

# **Observations et projections climatiques à l'échelle de la France :**

## **l'exemple de la ressource en eau**

G. Pigeon<sup>1</sup>, J.-M. Soubeyroux<sup>1</sup>, M. Déqué<sup>2</sup>

1 : Météo France, 42, av. Coriolis, F-31057 Toulouse cedex ; gregoire.pigeon@meteo.fr

2 : Centre National de Recherches Météorologiques - GAME, Météo-France et CNRS, 42, av. Coriolis, F-31057 Toulouse cedex

### **Résumé**

A l'échelle française, on observe une hausse de la température moyenne de l'ordre de 1°C sur le siècle passé, phénomène plus marqué dans le sud-ouest du pays. Si les précipitations annuelles ne présentent pas de tendance statistiquement significative, on note en revanche une baisse des précipitations hivernales sur la moitié sud et la Corse. On modélise également un assèchement généralisé des sols français sur les cinquante dernières années, marqué plus nettement en hiver et dans la moitié sud du pays. La compréhension des influences humaines sur les variations du climat a été améliorée au fil des travaux du GIEC, ce qui conduit à une très grande confiance dans le fait que les émissions de gaz à effet de serre sont à l'origine du réchauffement. Les projections climatiques pour le XXI<sup>e</sup> siècle sont basées sur des modèles numériques qui reproduisent les écoulements atmosphériques et des scénarios d'émissions des gaz à effet de serre. Les tendances obtenues pour la France sont un réchauffement significatif des températures et une diminution des précipitations. En termes de ressource en eau pour la végétation, une intensification des sécheresses des sols superficiels est à attendre notamment dans les régions les plus humides aujourd'hui.

## 1. Introduction

Les scientifiques définissent le climat comme la représentation statistique des variables météorologiques sur une période conventionnelle de 30 ans, selon la définition de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM). On appelle climat de référence, les moyennes, variances, quantiles des quantités observées sur la période 1961-1990 selon un protocole rigoureusement défini. Cette définition n'exclut pas que sur un siècle le climat puisse évoluer, mais ne permet pas d'appeler « changement de climat » des changements d'une année ou d'une décennie sur l'autre. Les mesures faites au cours du 20<sup>e</sup> siècle montrent que le climat a changé en de nombreuses régions du globe dont la France, se traduisant en particulier par une augmentation indéniable de la température. En 2011, ce climat de référence appartient désormais au passé, mais est un point de départ obligé de toute évaluation du changement climatique.

La question du climat du 21<sup>e</sup> siècle est devenue un enjeu important depuis deux décennies. Les causes du réchauffement du 20<sup>e</sup> siècle, à savoir l'augmentation de concentration en gaz à effet de serre ont peu de raisons, à moins de bouleversement historique ou technologique, de disparaître ou même de s'atténuer. L'estimation des changements climatiques passe par l'utilisation de modèles numériques qui reproduisent l'écoulement atmosphérique. Les sorties de ces modèles sont comparées aux observations pour les périodes du passé et les résultats des périodes futures sont analysés en comparaison avec cette même période de référence. Même si le mot « futur » est employé il faut toujours comprendre « futur possible » et non « futur prévu ».

La France est particulièrement concernée par le risque d'augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses. Les études menées jusqu'à présent se sont surtout focalisées sur l'évolution des précipitations ou le débit des rivières. Le projet ClimSec<sup>1</sup> a complété cette analyse par une étude de l'évolution passée et future des réserves en eau des couches superficielles des sols en mettant l'accent sur les évolutions attendues à la fin du siècle mais aussi aux échéances proches. 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 potentielle (ETP), est une des originalités de cette étude. Ce modèle, ISBA (Interaction sol-biosphère-atmosphère), est continûment enrichi depuis 30 ans et confronté à des mesures terrain lorsqu'elles sont disponibles (campagnes de mesures principalement). Il simule les échanges d'eau et de chaleur entre le sol et l'atmosphère et représente le ruissellement et l'infiltration dans le sol en fonction de sa nature et des précipitations. Il en déduit la température et l'humidité à plusieurs niveaux dans le sol (couche superficielle, couche racinaire, couche profonde). Ces calculs tiennent également compte du type de végétation (forêt, prairie, culture...).

