilité de 10%.

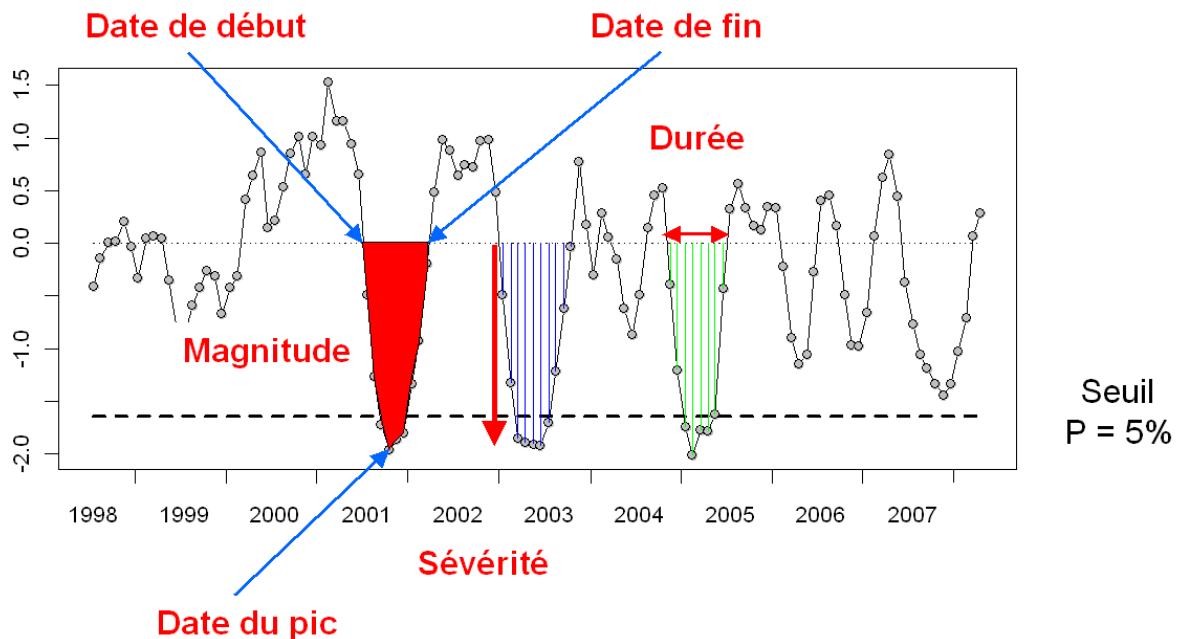
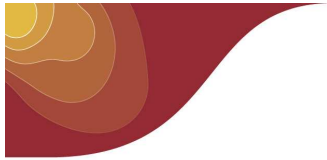


Figure 2-3 Schéma expliquant la définition des événements de sécheresse et leurs caractéristiques : début, fin, durée, sévérité, magnitude.

3.2 Caractérisation spatio-temporelle des évènements

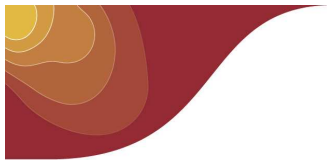
Une sécheresse est un événement qui s'étend à la fois dans l'espace et dans le temps. Il est donc important d'identifier l'ensemble des événements indépendants ayant frappé la France au cours des derniers 50 ans afin de déterminer leurs caractéristiques et notamment l'évolution de leur extension spatiale, 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 Aride⁵ 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 R⁶ :

- Choix d'une échelle de temps (n) ;
- Choix d'un seuil sur l'indice de sécheresse (SSWI-n) pour l'état de sécheresse ;
- 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 ;
- 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 Assessment of the Regional Impacts of Droughts in Europe (www.hydrology.uni-freiburg.de/forsch/aride/)

⁶ www.r-project.org



- Calcul des caractéristiques moyennes de chaque événement (aire maximale affectée, magnitude totale, sévérité moyenne, etc.) ;
- Calcul pour chaque événement des courbes Sévérité-Aire-Durée (SAD) inspirée des travaux de 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. (2009) 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, 2008a). La figure 3-3 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 mêmes régions (figure 3-3 au milieu). On peut aussi noter les résultats particuliers sur la région parisienne dus au caractère intégralement urbain de cette zone.

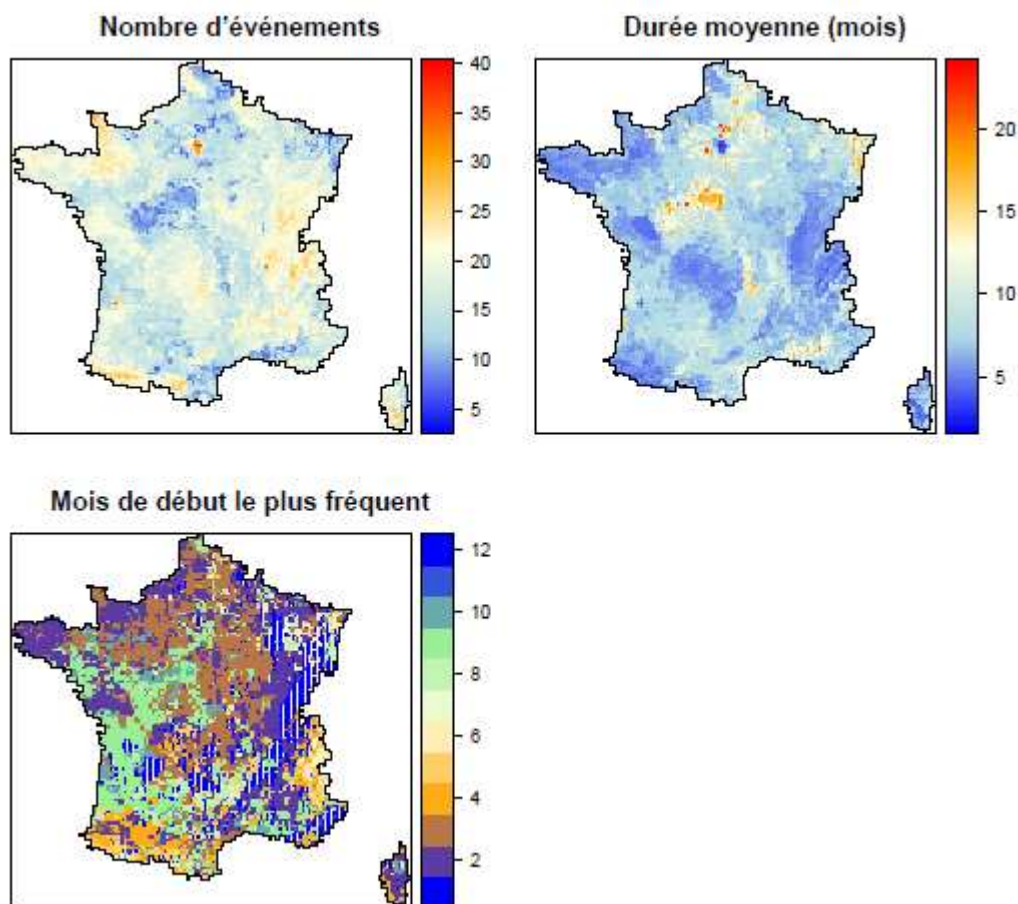
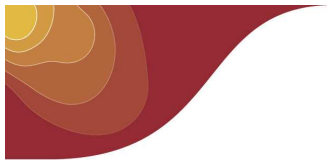


Figure 3-3 Exemples de caractéristiques moyennes des événements de sécheresses sur la période 1958-2008, avec le SSWI-1 et un seuil de sécheresse fixé à 10%.



La figure 3-3 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 4-3. On peut reconnaître les sécheresses bien connues de 1976, 1989-1990 et 2003, mais aussi d'autres événements comme celui de l'automne 1978.

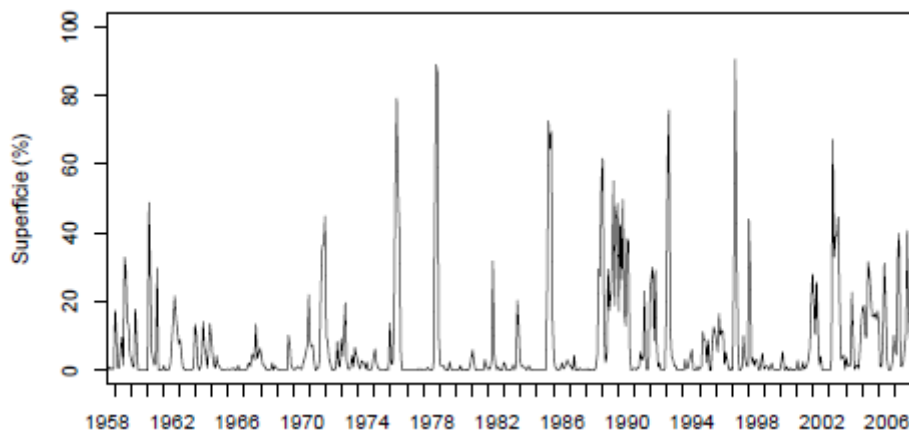


Figure 4-3 Superficie affectée par la sécheresse, exprimée en pourcentage de la superficie de la France et calculée à partir du SSWI-1 avec un seuil à 10%.

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 5-3 et 6-3 pour les sécheresses de 1976 et 2003.

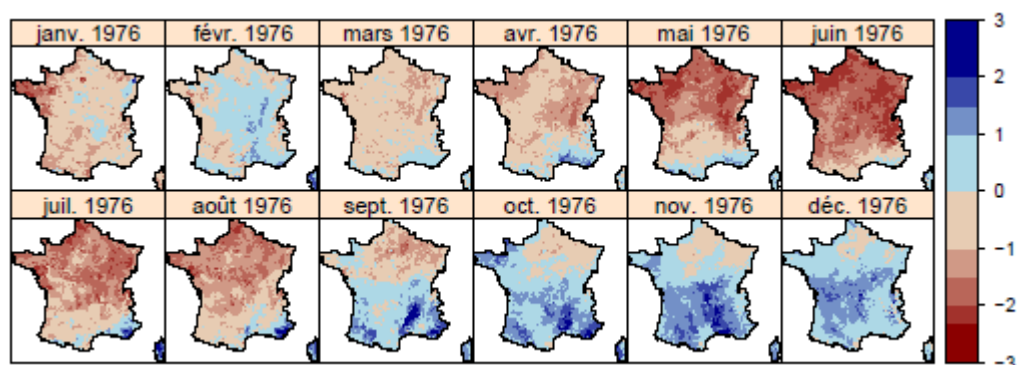


Figure 5-3 Représentation de la sécheresse de 1976 avec le SSWI-1. L'échelle de couleur est dérivée de la classification traditionnelle du Standardized Precipitation Index

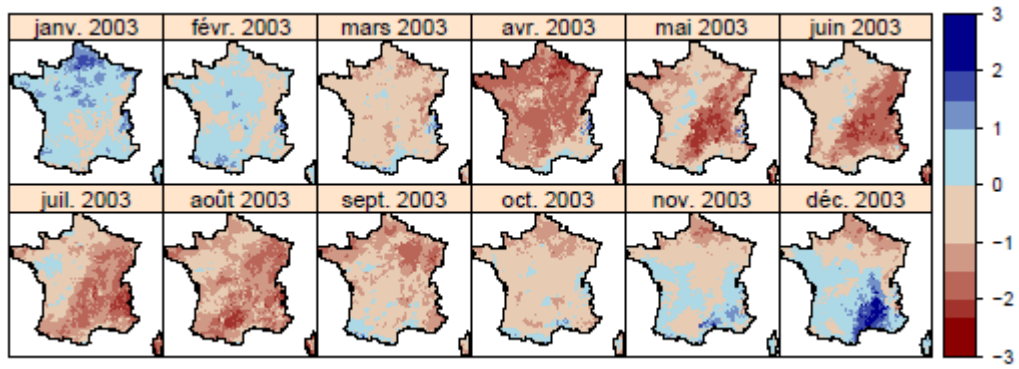
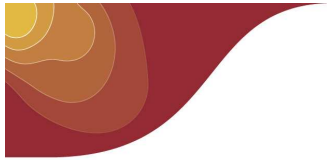
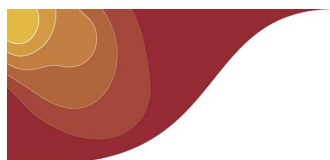


Figure 6-3 Représentation de la sécheresse de 1989-1990 avec le *SSWI-1*.



Chapitre 4 Caractérisation des évènements passés

4.1 Sélection des indices de sécheresse

Trois types de sécheresse physique peuvent être classiquement identifiés (Wilhite et Glantz, 1985) : les sécheresses météorologiques, relatives aux variables atmosphériques et principalement les précipitations, les sécheresses agricoles, relatives au contenu en eau des sols, et les sécheresses hydrologiques, relatives notamment au débit des rivières. Les variables issues de la chaîne hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou (SIM, Habets et al., 2008) ont été ici mises à profit pour élaborer des indices pour ces trois types de sécheresse (voir Tableau 1-4).

	Variable	Type de sécheresse	Indices
SAFRAN	Précipitations	Météorologique	<i>Standardized Precipitation Index (SPI)</i>
Isba	SWI	Agricole	Standardised Soil Wetness Index (SSWI)
Modcou	Débits	Hydrologique	Standardised Flow Index (SFI)

Tableau 1-4 Correspondance entre variables SIM, types de sécheresses et indices associés.

L'approche utilisée pour construire les indices de sécheresse s'inspire du calcul du Standardized Precipitation Index (SPI, McKee et al., 1993), indice largement utilisé au niveau international dans un contexte de suivi opérationnel des sécheresses météorologiques, par exemple aux États-Unis⁷ ou en Europe du sud-est⁸. Les variables SIM du Tableau 1-4 ont été moyennées/sommées sur des échelles de temps de 1 à 24 mois pour construire les indices correspondants. Ces indices suivent localement et par construction une distribution normale centrée réduite sur la période 1958-2008. Le calcul des indices est décrit de façon détaillée par Vidal et al. (2010).

4.2 Comparaison spatio-temporelle des évènements

Une sécheresse se développe à la fois dans l'espace et dans le temps. Une analyse spatio-temporelle a donc été effectuée afin de comprendre l'évolution des différents évènements passés en termes de SPI et de SSWI. Des caractéristiques synthétiques de ces évènements ont ensuite été déterminées : la surface moyenne affectée par l'évènement, sa durée moyenne et sa magnitude totale (déficit cumulé dans l'espace et le temps). La figure 1-4 présente les relations entre surface, durée et magnitude pour les sécheresses météorologiques et agricoles et pour des échelles de temps de 3, 6 et 12 mois. On peut ainsi voir sur la figure 1-4 que la sécheresse de 1976 (en rouge) était exceptionnelle à des échelles de temps courtes en termes de déficits de précipitations, mais bien moins exceptionnelle du point de vue des déficits d'humidité du sol et/ou à des échelles de temps plus importantes.

⁷ US Drought Monitor: www.drought.unl.edu/dm/

⁸ Drought Management Center for Southeastern Europe: <http://www.dmcsee.org/>

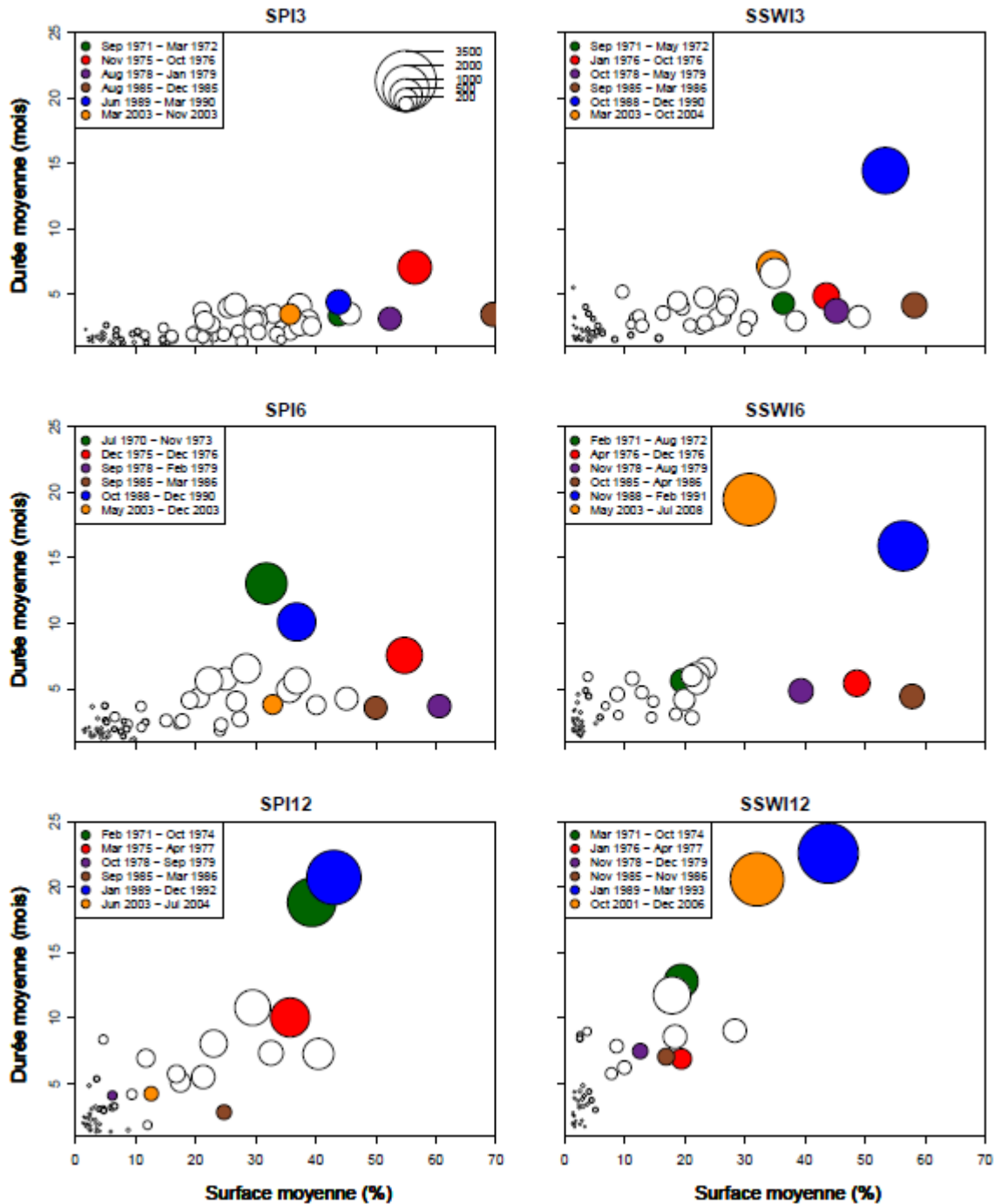
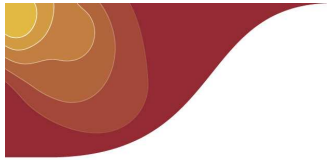
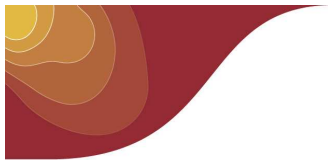


Figure 1-4 Relation entre surface moyenne, durée moyenne et magnitude totale pour tous les événements de sécheresse avec le SPI (colonne de gauche) et le SSWI (colonne de droite), avec des échelles de temps de 3, 6 et 12 mois (du haut vers le bas) et un seuil de 20%. L'aire des disques est proportionnelle à la magnitude totale. L'échelle pour la magnitude, en mois par % de la France, est donnée dans le graphe situé en haut à gauche. Six événements majeurs sont identifiés à l'aide de couleurs identiques sur chacun des graphes



Des observations similaires peuvent être effectuées pour la sécheresse de l'automne 1978, en violet (voir Bellocq, 1979 pour un compte-rendu météorologique) et celle de l'automne 1978, en marron (Larivière, 1985). La sécheresse de 2003 (en orange) se révèle ordinaire en termes de déficits de précipitation, mais atteint la seconde ou même la première place en termes de magnitude pour les déficits d'humidité du sol sur les cinquante dernières années. Ceci peut être expliqué par la durée remarquable de cette sécheresse agricole, qui incorpore plusieurs pics entre mai 2003 et juillet 2008 (voir paramètre SWI6). Des caractéristiques similaires peuvent être notées pour la sécheresse de l'hiver 1971-1972 qui englobe, sur des échelles de temps longues, les déficits des printemps/hivers précédents et suivants.

Enfin, la sécheresse de 1989-1990 apparaît comme la plus sévère des cinquante dernières années en termes de déficits d'humidité du sol et de précipitations sur des échelles de temps longues. Sa durée est particulièrement remarquable comparée à celle des autres événements, avec une période sèche entre juillet 1989 et janvier 1990 qui a suivi un hiver 1988-1989 déjà très sec (Mérillon et Chaperon, 1990) et précédé d'autres périodes déficitaires en 1990.

4.3 Identification des événements de référence

Un autre type d'analyse a été effectué afin d'identifier les événements ayant donné lieu à la sévérité maximum moyenne sur une surface donnée. On peut ainsi voir par exemple quel événement a conduit aux déficits les plus extrêmes pour une surface équivalente à une région française ou à un grand bassin versant. La méthode employée pour identifier ces événements est dérivée de l'analyse cumul-surface-durée des précipitations orageuses décrites par l'OMM (1969). Elle a été employée pour l'évaluation de la sévérité des sécheresses aux États-Unis par Andreadis et al. (2005) et à l'échelle mondiale par Sheffield et al. (2009). Cette méthode a donc été appliquée ici aux champs spatio-temporels en grille de SPI et de SSWI pour l'ensemble des échelles de temps considérées, de 1 à 24 mois. Le résultat est présenté dans la figure 2-4.

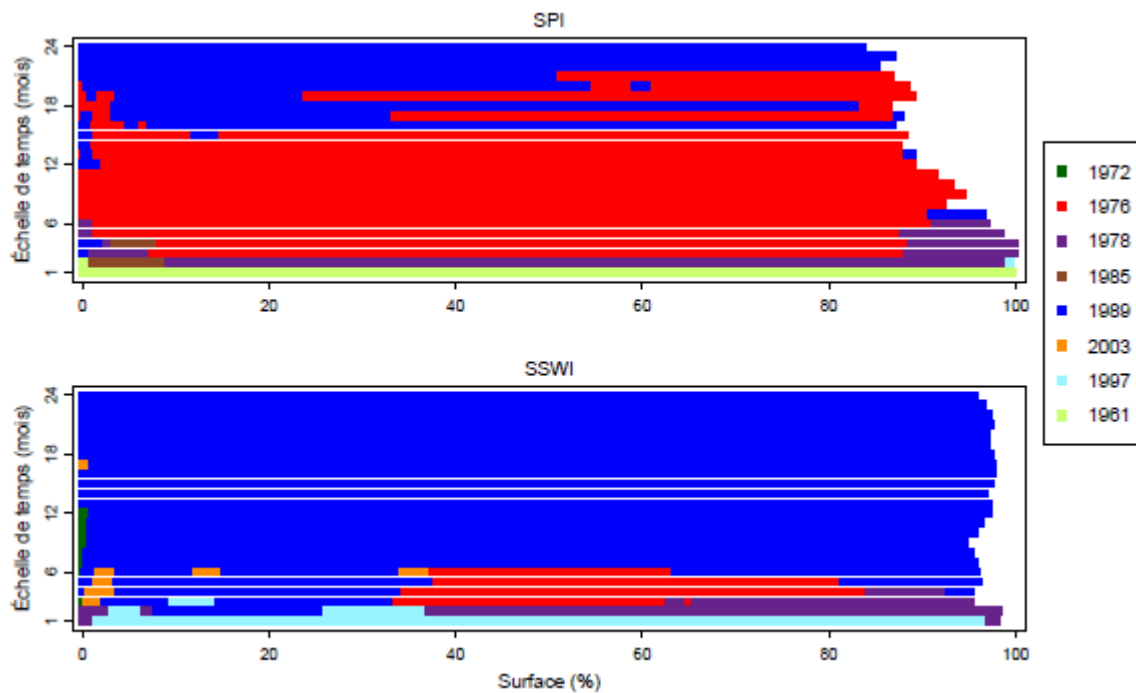
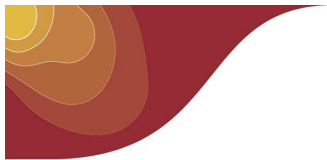
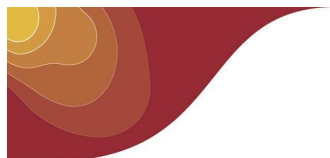


Figure 2-4 Identification des événements ayant présenté la plus forte sévérité moyenne sur une surface donnée, pour des échelles de temps de 1 à 24 mois. Haut : sécheresses météorologiques; bas : sécheresses agricoles. Les événements sont identifiés ici par l'année où le déficit maximum de précipitation sur 1 mois a été atteint.

Les 5 événements identifiés précédemment se retrouvent sur cette figure avec les mêmes couleurs que sur la figure 1-4. La sécheresse de 1976 apparaît comme l'événement météorologique le plus extrême pour des échelles de temps comprises entre 3 et 15 mois, alors que la sécheresse de 1989-1990 s'approprie la première place pour des échelles de temps plus longues ainsi qu'à des échelles de temps supérieures à 6 mois au niveau agricole. Cette figure montre aussi les courtes et intenses sécheresses automnales de 1978 et 1985, ainsi que la sécheresse de 1972, durant laquelle des déficits d'humidité du sol exceptionnels ont été enregistrés dans la plaine d'Alsace (voir Bréda et Badeau, 2008 pour une étude d'impact sur les forêts). La sécheresse de 2003 apparaît rarement comme l'événement de référence.

Deux événements additionnels complètent le panel des événements de référence pour des échelles de temps courtes : premièrement, mars 1961, durant lequel plusieurs régions françaises n'ont quasiment pas vu une goutte d'eau (Direction de la Météorologie Nationale, 1961), et qui constitue ainsi l'événement de référence à échelle de temps 1 mois pour les sécheresses météorologiques. Deuxièmement, avril 1997, durant lequel les valeurs d'humidité du sol étaient très basses en raison de deux mois très secs durant la période de recharge (Météo France, 1997), et qui est de fait l'événement de référence à échelle de temps 1 mois pour les sécheresses agricoles.

Des résultats plus détaillés sont disponibles dans l'article de Vidal et al. (2010b) « Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran Isba Modcou Hydrometeorological suite », publié dans la revue *Hydrology and Earth System Sciences*.



Phase 2 : Évolution des caractéristiques des sécheresses sous changement climatique

Chapitre 1 : Données et méthodes

Ce chapitre détaille les différentes données et la discussion sur les méthodes utilisées pour l'étude d'impact des sécheresses en France au cours du XXI^e siècle.

1.1 Les différentes projections climatiques

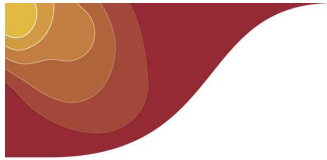
Trois expériences ont été utilisées dans l'étude des sécheresses en France sous changement climatique. Elles ont été choisies afin d'évaluer les différentes sources d'incertitude. L'ensemble des informations des scénarios climatiques exploités dans le projet ClimSec est donnée dans le tableau 1-1.

Scénario d'émissions	A2		A1B		B1		Périodes
	TT	QQ	TT	QQ	TT	QQ	
Méthode de descente d'échelle							
SAMM	x	x					1961-2099
Modèle Arpege – Climat V4.6	x		x		x		1959-2100
6 modèles de GIEC AR4			x				1960-2000 et 2046-2065

Tableau 1.1. : Présentation des projections climatiques utilisées dans le cadre du projet ClimSec. TT: types de temps; QQ : quantile-quantile.

Une première expérience a été effectuée à partir des produits du modèle SAMM (Somot et al., 2008), construit en couplant le modèle atmosphérique de Météo-France Arpege-Climat V4.5 et le modèle d'océan dédié à la Méditerranée Opamed. La projection utilisée est constituée d'une simulation du modèle SAMM sur la période 1961-2099, forcée jusqu'en 2000 par des températures de surface de la mer observées et à partir de 2000 par des concentrations de gaz à effet de serre conformes au scénarios A2 du GIEC (Nakićenović *et al.*, 2000). Les résultats de cette simulation ont fait l'objet – préalablement au projet Climsec – d'une descente d'échelle spatiale afin d'obtenir des forçages atmosphériques à la résolution de 8 km sur la France. La première méthode adoptée pour cette descente d'échelle est une méthode par types de temps (TT) développée au Cerfacs (Boé et al., 2009) et consolidée à travers le logiciel Dsclim (Pagé et al, 2009).

Une deuxième méthode a été utilisée pour obtenir des projections désagrégées spatialement : la méthode quantile-quantile (QQ) développée par Déqué et al. (2007). Ces deux simulations atmosphériques ont ensuite été utilisées pour forcer les modèles Isba et Modcou sur l'ensemble de la période 1961-2099. Des résultats de ces simulations hydro-climatiques ont été publiés par Quintana Seguí et al. (2009).



La deuxième expérience a été réalisée avec les simulations sur la période 1961-2100 du modèle Arpège-Climat, version 4.6, mettant en scène à partir de l'an 2000 trois scénarios de concentration de gaz à effet de serre: B1, A1B et A2. Cet exercice permet l'évaluation particulière des incertitudes induites par les scénarios socio-économiques.

La dernière expérience s'appuie sur six modèles du jeu de simulations multi-modèles CMIP3 (Pagé et al, 2008), réalisé pour le dernier rapport du GIEC (4^e rapport de 2007). Ces modèles ont été sélectionnés dans le cadre du projet GICC/REXHYSS sur leur capacité à représenter au mieux la distribution des incertitudes de l'évolution attendue des précipitations sur la France au milieu du XXI^e siècle (Ducharne et al., 2009)⁹.

1.2 La chaîne hydrométéorologique Isba-Modcou (IM)

Les projections simulées par les modèles de circulation générale et désagrégées à une échelle spatiale de 8 km² (grille ISBA) ont été utilisées pour forcer la chaîne hydrométéorologique Isba-Modcou et obtenir l'humidité du sol (SWI), variable nécessaire en complément des précipitations pour l'étude des sécheresses agricoles.

La figure 1-1 présente le schéma de fonctionnement de la chaîne SIM en climat futur.

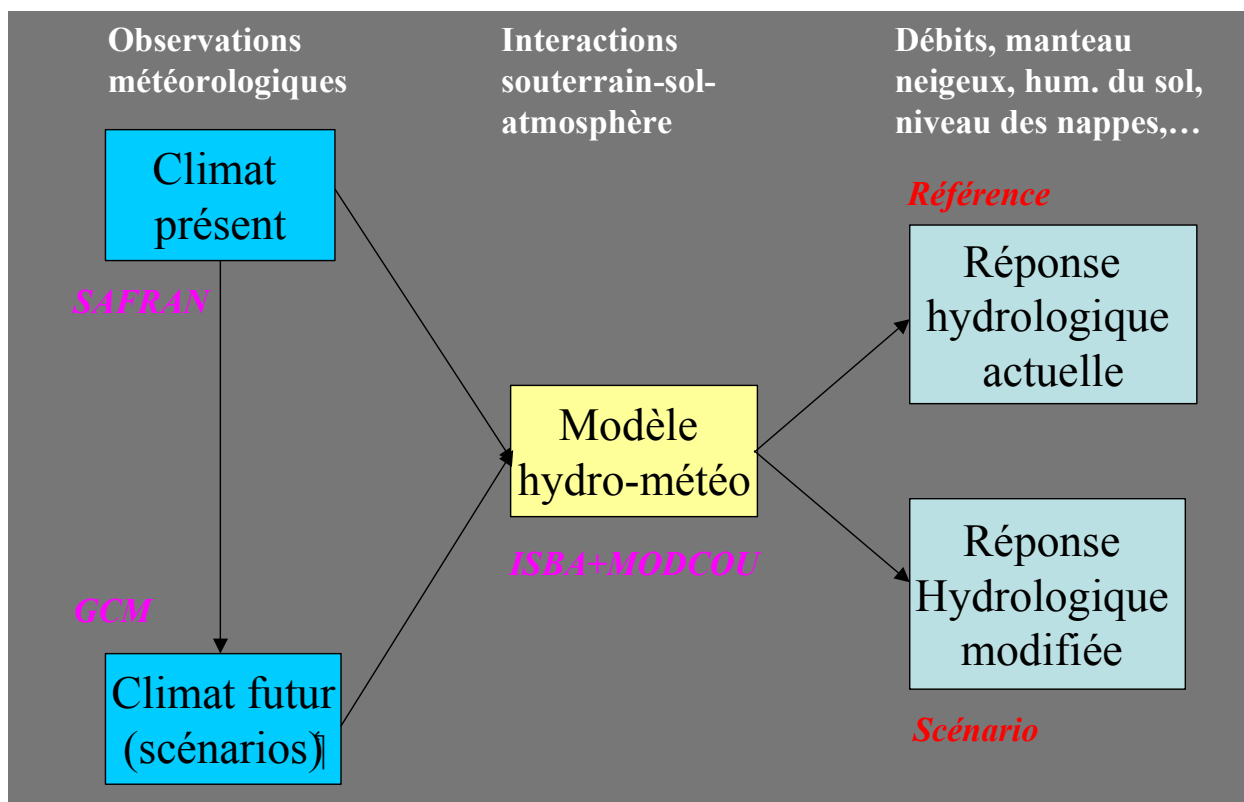
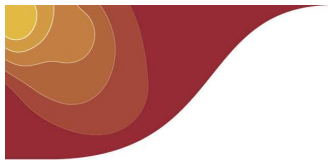


Figure 1.1 Schéma de fonctionnement de la chaîne SIM en climat futur : les scénarios désagrégés issus des GCM assurent le forçage du modèle hydrométéorologique Isba/Modcou pour déterminer la référence et les scénarios futurs.