La première partie de cet article présente les évolutions observées pour la température et la sécheresse sur le siècle passé alors que la seconde se concentre sur les projections climatiques de ces mêmes indicateurs sur le 21<sup>e</sup> siècle, régionalisés sur la France, et les principales incertitudes associées.

## 2. L'évolution du climat au cours du 20<sup>e</sup> siècle

### 2.1. Evolution des températures

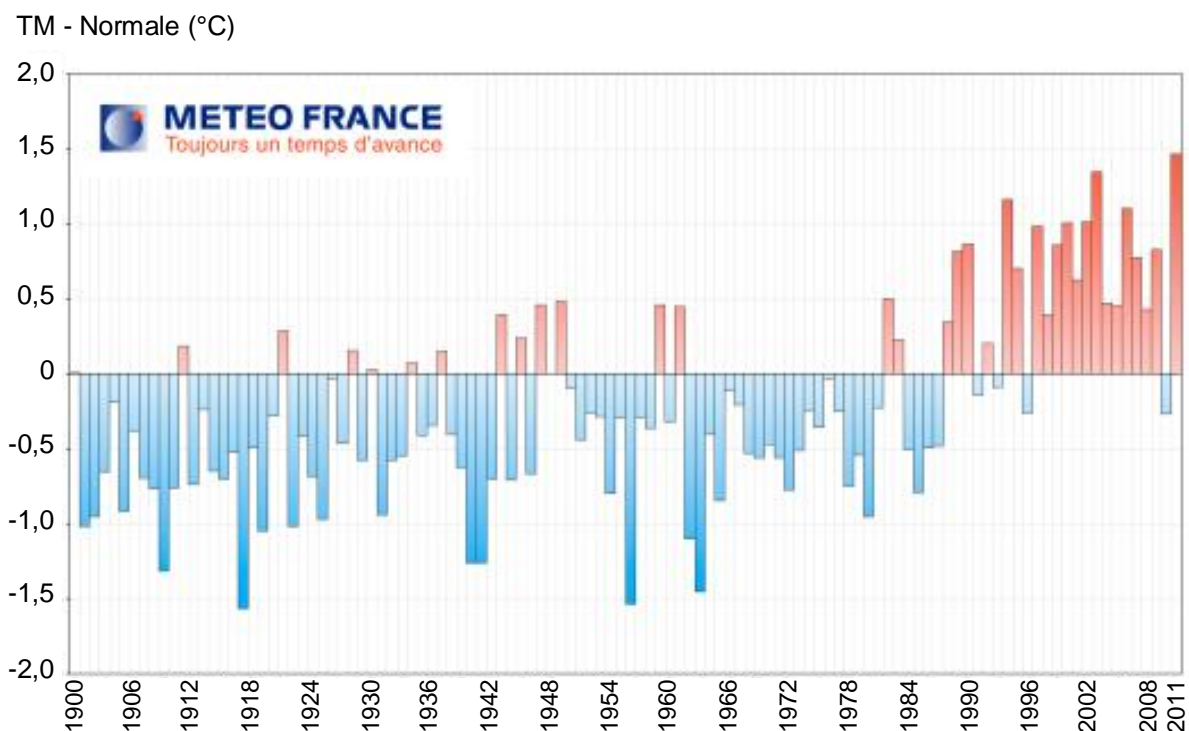
En un siècle (1906-2005), la température moyenne à la surface de la Terre a augmenté d'environ 0,74°C, avec une augmentation par décennie de 0,13°C (à 0,03°C près) au cours des 50 dernières années. Grâce à l'analyse de données de températures recueillies par le réseau météorologique français, Météo-France a pu reconstituer une carte de tendance de température moyenne sur l'ensemble du 20<sup>e</sup> siècle. Les données ont été corrigées des possibles biais de mesure dus aux changements de capteurs ou aux modifications de son environnement proche par un traitement statistique. L'augmentation des températures en France au cours du 20<sup>e</sup> siècle est de l'ordre de 1°C. Le réchauffement est légèrement plus marqué sur le sud que sur le nord du pays. La température a davantage augmenté en fin de nuit (température minimale) que le jour (température maximale). Les 10 années les plus chaudes du siècle sont toutes postérieures à 1988. Dans la Figure 1, l'évolution