⁹ <http://www.sisyphes.upmc.fr/~agnes/rexhyss/index.php>



Les données de l'étude des caractéristiques des sécheresses au XXI^e siècle ont été obtenues par les forçages de IM avec les projections disponibles (Tableau 1.1): projections 1961-2099 de SAMM, projection 1959-2100 d'Arpege V4.6 et projections 1960-2000 et 2046-2065 des 6 modèles de GIEC AR4.

1.3 Construction des indices de sécheresse

La première expérience de construction des indices de sécheresses a porté sur les données du jeu SAMM dans le tableau 1-1. Les valeurs simulées de précipitations, de SWI et de débit ont été transformées en indices de sécheresse suivant la méthode de construction des indices standardisés rappelée plus haut. Elles ont ainsi été projetées sur les distributions d'un climat de référence, choisi ici comme le climat observé (issu de la réanalyse SIM 1958-2008) sur la période 1958-2008. Les conséquences de ces choix seront examinées dans la section 1.5.

La première analyse a consisté à examiner l'évolution de la proportion de la surface de la France affectée par la sécheresse (échelle de temps 6 mois et probabilité de non-dépassement inférieure à 5%). Cette évolution est représentée sur la figure 2-1 pour la réanalyse SIM sur la -période 1958-2008 (en bleu) et pour la projection climatique sur la période 1961-2099 (en rouge). Dans chacun des ensembles de courbes, les lignes représentent, de haut en bas, l'évolution de la surface affectée par les sécheresses météorologique (SPI), agricole (SSWI) et hydrologique (SFI).

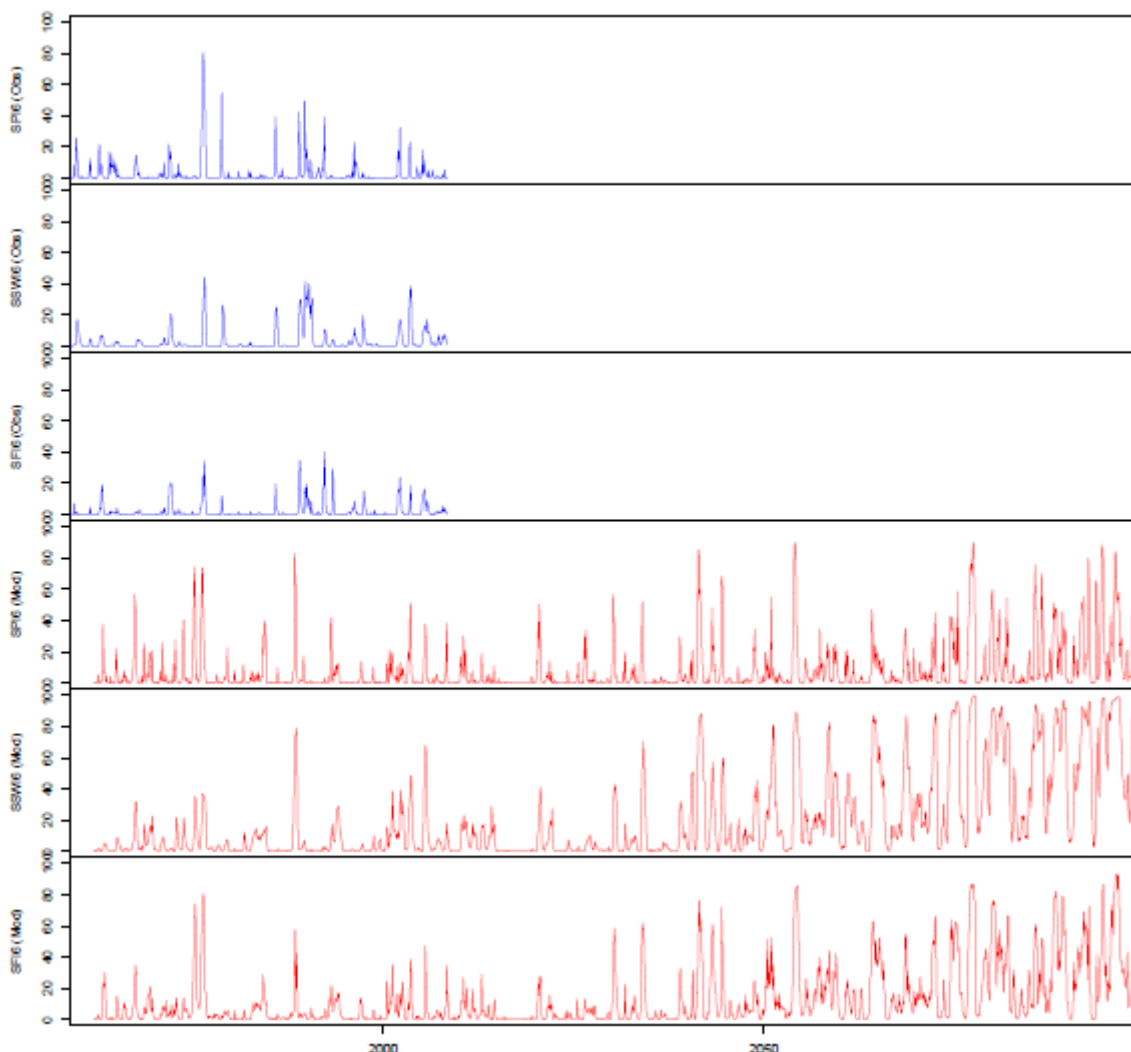
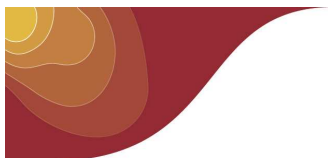
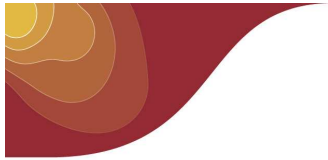


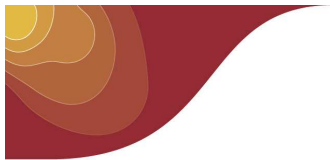
Figure 2-1 Proportion de la surface de la France affectée par une sécheresse sévère (échelle de temps 6 mois et seuil 5%). En bleu, réanalyse SIM 1958-2008 (Obs). En rouge, simulation sur la période 1961-2099 (Mod). De haut en bas, sécheresses météorologiques (SPI), agricoles (SSWI) et hydrologiques (SFI).

Deux observations principales peuvent être effectuées à partir de la figure 1-2:

- La première remarque porte sur la période «historique» : le nombre de pics est bien plus important dans la simulation temps présent que dans les observations, dénotant un biais sec du modèle pendant cette même période. On rappelle que l'examen du phasage des pics n'est pas ici pertinent car ces données proviennent d'une simulation climatique dont l'évolution temporelle à fréquence infra-décennale n'est pas contrainte par les observations ;
- La deuxième observation est une augmentation au cours du XXI^e siècle – et plus particulièrement dans sa deuxième moitié – de la surface affectée, avec de longues périodes au cours desquelles au moins une partie du territoire sera dans un état de sécheresse sévère. Cette augmentation apparaît plus importante pour les sécheresses agricoles – et dans une moindre mesure pour les sécheresses hydrologiques – que pour



les sécheresses météorologiques, en raison de l'augmentation des températures qui va favoriser l'évapotranspiration et accentuer d'autant les déficits en eau du sol.



Chapitre 2: Choix du référentiel

2.1 Sensibilité au climat de référence

La section précédente a mis en lumière les questions relatives au biais éventuel de la projection climatique sur la période temps présent. Afin de s'affranchir de tels biais sur la moyenne et/ou la variabilité de la variable considérée, il est possible d'utiliser comme climat de référence le climat simulé sur la période historique. Il reste toutefois un choix à effectuer, celui de la période sur laquelle considérer ce climat de référence. Pour ce cas d'étude, trois périodes ont été considérées :

- **1961-1990** : la période de référence climatique recommandée par l'OMM ;
- **1961-2000** : l'intersection entre la période observée et la simulation climatique en climat présent ;
- **1981-2005** : la période d'apprentissage – période pendant laquelle sont déterminées les relations statistiques entre la grande et la petite échelle – de la méthode de descente d'échelle par types de temps.

Trois chroniques de SPI6 ont ainsi été construites en standardisant les précipitations simulées sur la période 1961-2099 par la projection SAMM désagrégée avec la méthode par types de temps, par rapport aux précipitations elles aussi simulées sur chacune des trois périodes ci dessus, choisies comme période de référence. La figure 1-2 présente sur la maille de Toulouse la distribution du SPI6 sur les trente dernières années du XXI^e siècle obtenue à partir de ces trois calculs. Plusieurs constatations peuvent être effectuées :

- La distribution de l'indice est décalée vers les valeurs négatives quelle que soit la période de référence choisie. Ceci illustre une tendance à une diminution de la pluviométrie sur la région toulousaine d'ici la fin du siècle prochain ;
- Des différences dans les distributions apparaissent suivant la période de référence choisie, notamment sur la queue de distribution. Cela influe directement sur la fréquence de l'état de sécheresse sévère, comme relevé dans le Tableau 1-2.
- La fréquence de l'état de sécheresse sévère est d'une part beaucoup plus important en climat futur qu'en climat présent, et d'autre part très dépendante de la période de référence choisie. On peut ainsi voir des différences réduites entre présent et futur lorsque le climat de référence inclut les années sèches du début des années 2000.

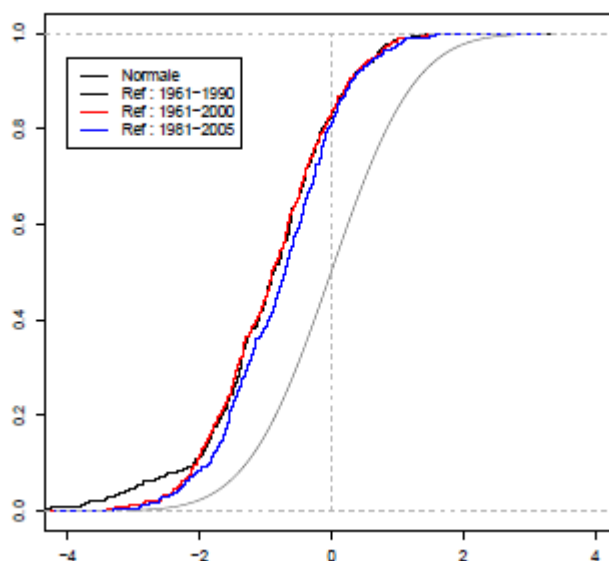
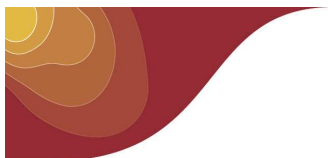


Figure 1-2 Influence de la période de référence sur la distribution du SPI6 sur la maille de Toulouse sur la période 2069-2099. La standardisation a été ici effectuée à partir de la simulation temps présent. En noir est représentée la distribution normale centrée réduite que suit - par construction - l'indice sur la période de référence.

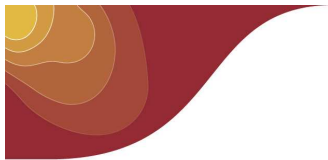
Période de référence	Fréquence
1961-1990	20.3%
1961-2000	21.1%
1981-2005	15%

Tableau 1-2 Fréquence de l'état de sécheresse sévère sur la période 2069-2099 (seuil 5% en climat de référence).

2.2 Objets de comparaison

Une autre interrogation porte sur l'objet de comparaison entre une période présente et une période future. Dans les paragraphes précédents, on avait choisi d'une part la valeur médiane de l'indice – qui est égale par définition à 0 en climat de référence – et d'autre part la fréquence de l'état de sécheresse sévère. D'autres objets peuvent tout à fait être envisagés, notamment ceux relatifs à la dynamique temporelle et donc à la caractérisation des événements indépendants. On rappelle ici que le début d'un événement de sécheresse correspond au passage de l'indice à des valeurs négatives, et que sa fin correspond à un retour de l'indice à des valeurs positives. L'identification des événements indépendants est donc lié à la manière dont l'indice considéré varie autour de la valeur médiane de l'indice.

La figure 2.2 présente l'évolution sous projection climatique du SPI6 sur la maille de Toulouse, calculée avec un climat de référence simulé sur la période 1961-2000. On voit ici que cette chronique présente une tendance lourde à la baisse au cours du XXI^e qui traduit encore une fois la diminution attendue de la pluviométrie. Cette tendance implique que la



valeur moyenne/médiane de l'indice varie au cours du temps, et l'on peut donc se poser la question de savoir si le seuil d'entrée/sortie en sécheresse peut toujours être pris égal à 0 en climat futur.

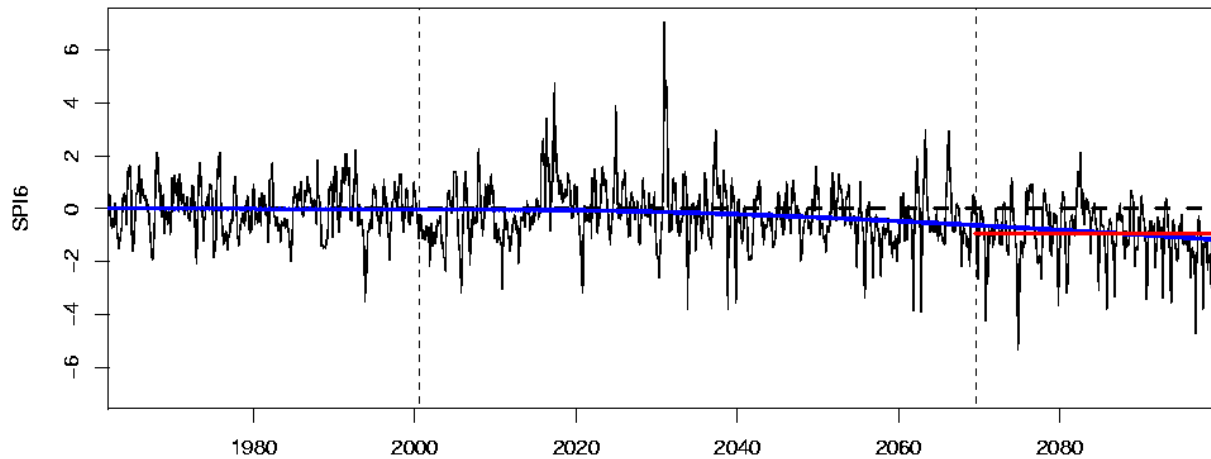


Figure 2-2 Évolution du SPI6 sur la maille de Toulouse, avec comme climat de référence celui de la simulation sur la période 1961-2000. En bleu, une spline ajustée sur la chronique de l'indice, en rouge la valeur moyenne de l'indice sur la période 2069-2099.

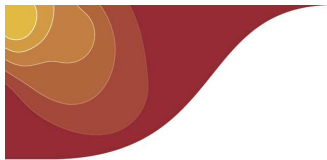
Le tableau 2-2 présente les résultats en termes de nombre d'événements indépendants sur cette période future avec les trois seuils définis ainsi. On voit naturellement que le nombre d'événement est très bas lorsque le seuil de 0 est conservé, en raison du décalage vers les valeurs négatives qui empêche l'indice de franchir souvent ce seuil. Les modifications de ce seuil permettent en revanche de retrouver l'ordre de grandeur du nombre d'événements observés sur la période 1961-1990, suggérant que les changements sur la temporalité des événements de sécheresses devraient rester limités.

Type de médiane	Nombre d'évènements
Climat de référence (0)	19
Climat futur stationnaire	34
Climat futur non stationnaire	30
Observation 1961-1990	36

Tableau 2-2 Nombre d'événements de sécheresse sur la période 2069-2099 et comparaison au nombre observé sur la période 1961-1990.

2.3 Différents types d'approche

La figure 2-2 proposait deux alternatives pour le choix du seuil pour la caractérisation des événements sur la période 2069-2099 : d'une part en rouge un seuil égal à la valeur moyenne de l'indice sur cette période (hypothèse de climat stationnaire), et d'autre part en bleu un seuil variable sur toute la longueur de la série et obtenue à partir de l'ajustement d'une spline cubique (hypothèse de climat non-stationnaire).



Une autre méthode pourrait consister à utiliser toute la période 1961-2100 comme période de référence dans l'algorithme de standardisation des indices de sécheresse (appelée approche III dans la suite). Cette approche est conforme au calcul statistique classique d'un indicateur standardisé et permet de mieux représenter les sécheresses fortes du XXI^e siècle. En revanche certaines régions pourraient ne présenter plus aucune sécheresse en début de période. Par ailleurs, la construction de distributions statistiques de séries présentant de fortes tendances posent également un problème mathématique. La figure 3-2 présente ces trois approches. Aucune de ces trois méthodes ne permet à elle seule de représenter l'ensemble des particularités de la distribution des indices standardisés au cours du XXI^e siècle comme on va le voir dans le paragraphe suivant.

Ces approches peuvent également être interprétées en regard des stratégies d'adaptation avec l'approche I sans adaptation, l'approche II en adaptation continue, l'approche III en adaptation globale.

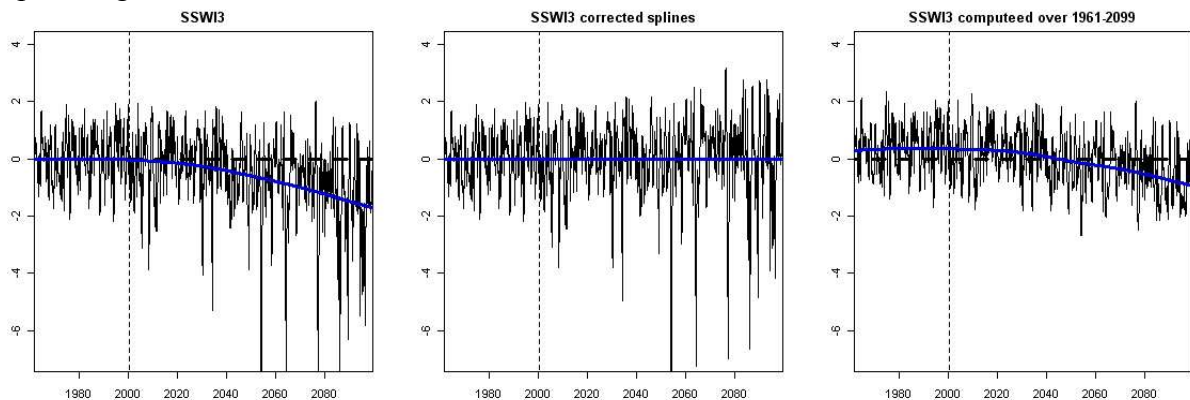


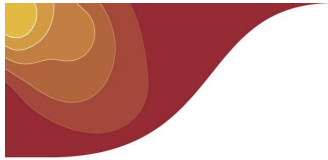
Figure 3-2 Évolution au cours du temps de l'indice SSWI3 en un point de grille proche de Toulouse. À gauche l'indice standardisé en utilisant la période 1961-2000 comme période de référence (approche I), au centre l'indice standardisé auquel on a retiré une tendance calculée par ajustement d'une spline cubique (approche II), à droite l'indice standardisé en utilisant la période 1991-2100 comme période de référence (approche III). Les tendances sont tracées en bleu.

Par la suite, la référence temporelle utilisée pour la définition des sécheresses sera la période 1961-1990, notamment pour le seuil d'entrée (médiane du climat référent). On s'intéressera particulièrement à la partie modéré à extrême de la distribution (probabilité de 16% en climat référent).

2.4 Représentation des événements de sécheresse selon l'approche choisie

À titre d'illustration des discussions de ce chapitre, on reprend ici les trois approches définies pour montrer leur complémentarité dans la compréhension des changements attendus. Les figures suivantes présentent différents diagnostics sur deux caractéristiques des événements de sécheresses (nombre et durée) :

- Figure 4-2 avec l'approche I (période de référence 1961-2000). Certains événements de sécheresses deviennent ininterrompus sur plusieurs décennies, par exemple dans l'est de la France sur la période 2065-2095 avec la méthode types de



- temps: l'algorithme ne peut déterminer ni le début ni la fin des événements de sécheresse, aucun événement de sécheresse ne peut donc être repéré ;
- Figure 5-2 avec l'approche II. Bien que la tendance ait été retirée, le nombre d'événements de sécheresses augmente malgré tout avec le temps. Cela peut provenir du calcul de la tendance, ou bien des caractéristiques des événements de sécheresses: plus intenses (d'où la tendance) mais plus courts (d'où l'augmentation du nombre de sécheresses même après le retrait de la tendance) ;
 - Quelles que soient l'approche et la méthode de descente d'échelle utilisées, il est intéressant de noter la variabilité décennale naturelle du système climatique qui se traduit par une diminution du nombre et de la durée des événements de sécheresses sur la période 2005-2035 alors qu'ils augmentent sur le reste de la période.
 - Figure 4-2: avec l'approche III, il n'y a pratiquement plus d'événements de sécheresse sur les périodes 1970-2000 et 2005-2035

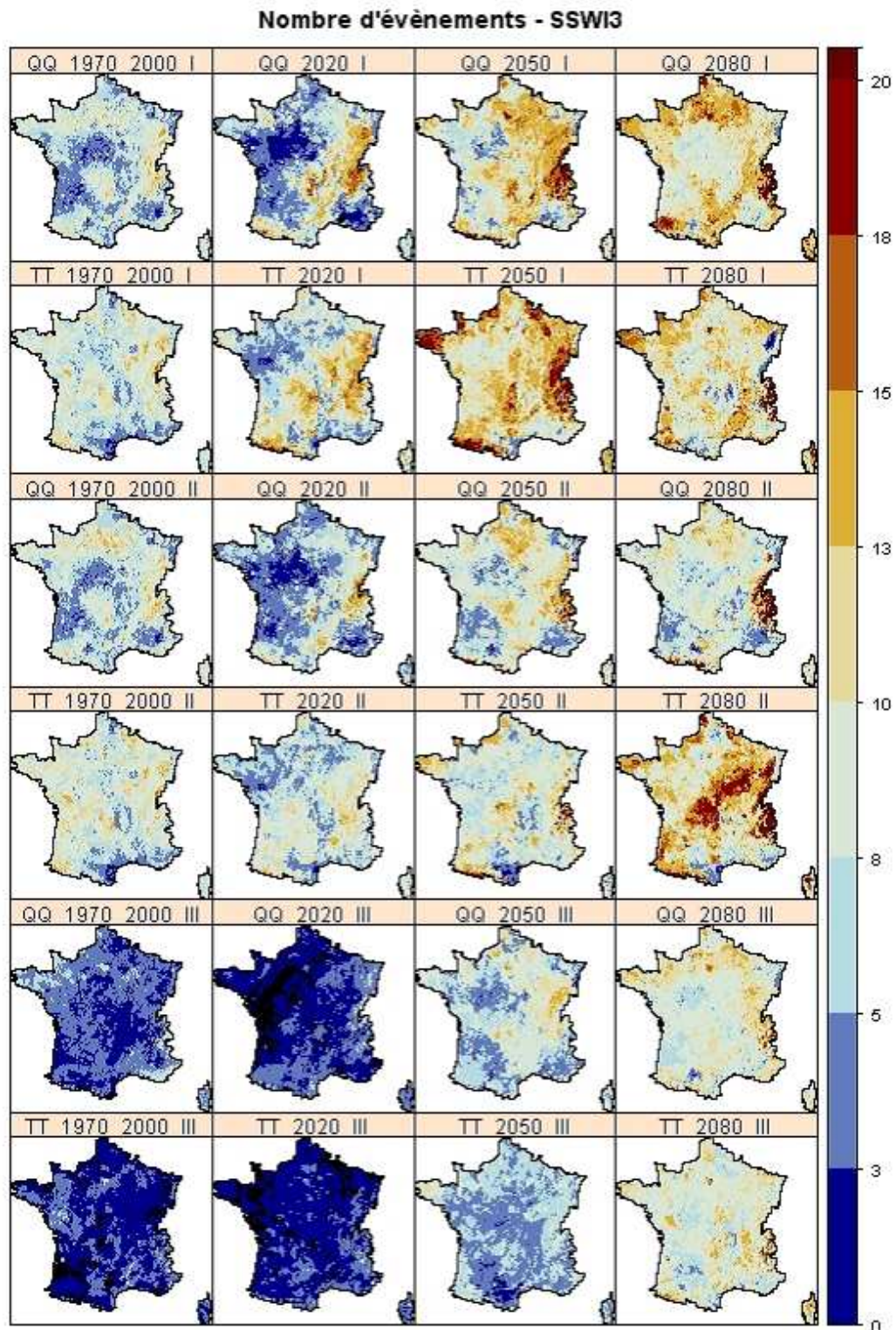
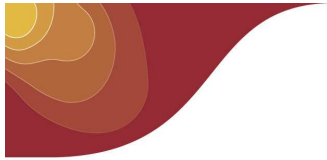


Figure 4-2: Nombre d'évènements de sécheresse définis par l'indice SSWI3 sur les périodes (de gauche à droite) 1970-2000, 2005-2035, 2035-2065 et 2065-2095. Deux premières lignes: période de référence 1961-2000 (signalé par I). Troisième et quatrième ligne: période de référence 1961-2000 et retrait de la tendance (signalé par II). Deux dernières lignes: période de référence 1961-2100 (signalé par III). Pour chaque méthode, les résultats obtenus avec la descente d'échelle quantile-quantile est en haut (signalé par QQ) et ceux obtenus avec la descente d'échelle types de temps en bas (signalé par TT). La couleur noir indique la valeur 0.

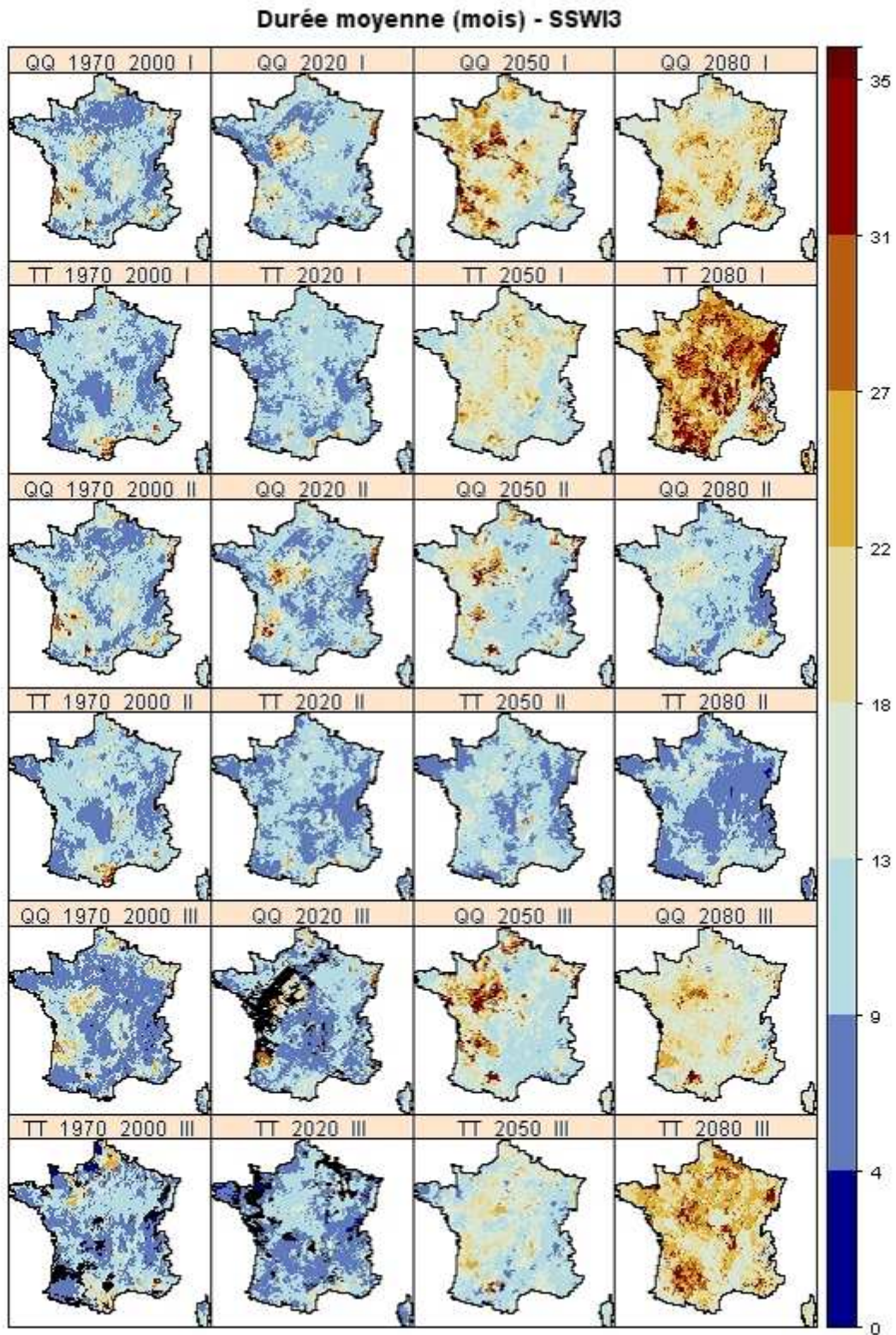
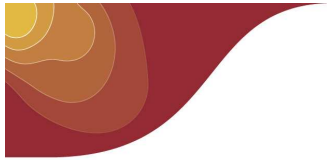
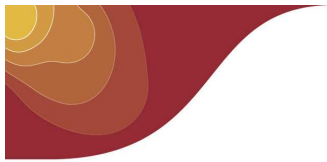


Figure 5-2: Idem Figure 4-2 pour la durée moyenne des sécheresses



Chapitre 3: Caractérisation et incertitudes

Ce chapitre présente les résultats de l'analyse des sécheresses météorologiques et agricoles au cours des changements climatiques au XXI^e siècle, obtenus à travers des indices standardisés. Deux caractéristiques intégratives des événements de sécheresses ont été choisies pour illustrer leur évolution: la superficie affectée par la sécheresse, exprimée en pourcentage du territoire métropolitain, et le temps passé en sécheresse (TPS), exprimé en pourcentage d'une période donnée. Ces deux paramètres permettent de représenter à la fois les évolutions temporelles des sécheresses et leur répartition spatiale. Pour mieux se focaliser sur les événements significatifs, le seuil de sécheresse considéré sera celui des sécheresses modérées à extrêmes (16% de probabilité sur la distribution normalisée des indices de références). Dans leur présentation, les résultats sont regroupés en fonction des trois sources d'incertitude décrites plus haut.

3.1 Incertitudes liées aux modèles climatiques

Le fonctionnement du système climatique terrestre est particulièrement complexe à appréhender tant par le nombre de ses composants (atmosphère, océan, cryosphère, biosphère) que la nature de leurs interactions. Les modèles climatiques disponibles actuellement dans les principaux centres de recherche s'appuient sur des représentations physiques assez différentes d'un modèle à l'autre, tout en répondant aux exigences de bonne restitution des climats actuels et passés. Les études d'impact du changement climatique montrent généralement que le modèle climatique est la première source d'incertitude en valeur absolue des changements attendus.

Dans notre étude, cette source d'incertitude est analysée en utilisant les projections de 6 modèles de circulation générale du GIEC AR4 (Tableau 1.1). On rappelle que ces 6 modèles ont été choisis à partir de la sélection faite dans le cadre du projet RExHySS (Ducharne et al., 2009), pour la bonne représentation des distributions moyennes de précipitation sur la France. Une approche multi-modèle a également été utilisée pour construire une référence moyenne de plusieurs modèles, permettant notamment l'évaluation du modèle Arpège Climat, principalement utilisé dans la suite de l'étude.