---

<sup>1</sup> Projet CLIMSEC (2008-2011) , mené par Météo-France, avec le soutien de la Fondation MAIF, rapport disponible en ligne : <http://www.cnrm-game.fr/projet/climsec>

de la température moyenne annuelle sur la France métropolitaine est représentée sous forme d'écart à la moyenne de la période 1971 à 2000. Le réchauffement des températures moyennes est très net. Jusqu'au milieu des années 1980, l'écart est le plus souvent négatif : la température moyenne annuelle est le plus souvent inférieure à la moyenne de la période 1971-2000. A partir de la fin des années 80, les températures moyennes augmentent rapidement et l'écart est presque systématiquement positif. L'année 2011 se révèle être l'année la plus chaude que l'Hexagone ait connue depuis 1900. Avec une température moyenne annuelle dépassant de 1,5°C la normale, l'année 2011 détrône ainsi l'année 2003 qui détenait le précédent record avec un écart de température de +1,3°C.

**FIGURE 1 – Evolution, depuis 1900, de l'écart des températures annuelles moyennes avec la référence (période 1971-2000) en France.**



Plusieurs autres signes témoignent de ce réchauffement :

- le recul des glaciers : presque partout dans le monde, les glaciers de montagne ont reculé au 20<sup>e</sup> siècle : au Canada, dans les Alpes, en Asie et en Afrique, mais également dans les Andes et en Indonésie.

- La montée des océans : le niveau des océans est mesuré depuis deux à trois siècles par des instruments appelés marégraphes. Depuis 1992, les scientifiques disposent également de mesures depuis l'espace grâce aux satellites comme Topex-Poseidon ou Jason. Ces observations montrent que le niveau des océans s'est élevé de 12 à 22 cm au cours du 20<sup>e</sup> siècle. Cette élévation s'est accélérée depuis 1950, puisque le niveau moyen de la mer a cru de l'ordre de 1,8 mm (entre 1,3 et 2,3 mm) par an de 1961 à 2003, et encore plus rapidement de 1993 à 2003, l'élévation étant de l'ordre de 3,1 mm (entre 2,4 à 3,8 mm) par an. Cette élévation provient en premier lieu de la dilatation thermique des eaux océaniques consécutive au réchauffement planétaire et dans une moindre mesure, de la fonte des glaciers continentaux.

- Le réchauffement des régions arctiques : en moyenne sur l'Arctique, la température a augmenté deux fois plus vite que sur le reste de la planète. La surface occupée par la banquise arctique (ou glace de mer) a considérablement diminué depuis les années 50, surtout en été. Alors que la surface moyenne à la mi-septembre était de 6,5 millions de km<sup>2</sup> entre les années 1979 à 2000, elle a été enregistrée à 3,4 millions de km<sup>2</sup> en septembre 2012.