Les figures 1-3 et 2-3 présentent le temps passé en sécheresse météorologique (SPI3) et agricole (SSWI3) à une échelle temporelle saisonnière (3 mois) et annuelle (12 mois). Cette caractéristique est exprimée en pourcentage sur la période de 19 ans entre 2046 et 2065. Seules les sécheresses modérées à extrêmes (correspondant à un seuil de 16% de probabilité d'apparition dans la distribution normale de référence) ont été prises en compte dans la détermination du TPS. En examinant les cartes :

- on met en évidence d'abord la variabilité des simulations de chaque modèle, plus marquée pour les sécheresses agricoles que météorologiques (du fait que l'humidité du sol est également impacté par les autres variables atmosphériques), ainsi que pour les événements longs (12 mois) plutôt que les courts (3 mois) ;

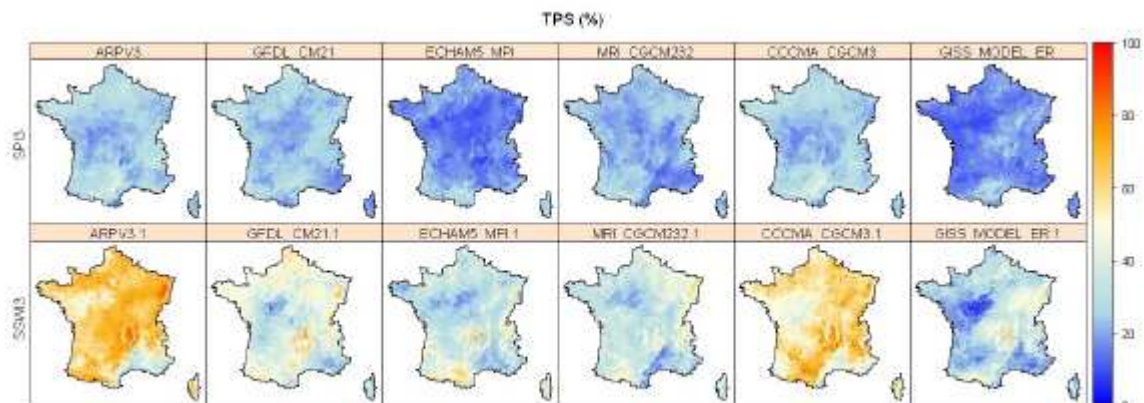
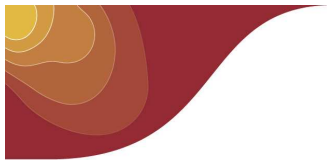


Figure 1-3 Répartition spatiale du temps passé en sécheresse (TPS), selon le SPI et le SSWI, intégré sur 3 mois, pour 6 modèles de GIEC AR4.

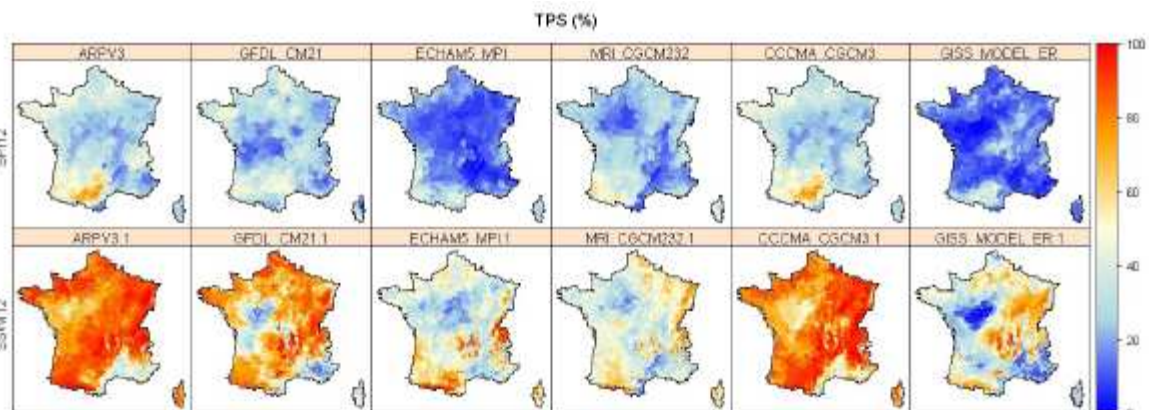
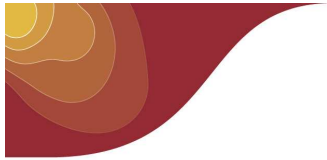


Figure 2-3 Répartition spatiale du temps passé en sécheresse (TPS), selon le SPI et le SSWI, intégré sur 12 mois, pour 6 modèles de GIEC AR4.

- on constate aussi que les sécheresses agricoles sont d'une durée plus longue que les sécheresses météorologiques, allant jusqu'à 80% (24 ans) pour certains modèles sur 3 mois et plus de 90% sur 12 mois. Cela prouve l'importance croissante pour les sécheresses des facteurs liés à l'évaporation, se combinant aux types de sols et à la végétation ;
- en comparant les résultats des deux pas de temps, on voit que le TPS des sécheresses annuelles SPI12 et SSWI12 augmente encore plus dans les endroits où le TPS des sécheresses saisonnières SPI3 et SSWI3 avait un pourcentage élevé. Pour cette raison, d'une manière générale, on ne présentera les résultats annuels qu'en cas de différence importante des résultats saisonniers. Bien sûr d'autres régions de TPS élevé à une échelle annuelle peuvent apparaître. Ceci s'explique par l'intégration d'épisodes plus secs à l'échelle annuelle qui se traduisent par une diminution des épisodes humides à cette même échelle ;
- on constate aussi que pour les sécheresses météorologiques saisonnières, le TPS varie au maximum entre 20% et 40%, tandis qu'au pas annuel, il peut atteindre jusqu'à 80%



dans certaines zones. Il est difficile d'identifier des zones précises de sécheresses météorologiques avec TPS élevé sur 3 mois tandis que sur 12 mois les régions méridionales (Sud Ouest notamment) semblent plus concernées. Pour les sécheresses agricoles ce sont les régions montagneuses (Vosges, Alpes, surtout Alpes du Nord, Pyrénées et Massif Central) qui présentent de manière uniforme quel que soit le modèle des sécheresses saisonnières et annuelles plus longues.

La figure 3-3 illustre à partir de la comparaison entre la moyenne multi-modèles et Arpege V4.6, sous scénario socio-économique A1B, la répartition spatiale de l'incertitude des résultats, due au choix du modèle de circulation générale. On met en évidence que Arpege est proche du MM pour les sécheresses météorologiques mais que les différences sont plus importantes pour les sécheresses agricoles. Ce type de sécheresse est plus marqué avec Arpege surtout sur la moitié Nord Ouest du pays. Cette comparaison rappelle également que le choix du modèle global est essentiel pour l'interprétation des résultats.

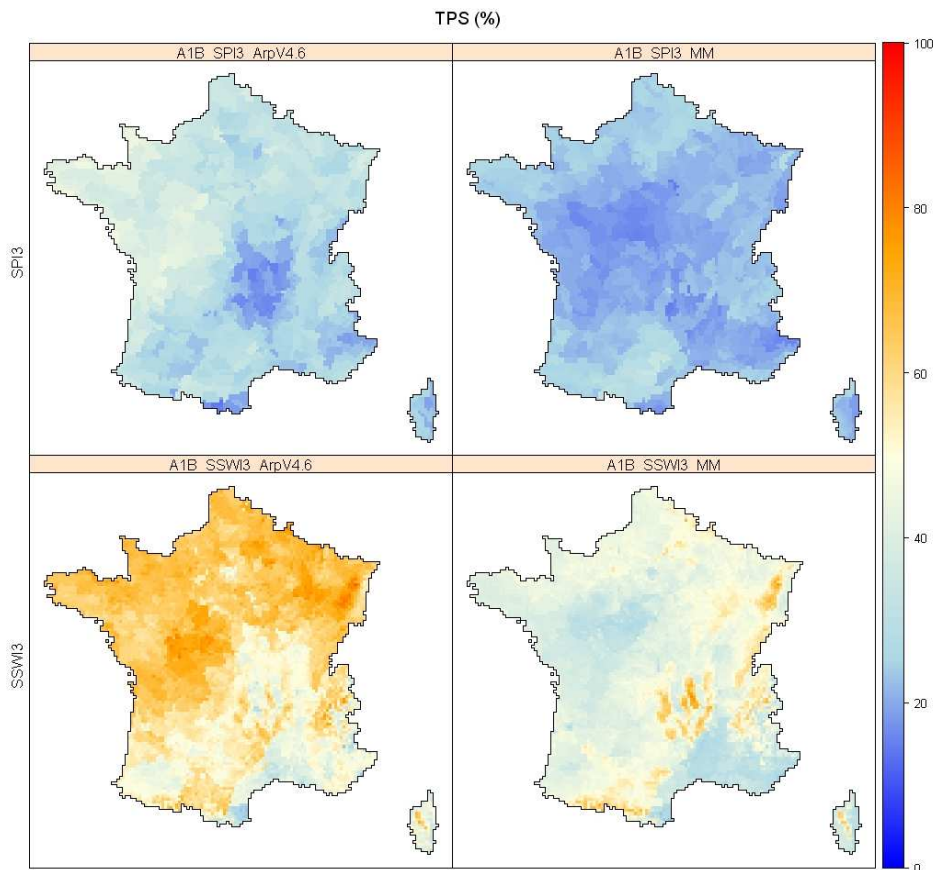


Figure 3-3 Répartition spatiale du temps passé en sécheresse (TPS), selon le SPI et le SSWI, intégré sur 3 mois, comparaison du modèle Arpege V4.6 et du multimodèle MM.

Cette remarque peut s'appliquer également à la comparaison des résultats entre deux versions différentes d'un même modèle, supposées de qualité égale. La figure 4-3 compare les résultats de TPS sur 3 mois de 2 versions d'Arpege Climat avec un même scénario socio-économique A2 et une même méthode de descente d'échelle (type de temps). Elle met en évidence des différences spatiales sensibles dans le temps passé en sécheresse, notamment pour l'humidité des sols.

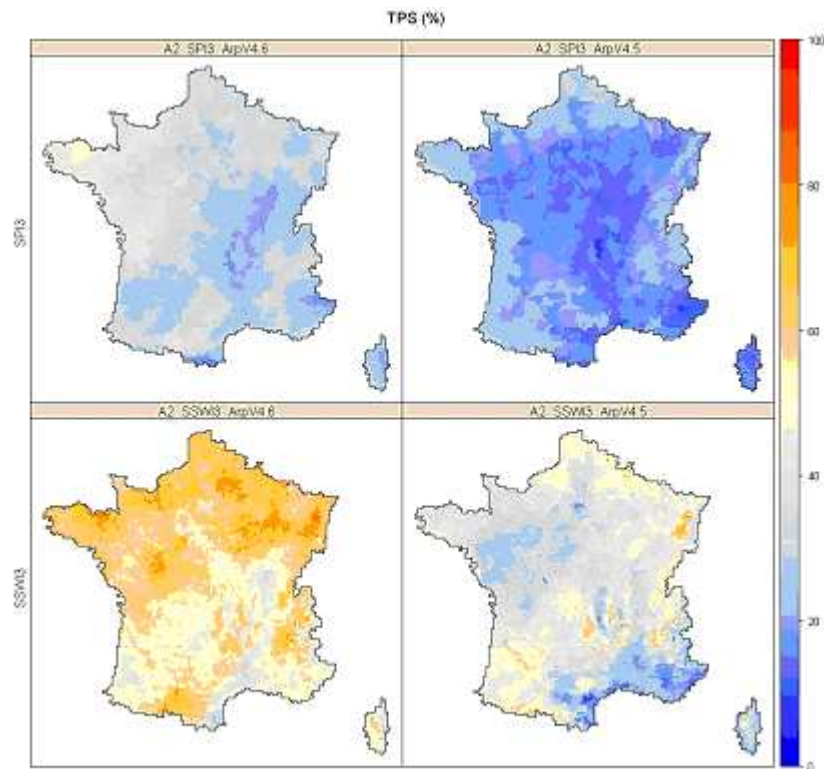
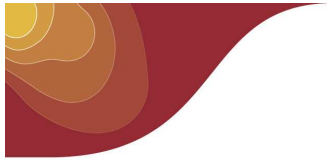
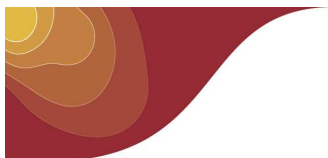


Figure 4-3 Répartition spatiale du temps passé en sécheresse (TPS), selon le SPI et le SSWI, intégré sur 3 mois, comparaison des versions V4.6 et V4.5 du modèle Arpège selon un scénario A2 (période 2040-2070).

3.2 Incertitudes liées aux scénarios socio-économiques

Dans cette expérience sont utilisées les données du modèle Arpège V4.6 sous scénarios B1, A1B, A2, désagrégés par la méthode type de temps. Les incertitudes sur les scénarios d'émission sont illustrées par l'évolution temporelle de 1961 à 2100 de la surface affectée par la sécheresse pour la même période, scénario climatique A2. Les deux caractéristiques sont déterminées à partir des indices SPI et SSWI saisonniers et annuels (figure 5-3, figure 6-3 et figure 7-3). On peut retenir des évolutions temporelles de la superficie de sécheresse atmosphérique et agricole les résultats principaux suivants :

- une représentation correcte par le modèle sur la période 1961-2008 des sécheresses météorologiques (fig 5-3) et des sécheresses agricoles (fig 6-3 et 7-3) en comparaison avec la réanalyse SIM (boîte cyan). On note sur la réanalyse que les sécheresses actuelles les plus sévères sur 3 mois ont atteint sur la période 1961-2008 des valeurs proches de 50% pour les sécheresses météorologiques (événement de 1976 déduit de la figure 2-4 p37) mais déjà 70 % pour les sécheresses agricoles et même 80% pour le SSWI12 (événement de 1990 déduit de la figure 2-4 p37).
- une tendance moyenne à l'accroissement de la superficie des zones en sécheresse (SPI3, SSWI3 ou SSWI12) entre 1961 et 2100 tant pour les paramètres moyens de la distribution que pour les extrêmes;



- des ordres de grandeur proches des projections liées aux scénarios A1B et A2 tant pour les sécheresses météorologiques qu'agricoles, sur 3 mois ou sur 12 mois ;
- Des sécheresses agricoles sur 3 mois avec une extension supérieures à 70% (événement de 1990) deviennent relativement fréquentes à partir de 2050 (3^{ème} quartile de la distribution); le même raisonnement ne s'applique sur les sécheresses météorologiques qu'à la fin du XXI^{ème} siècle (événement extrême de 1976 et 3^{ème} quartile de la distribution)
- Les valeurs minimales des indicateurs SPI ou SSWI s'élèvent au cours du siècle, signifiant que des sécheresses plus ou moins fortes se rencontrent chaque année.
- À la fin du XXI^e siècle, la variabilité de la surface touchée par les sécheresses agricoles sur 3 mois (SSWI3 sous scénarios A1B et A2) tend à se réduire et évolue systématiquement entre 65 et 85%. Cela signifie que certaines régions françaises pourraient se retrouver de manière quasi-continue en sécheresse sur 3 mois, modérée à extrême, en référence à l'état moyen de l'humidité des sols de 1961 à 1990. Sur les sécheresses longues (SSWI12), c'est quasiment tout le pays qui pourrait être concerné entre 2080 et 2100 (85 à 95 % du territoire en sécheresse). A noter également que le scénario B1 a priori « plus optimiste », marque aussi une évolution forte à cette échéance avec des variations entre 60 et 80% du territoire touché en moyenne par les sécheresses agricoles longues.

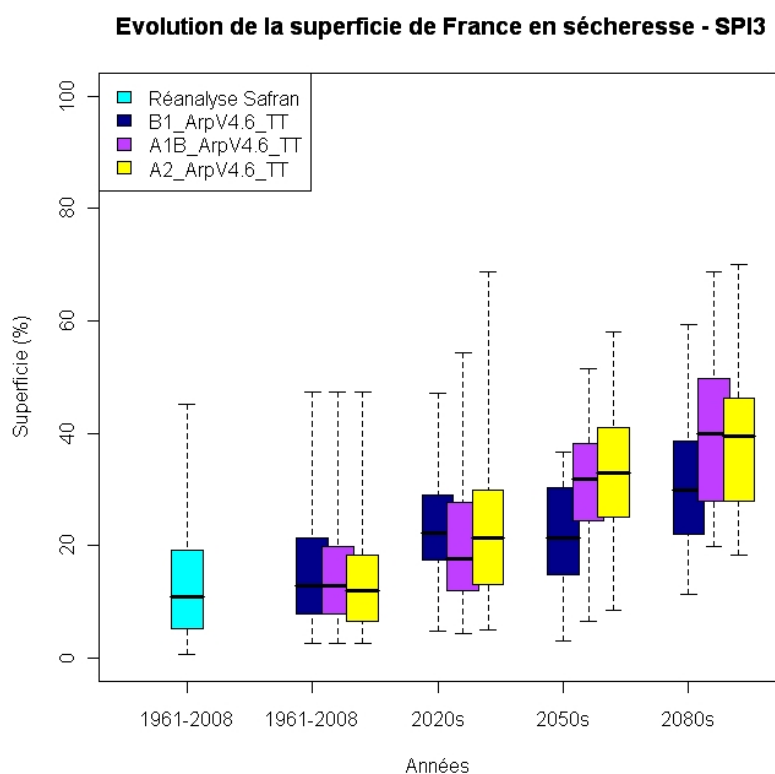
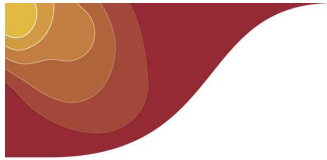


Figure 5-3 Diagramme en boîtes (valeur minimale, 1^{er} quartile, médiane, 3^e quartile et maximale) sur des périodes d'évolution entre 1961 et 2100 de la superficie affectée par les sécheresses météorologiques (SPI3), modérées à extrêmes, sur la France (seuil 16%) en fonction des scénarios climatiques B1, A1B, A2 du modèle ArpegeV4.6, méthode de descente d'échelle type de temps (TT).



Evolution de la superficie de France en sécheresse - SSWI3

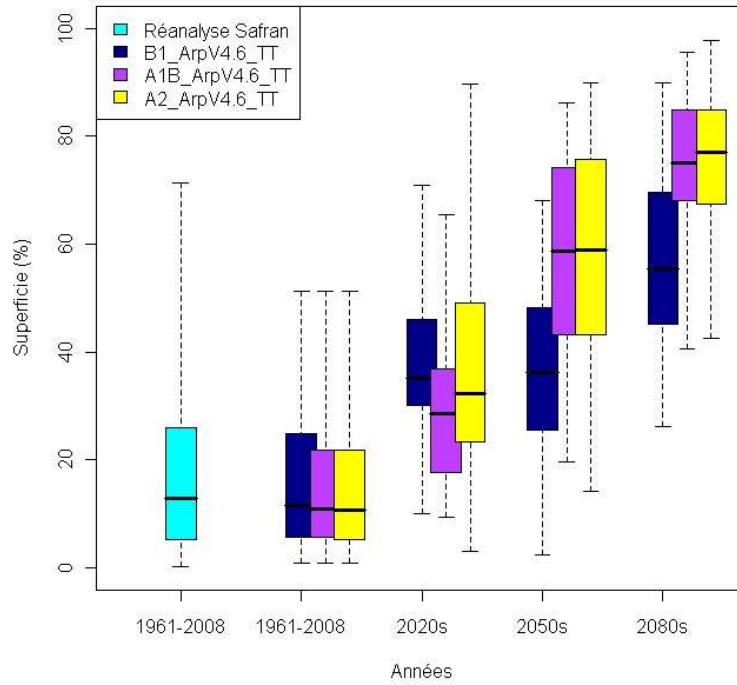


Figure 6-3 Même graphique que le 5-3 pour les sécheresses agricoles sur 3 mois (SSWI3).

Evolution de la superficie de France en sécheresse - SSWI12

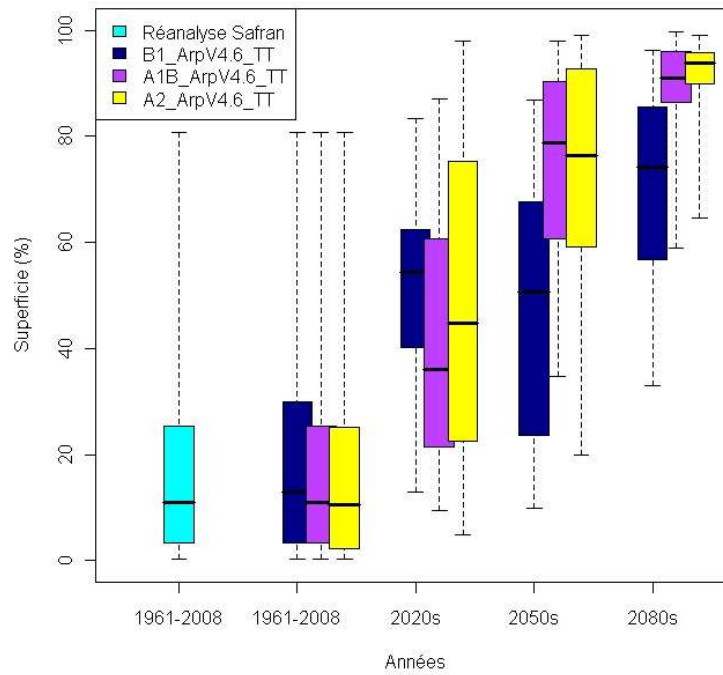
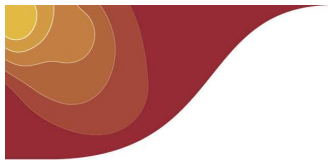


Figure 7-3 Même graphique que le 5-3 pour les sécheresses agricoles sur 12 mois (SSWI12).



La figure 8-3 permet de caractériser l'évolution temporelle des incertitudes entre les projections issues des trois scénarios d'émission :

- en 2020 (boîtes oranges), on note peu d'écart entre les 3 projections ;
- en 2050 et 2080 (boîtes rouges et bleues), les différences restent peu marquées entre les scénarios A1B et A2 mais deviennent fortes avec le scénario B1.

Les incertitudes entre les scénarios socio-économiques peuvent aussi être mises en évidence du point de vue spatial. La figure 9-3 présente les TPS pour les sécheresses météorologiques et agricoles sur 3 mois à la fin du XXI^e siècle issus des simulations ArpegeV4.6 sous trois scénarios d'émission de GES B1, A1B et A2. Cette visualisation réaffirme le diagnostic précédent sur les écarts moindres entre scénarios pour les sécheresses météorologiques qu'agricoles, ainsi que les bonnes concordances entre scénarios A1B et A2, y compris dans la répartition spatiale des sécheresses. Avec les scénarios A1B et A2, ce sont les régions méditerranéennes qui connaissent l'aggravation la moins marquée du TPS, s'agissant d'une référence à un climat initialement plus sec.

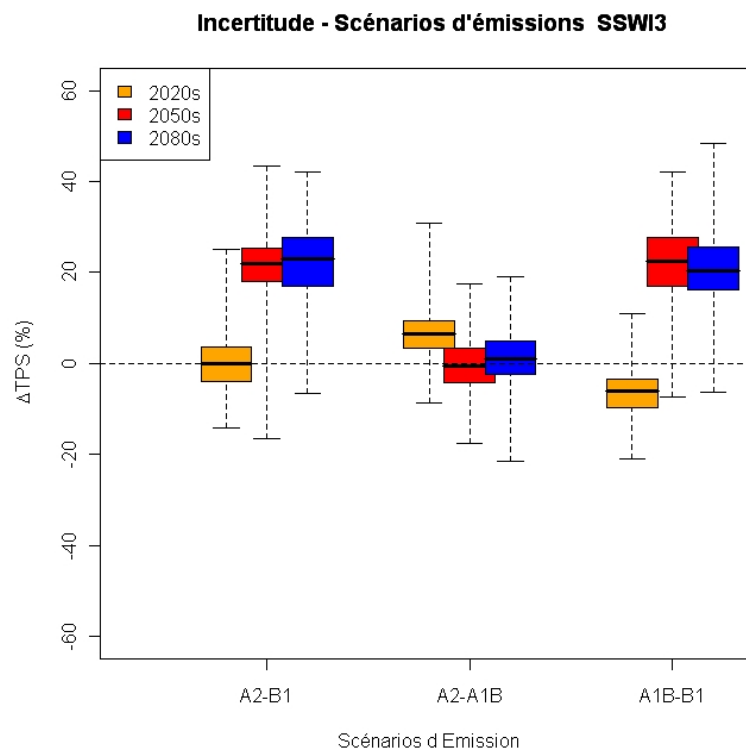


Figure 8-3 Diagramme en boîtes (valeur minimale, 1^{er} quartile, médiane, 3^e quartile et maximale) sur des périodes d'évolution au cours du XXI^e siècle pour les écarts de temps passé en sécheresse (TPS) agricole sur 3 mois (SSWI3) en fonction des trois scénarios climatiques B1, A1B, A2 d'ArpegeV4.6, désagrégées par la méthode type de temps (TT).

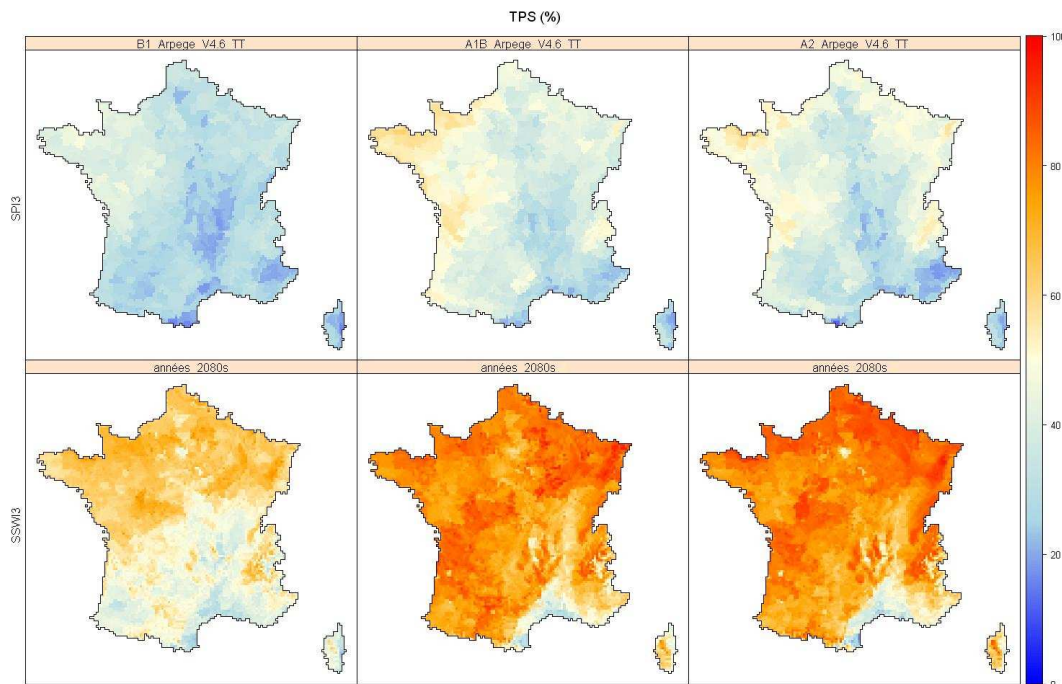
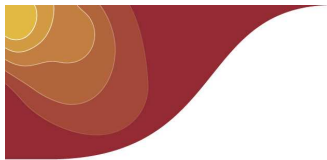


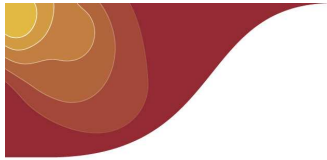
Figure 9-3 Répartition spatiale du temps passé en sécheresse (TPS) pour les années 2080s avec les trois scénarios climatiques B1, A1B, A2 d'ArpegeV4.6, désagrégées par la méthode type de temps (TT).

3.3 Incertitudes sur les méthodes de descente d'échelle

Pour l'illustration des incertitudes sur les méthodes de descente d'échelle, les données du modèle Arpège V4.5, scénario A2, méthodes de descente d'échelle type de temps (TT) et quantile-quantile (QQ) sont utilisées. Les champs de précipitations obtenus avec les deux méthodes de descente d'échelle ont fait l'objet d'une validation scientifique (Quintana-Seguí et al., 2009). Comme précédemment, la comparaison portera sur l'évolution temporelle de la superficie des sécheresses (figures 10-3 et 11-3) ainsi que leur répartition spatiale (figure 12-3).

Les figures 10-3 et 11-3 mettent en évidence une aggravation progressive des superficies touchées par les sécheresses débutant au milieu du siècle (période 2050s) et plus marquée pour les sécheresses agricoles. Les différences entre les résultats des deux méthodes de descente d'échelle ne sont sensibles que pour l'évaluation des sécheresses agricoles et principalement à la fin du siècle, avec une fréquence nettement plus forte issue de la méthode TT (médiane de 60% au lieu de 40%).

Sur la figure 12-3 à l'horizon 2050, on trouve peu de différences sur les données SPI3 entre les deux méthodes de descente d'échelle. Pour le SSW13, les données désagrégées par la méthode TT produisent de plus longues sécheresses agricoles que les données obtenues par la méthode QQ, avec un caractère régional marqué sur l'ensemble du relief, mais aussi le Sud Ouest et le Nord de la France. Il est important de noter également que les incertitudes ont une évolution temporelle au cours du siècle. La figure 13-3 montre que la distribution spatiale des



écarts entre le SSWI3 sur la France issu des deux méthodes différentes de descente d'échelle croît régulièrement au cours du siècle.

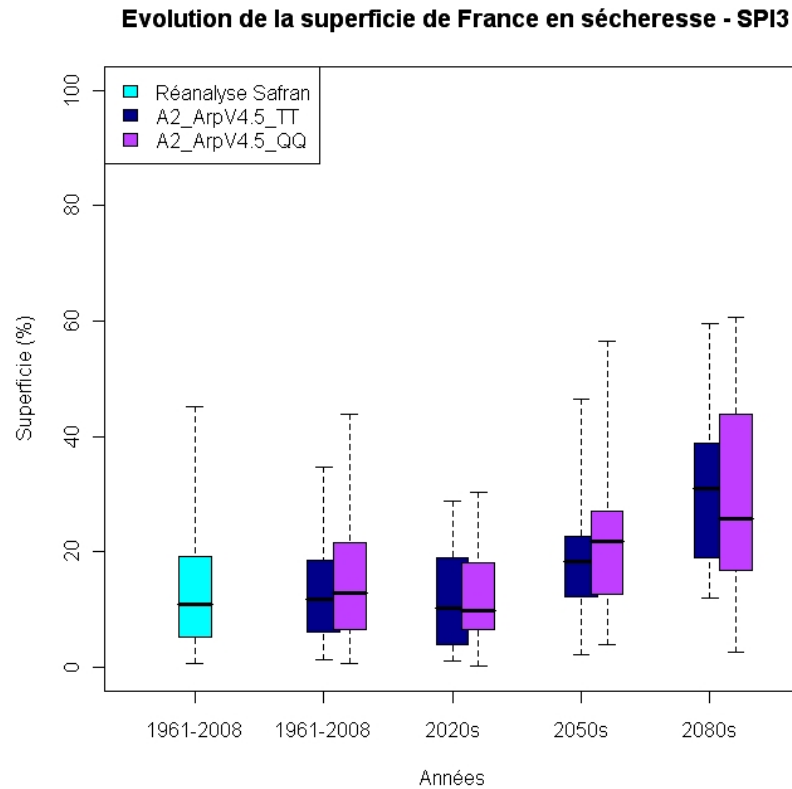
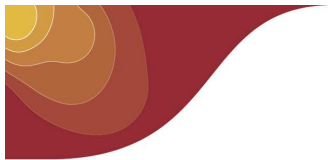


Figure 10-3 Diagramme en boîtes (valeur minimale, 1^{er} quartile, médiane, 3^e quartile et maximale) sur des périodes d'évolution entre 1961 et 2100 de la superficie affectée par des sécheresses météorologiques (SPI3), modérées à extrêmes, sur la France (seuil 16%) en fonction des deux méthodes de descente d'échelle – type de temps (TT) et quantile-quantile (QQ), appliquées sur les données de modèle ArpegeV4.5, scénario climatique A2.



Evolution de la superficie de France en sécheresse - SSWI3

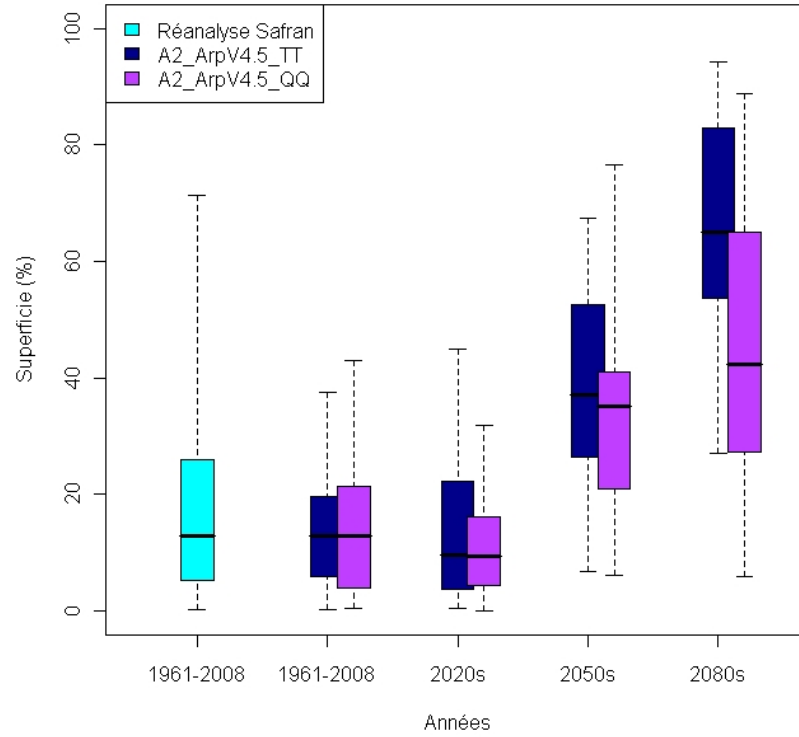


Figure 11-3 Même graphique que le 10-3 pour les sécheresses agricoles sur 3 mois (SSWI3).

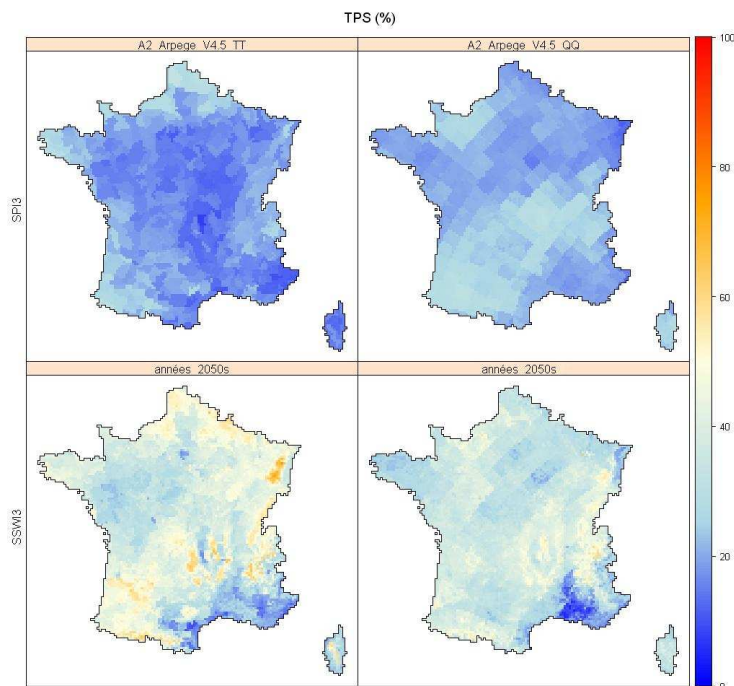


Figure 12-3 Répartition spatiale du temps passé en sécheresse (TPS), selon le SPI et le SSWI, intégré sur 3 mois, du modèle ArpegeV4.5, scénario climatique A2, méthodes de descentes d'échelle type de temps (TT) et quantile-quantile (QQ) à l'horizon 2050.

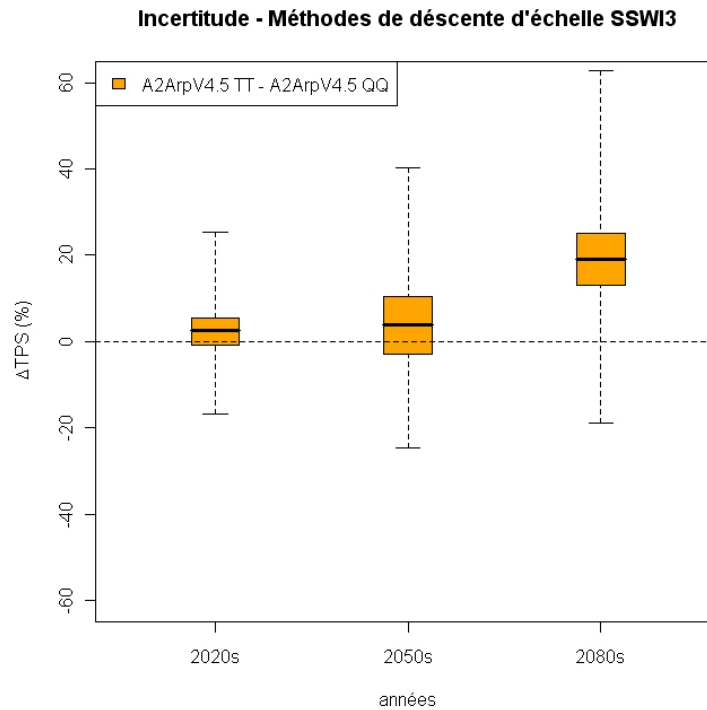
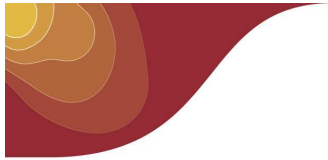
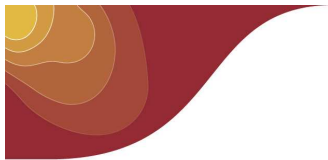


Figure 13-3 : Diagramme en boîtes (valeur minimale, 1^{er} quartile, médiane, 3^e quartile et maximale) sur des périodes d'évolution au cours du XXI^e siècle pour les écarts de temps passé en sécheresse agricole sur 3 mois (SSWI3) issu des méthodes QQ et TT.



3.4 Évaluation comparative des sources d'incertitude

Sur la période du milieu du XXI^e siècle, on dispose simultanément des jeux de données pour la comparaison de 6 modèles climatiques, de 3 scénarios socio-économiques et de 2 méthodes de descente d'échelle. À partir de la comparaison des dispersions spatiales entre les modèles (A1B_ArpegeV4.6_TT - A1B_MM), les scénarios climatiques (A2_ArpegeV4.6_TT - A1B_ArpegeV4.6_TT - B2_ArpegeV4.6_TT) et les méthodes de descente d'échelle (A2_ArpegeV4.5_QQ - A2_ArpegeV4.5_TT) présentée sur les figures 14-3 et 15-3, on peut essayer de comparer le poids relatif de ces différentes sources d'incertitudes, exprimées à travers le TPS météorologique et agricole.

On note que c'est l'incertitude liée aux méthodes de descente d'échelle qui semble la plus réduite au milieu du XXI^e siècle. Par contre l'incertitude des modèles climatiques (ici Arpège et la moyenne du multi modèle - boîte rose) est du même ordre de grandeur que celle liée aux scénarios de concentration entre A2, A1B ou B1 (boîte rouge et orange). Les résultats sont relativement comparables pour les sécheresses météorologiques et agricoles malgré une augmentation globale d'un facteur 2 des incertitudes liées aux sécheresses du sol.

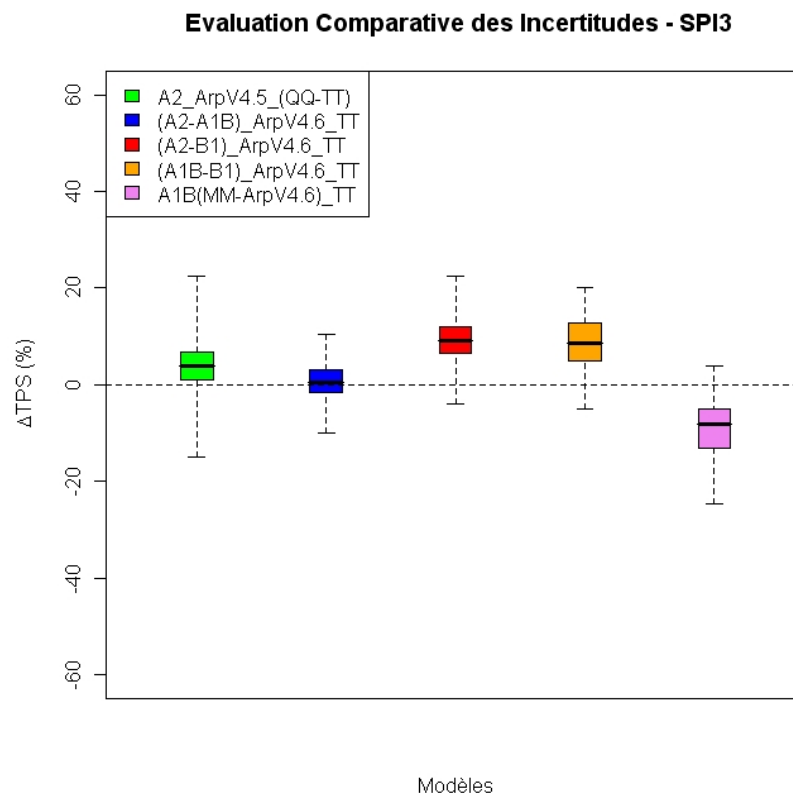


Figure 14-3 Diagramme en boîtes sur le TPS (valeur minimale, 1^{er} quartile, médiane, 3^e quartile et maximale) pour les sécheresses météorologiques sur 3 mois (SPI3) sur la France.

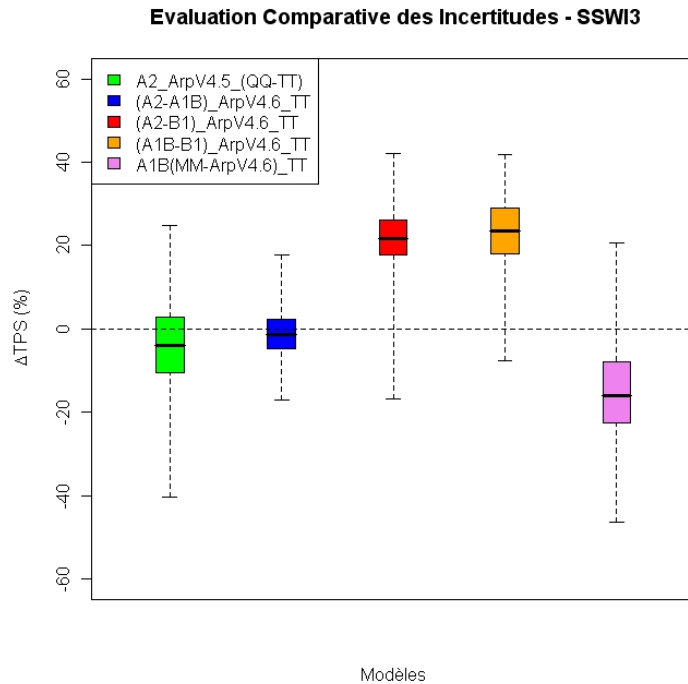
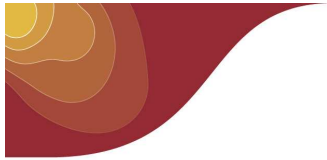


Figure 15-3 Même graphique que le 14-3 pour les sécheresses agricoles sur 3 mois (SSWI3).

3.5 Évolution saisonnière des sécheresses

On a caractérisé jusqu'à présent les évolutions spatio-temporelles des sécheresses de manière globale au cours de l'année, en ne distinguant que la durée des événements : les sécheresses courtes avec un indice cumulé sur 3 mois et les sécheresses longues sur 12 mois. L'intensité moyenne des sécheresses selon la période de l'année où elles se produisent, a une grande influence sur les impacts pour les écosystèmes et les activités économiques, agricoles notamment. À partir du modèle ARPEGE V4.6 scénario A2, les figures 16-3 et 17-3 présentent une cartographie moyenne sur 30 ans des indices SPI3 et SSWI3 pour les mois de février, mai, août et novembre au cours du XXI^e siècle, représentant respectivement les sécheresses hivernales, printanières, estivales et automnales (car intégrées sur les 3 mois concernant la saison)

Pour les sécheresses météorologiques, on note :

- aucune évolution sensible, quelle que soit la saison jusqu'en 2050 ;
- en fin de siècle, les sécheresses estivales s'aggravent quasiment sur l'ensemble du pays, alors que l'augmentation des sécheresses hivernales ne concernent que le Sud Ouest du pays, et les sécheresses automnales la façade Ouest ;
- pas d'évolution des sécheresses printanières même en fin de siècle.

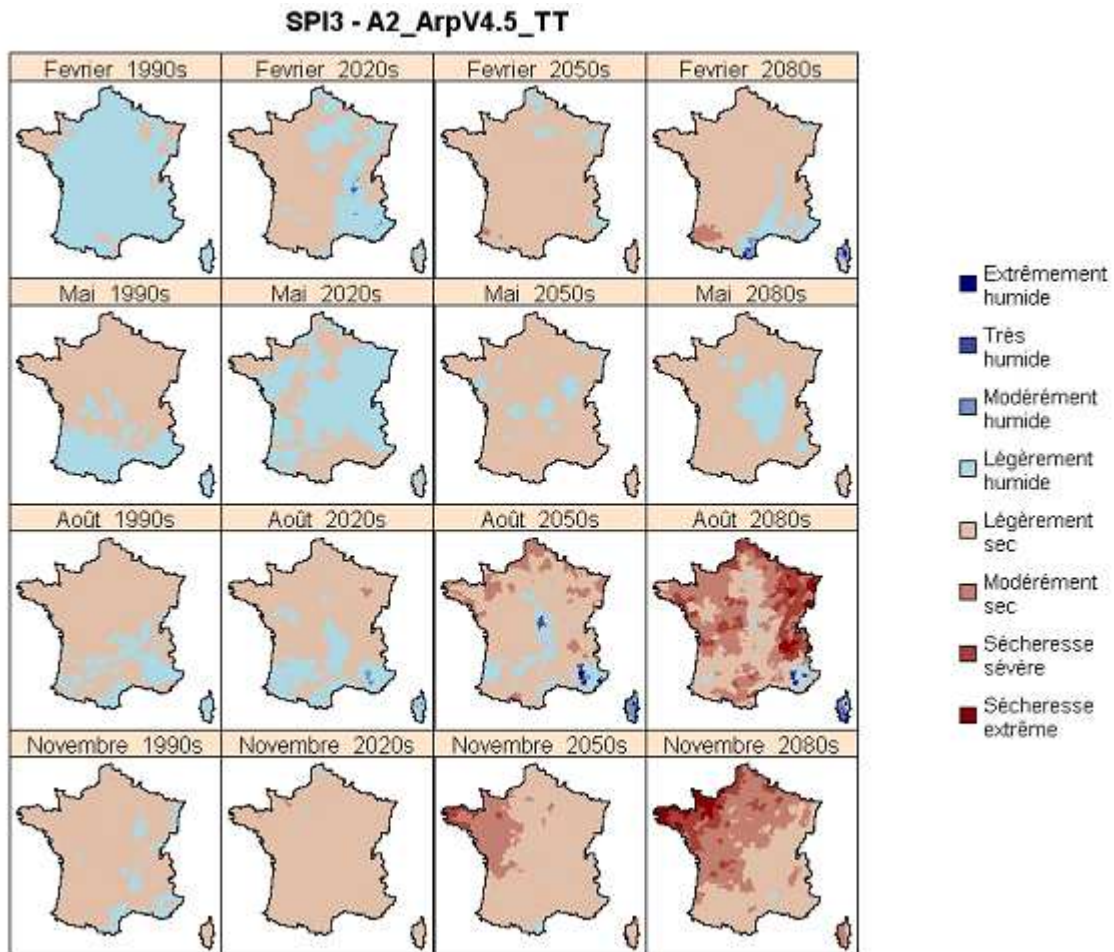
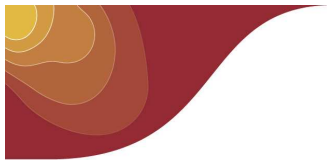


Figure 16-3 Évolution temporelle des sécheresses SPI3 au cours du XXI^e siècle selon les saisons (février=hiver, mai=printemps, août=été, novembre=automne) à partir des projections Arpège V4.6 scénario A2, méthode de descente d'échelle types de temps.

Le diagnostic établi pour les sécheresses agricoles est par contre bien différent :

- l'aggravation des sécheresses au cours du XXI^e siècle est continue et concerne toutes les saisons, y compris la période proche centrée autour de 2020 ;
- en 2050, l'aggravation la plus sensible sur le pays concerne les sécheresses printanières, à l'exception des Alpes du Nord du fait vraisemblablement d'une fonte plus précoce du manteau neigeux ;
- En fin de siècle, les sécheresses extrêmes printanières et estivales prédominent dans la plupart des régions, à l'exception des régions méditerranéennes ainsi que des Alpes du Nord mais seulement au printemps ; les sécheresses hivernales extrêmes et à un degré moindre les sécheresses automnales sont plus fortes sur la moitié nord ;

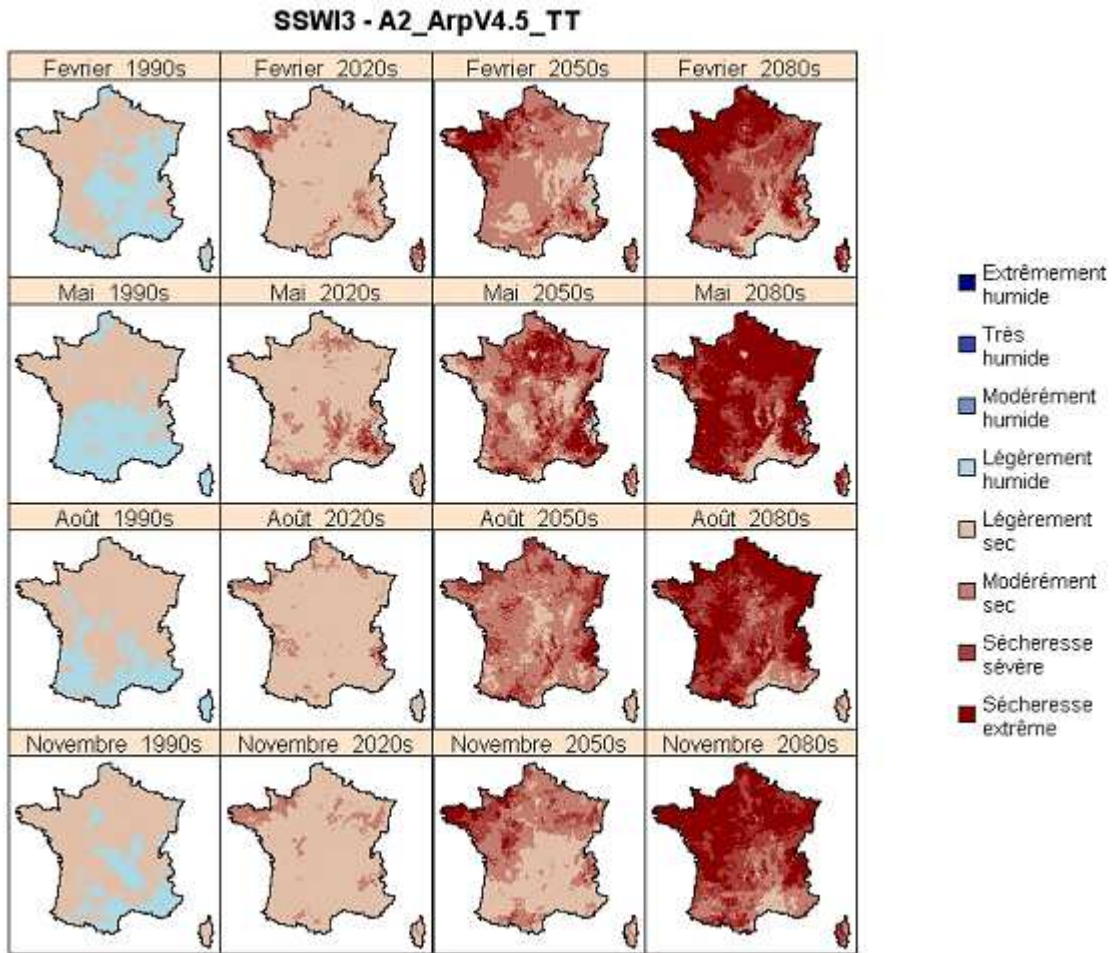
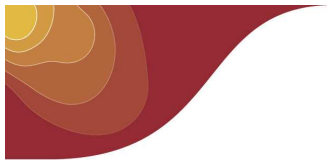
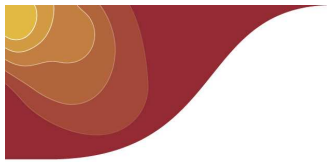


Figure 17-3 Évolution temporelle des sécheresses SWI3 au cours du XXI^e siècle selon les saisons (février=hiver, mai=printemps, août=été, novembre=automne) à partir des projections Arpège V4.6 scénario A2, méthode de descente d'échelle types de temps.



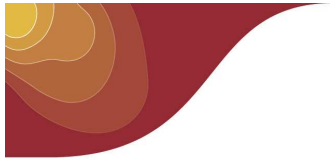
Chapitre 4: Evolution attendue des sécheresses

L'évolution des sécheresses en métropole au cours du XXI^e siècle, étudiée à partir des différentes projections climatiques, montre de grandes cohérences dans leur déroulement temporel, malgré des différences régionales sur leur intensité :

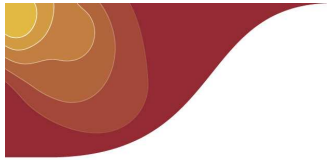
- Pour le premier tiers du siècle (années 2020s), il n'y a pas de changement annoncé pour les sécheresses météorologiques et l'aggravation des sécheresses agricoles restent à confirmer avec des différences selon les simulations climatiques utilisées (Arpège 4.5 ou 4.6) : voir notamment figures 5-3 et 6-3 relatives aux sécheresses météorologiques et agricoles sur 3 mois ainsi que les figures 2-2 et 3-2 sur la maille de Toulouse.
Les sécheresses agricoles longues (SSWI12) pourraient évoluer un plus vite que les sécheresses courtes (SSWI3) (voir figure 7-3).
- Au milieu du siècle (années 2050s), des évolutions très significatives commencent à concerner les sécheresses agricoles (sur 3 mois et encore plus nettement sur 12 mois) malgré une évolution peu sensible du régime pluviométrique (voir figures 2-3). Des sécheresses inhabituelles en termes d'expansion spatiale ou d'intensité pourraient apparaître : une sécheresse, telle qu'observée en 1990 pour le SWI3 ou le SWI, pourra être fréquemment dépassée. Les projections climatiques indiquent que certaines régions, et notamment les zones montagneuses, du fait des probables modifications du régime nival, pourraient connaître les premières, des sécheresses du sol plus longues (voir figure 3-3).
- A la fin du siècle (années 2080s), des sécheresses météorologiques plus fortes apparaissent également, notamment en été et automne (voir figure 16-3). Des événements de type 1976 dans la réanalyse sont alors fréquemment dépassés (figure 5-3). La situation est pire sur le plan des sécheresses agricoles. Il y a une grande probabilité qu'une grande partie du territoire connaisse de très longues sécheresses du sol quasiment sans retour à la situation normale, définie par le climat actuel : voir figures 6-3 et figures 7-3. Cette assèchement du sol en moyenne se retrouve en toute saison (voir figures 17-3)

Dans ce scénario temporel (particulièrement inquiétant), on peut souligner d'abord l'évolution plus rapide et plus forte des sécheresses du sol par rapport aux sécheresses météorologiques, sous l'effet probable de l'augmentation de l'évaporation (liée à la température). Cet élément semble prépondérant dans la compréhension des changements du cycle hydrologique au XXI^e siècle et rend inadaptée la prise en compte des seules précipitations comme variable explicative pour décrire l'évolution des sécheresses.

Le deuxième point général concerne le caractère non-linéaire des changements attendus au cours du siècle. L'accentuation rapide des sécheresses dans la seconde moitié du XXI^e siècle est également un élément essentiel de l'évolution de ce phénomène qui devra être prise en compte dans la réflexion sur l'adaptation. Cette non-linéarité est également combinée à une augmentation de la variabilité (écart d'une année à l'autre) des sécheresses.



Enfin, la caractérisation spatiale des projections suggère une aggravation particulière des sécheresses dans les régions connaissant actuellement les sols plus humides en moyenne, comme les régions du Nord de la France ainsi que les zones de montagne. Ce constat, qui pourra avoir des conséquences importantes sur les écosystèmes, confirme que les changements climatiques à venir dans le domaine de la ressource en eau, pourront concerner l'ensemble du territoire.



Références bibliographiques

Albergel, C., RÄudiger, C., Pellarin, T., Calvet, J.-C., Fritz, N., Froissard, F., Suquia, D., Petitpa, A., Pignat, 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, no 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° 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.

Bellocq, A. (1979), La sécheresse de l'automne 1978 en France - Aspect pluviométrique. *La Météorologie*, vol. 16, p. 229-256.

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.

Boé, J., Terray, L., Martin, E. et Habets, F. (2009), Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. *Water Resources Research*, vol. 45, n° 8, W08426.

Bréda, N. et Badeau, V. (2008), Forest tree responses to extreme drought and some biotic events: Towards a selection according to hazard tolerance? *Compte Rendus Géosciences*, vol. 340, n° 9-10, p. 651-662.

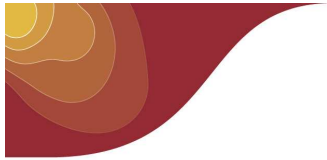
Caballero Y., Morel S., Habets F., Noilhan J, Le Moigne P., Lehenaff A., Boone A., 2007, Hydrological sensitivity of the Adour Garonne river basin to climate change, *Water Resources Research*, **43**, W07448

Choisnel, E (1977) Le bilan hydrique et le bilan d'énergie du sol, *La Météorologie*, pp.103–159

Dai, A. (2010), Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) during 1900-2008, *J. Geophys. Res.*, DOI:10.1029/2010JD015541, in press

Dai, A. (2011), Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, [Volume 2, Issue 1](#), pages 45–65, January/February 2011

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) 16-26. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.11.030



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. 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.

Direction de la Météorologie Nationale, D. (1961), Résumé mensuel du temps en France - Mars 1961. *Rap. tech.*, Direction de la Météorologie Nationale.

Ducharne, A., Habets, F., Déqué, M., Evaux, L., Hachour, A., Lepaillier, A., Lepelletier, T., Martin, E., Oudin, L., Pagé, C., Ribstein, P., Sauquet, E., Thiéry, D., Terray, L., Viennot, P., Boé, J., Bourqui, M., Crespi, O., Gascoin, S., Rieu, J., 2009: [Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme](#). *Rapport final du projet RExHySS. Programme GICC*. 62 pp

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.

Garnier E, 2010, Bassesses extraordinaires et grandes chaleurs. 500 de sécheresses et chaleurs en France et dans les pays limitrophes, *La Houille Blanche*, 4 –2010, pp26-42, DOI 10.1051/LHB/2010039

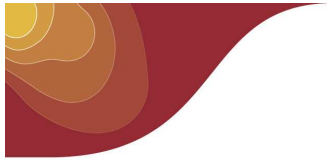
Habets, F., Boone, A., Champeaux, J.-L., Etchevers, P., Franchistéguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Le Moigne, P., Martin, E., Morel, S., Noilhan, J., Quintana Segui, P., Rousset-Regimbeau, F. et Viennot, P. (2008), The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, p. D06 113.

Habets, F., Noilhan, J., Golaz, C., Goutorbe, J.-P., Lacarruere, P., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Otlé, 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., Lacarruere, P., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Otlé, 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, n° 1-2, p. 97-118.

Habets F., 2011, Etude de la ressource en eau: de l'hydrométéorologie à la modélisation intégrée des hydrosystèmes, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, tel-00568005, version

1



Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson, 2001: *Climate Change 2001 : The Scientific Basis*, Cambridge, Cambridge University Press, 881pp.

Larivière, G. (1985), La sécheresse en France en septembre 1985. *La Météorologie*, vol. 10, p. 54.

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, ed.), 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, n° 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.

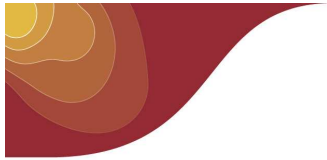
Mérillon, Y. et Chaperon, P. (1990), La sécheresse de 1989. *La Houille Blanche*, n° 5, p. 325-339.

Météo-France (1997), Bulletin Climatique Avril 1997. *Rap. tech.*, Météo-France.

Moisselin, J.-M., Schneider, M., Canellas, C. et Mestre, O. (2002), Les changements climatiques en France au XXe siècle. *La Météorologie*, vol. 38, p. 45-56.

Moisselin, J.-M., Dubuisson, B., (2006), Evolution des extrêmes de températures et de précipitation en France au XXe siècle. *La Météorologie*, vol. 54, p. 33-42.

Nakićenović, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Gräubler, A., Jung, T. Y., Kram, T., La Rovere, E. L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N. et Dadi, Z. (2000), *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press.



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.

OMM (2009), Press release N°872, Experts agree on a universal drought index to cope with climate risks, http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_872_en.html

Pagé, C., L. Terray et J. Boé, 2009, Dsclim: a software package to downscale climate scenarios at regional scale using a weather-typing based statistical methodology. *Technical Report TR/CMGC/09/21*, SUC au CERFACS, URA CERFACS/CNRS No1875, Toulouse, France.

Pagé, C., L. Terray et J. Boé, 2008: Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08. *Technical Report TR/CMGC/08/64*, SUC au CERFACS, URA CERFACS/CNRS No1875, Toulouse, France.

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, n° 12, p. 1415-1424.

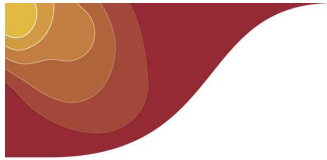
Pellarin, T., Calvet, J.-C. et Wagner, W. (2006), Evaluation of ERS scatterometer soil moisture products over a half-degree region in southwestern France. *Geophysical Research Letters*, vol. 33, p. L17 401.

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., Canellas, 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, n° 1, p. 92-107.

Quintana Seguí, P., Ribes, A., Martin, E., Habets, F. et Boé, J. (2009), Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. *Journal of Hydrology*, sous presse.

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, eds.), 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. D24 108.

Sheffield, J. et Wood, E. F. (2007), Characteristics of global and regional drought, 1950-2000: Analysis of soil moisture data from o[®]-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, n° 1, p. 79-105.

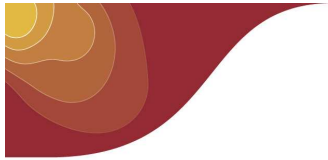
Somot, S., Sevault, F., Déqué, M. et Crépon, M. (2008), 21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled atmosphere-ocean regional climate model. *Global and Planetary Change*, vol. 63, n° 2-3, p. 112-126.

Soubeyroux, J.-M., Martin, E., Franchist'eguy, L., Habets, F., Noilhan, J., Baillon, M., Regimbeau, F., Vidal, J.-P., Le Moigne, P., and Morel, S. (2008), Safran-Isba-Modcou (SIM) – Un outil pour le suivi hydrométéorologique opérationnel et les études, *La Météorologie*, 63, 40-45

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., Dragosavac, 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. (2009), Variabilité spatio-temporelle de l'humidité du sol et des sécheresses en France. *Rapport intermédiaire du projet ClimSec*, CNRM/GAME.

Vidal, J.-P. et Wade, S. D. (2009), A multimodel assessment of future climatological droughts in the UK. *International Journal of Climatology*, 29(14), 2056-2071. DOI : 10.1002/joc.1843



Vidal, J.-P., Martin, E., Baillon, M., Franchistéguy, L. et Soubeyroux, J.-M. (2010a), SAFRAN 50-year high-resolution meteorological reanalysis over France. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1627–1644. DOI : 10.1002/joc.2003

Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Habets, F., Soubeyroux, J.-M., Blanchard, M. et Baillon, M. (2010b), Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(3), 459-478. DOI : 10.5194/hess-14-459-2010

Vincente-Serrano, S.M., S. Begueria and J.I. Lopez Merrano (2010), A multiscale drought index sensitive to global warming : The standardized precipitation evaporation index, *J Climate*, 23, 1696-1718.

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.