## 2.2. Evolution des sécheresses en France

### – Définition des indices de sécheresse

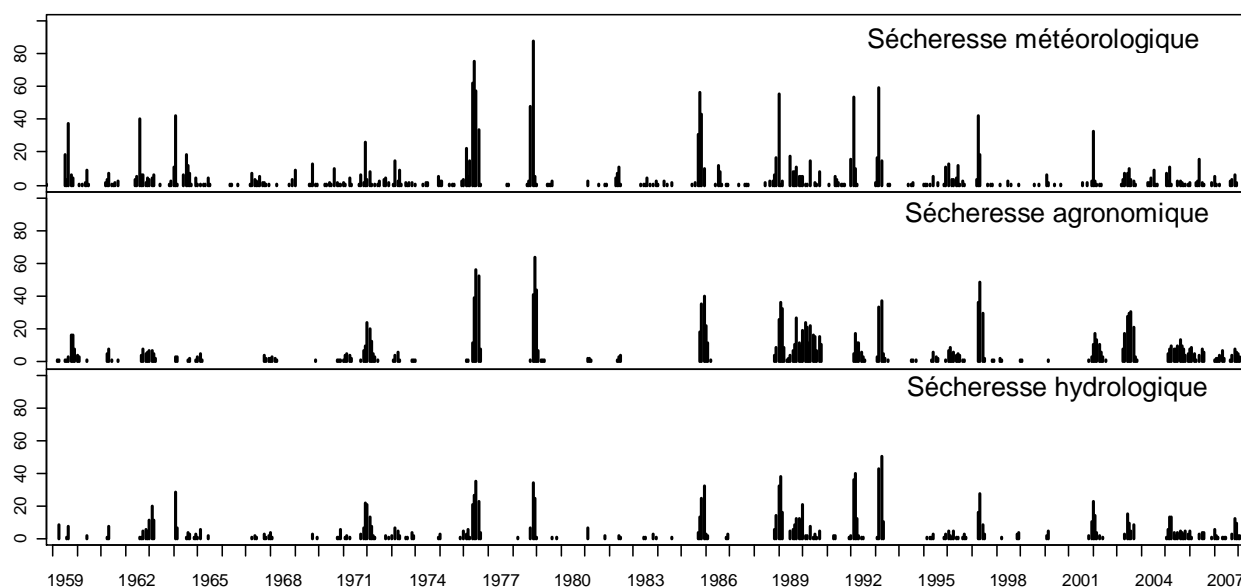
Une sécheresse est définie par l'OMM comme un déficit hydrique, lié à un manque de précipitation, sur une période prolongée. Différents types de sécheresses (météorologique, agricole, hydrologique) sont classiquement identifiés et peuvent être évalués sur différentes durées selon les domaines d'application. L'OMM a adopté en 2009 un indicateur standardisé universel, pour le suivi des sécheresses météorologiques liées au déficit de précipitations : le *Standardized Precipitation Index* (SPI). Dans le cadre du projet ClimSec (SOUBEYROUX *et al.*, 2011), trois types d'indices ont été calculés selon la même approche : le *Standardized Precipitation Index* lui-même, le *Standardized Soil Wetness Index* (SSWI) pour caractériser les sécheresses agronomiques (évaluation basée sur le contenu en eau des couches superficielles du sol) et le *Standardized Flow Index* (SFI) pour les sécheresses hydrologiques (mesure du débit des cours d'eau). Ces indicateurs ont été calculés pour la période 1958-2008 par la chaîne de modèles Safran-Isba-Modcou (SIM, respectivement modèles météorologique, sol-végétation-atmosphère et hydrologique), fruit de travaux de recherches communautaires (Météo-France, CNRS, Mines Paris Tech, IRSTEA) entrepris depuis plus de 30 années, et qui est maintenant intégrée dans la production opérationnelle quotidienne de Météo-France. Ainsi on appelle suivi hydrologique, le calcul permanent de ces indicateurs qui permettent de connaître l'état de la ressource en eau. Un tel suivi a été mis en place expérimentalement par les services opérationnels en 2011 pour le suivi national des sécheresses météorologiques et agricoles. Il a été calculé sur des profondeurs temporelles glissantes de 1 à 24 mois permettant de caractériser des sécheresses tant saisonnières qu'annuelles.

### – Evolution des sécheresses sur la période 1958-2008

L'évolution de chaque indicateur de sécheresse peut tout d'abord être examinée de manière globale sur la France en considérant la proportion du territoire affectée par la sécheresse, *i.e.* où l'indicateur est en-dessous d'un seuil donné. La Figure 2 présente l'évolution de cette surface pour les indicateurs de sécheresses météorologiques, agronomiques et hydrologiques sur une profondeur temporelle de 3 mois sur la période de 1958 à 2008. On peut ainsi identifier les périodes où la sécheresse affectait une part conséquente du territoire, par exemple l'année 1976 ou encore les trois années 1988 à 1990. Ce résultat met en avant la forte corrélation entre les déficits de chacune des composantes du cycle hydrologique, mais aussi des différences notables. On peut ainsi remarquer le déficit d'humidité du sol important et étendu durant l'année 2003 en raison des fortes valeurs

**FIGURE 2 – Superficie affectée par la sécheresse de 1958 à 2008 : sécheresses météorologique et agronomique (% de la France) ou hydrologique (% des stations).** L'échelle de temps des indices est de 3 mois et le seuil utilisé pour l'état de sécheresse correspond à une probabilité de 5% (adaptation de GARNIER, 2010).

Pourcentage de superficie de la France

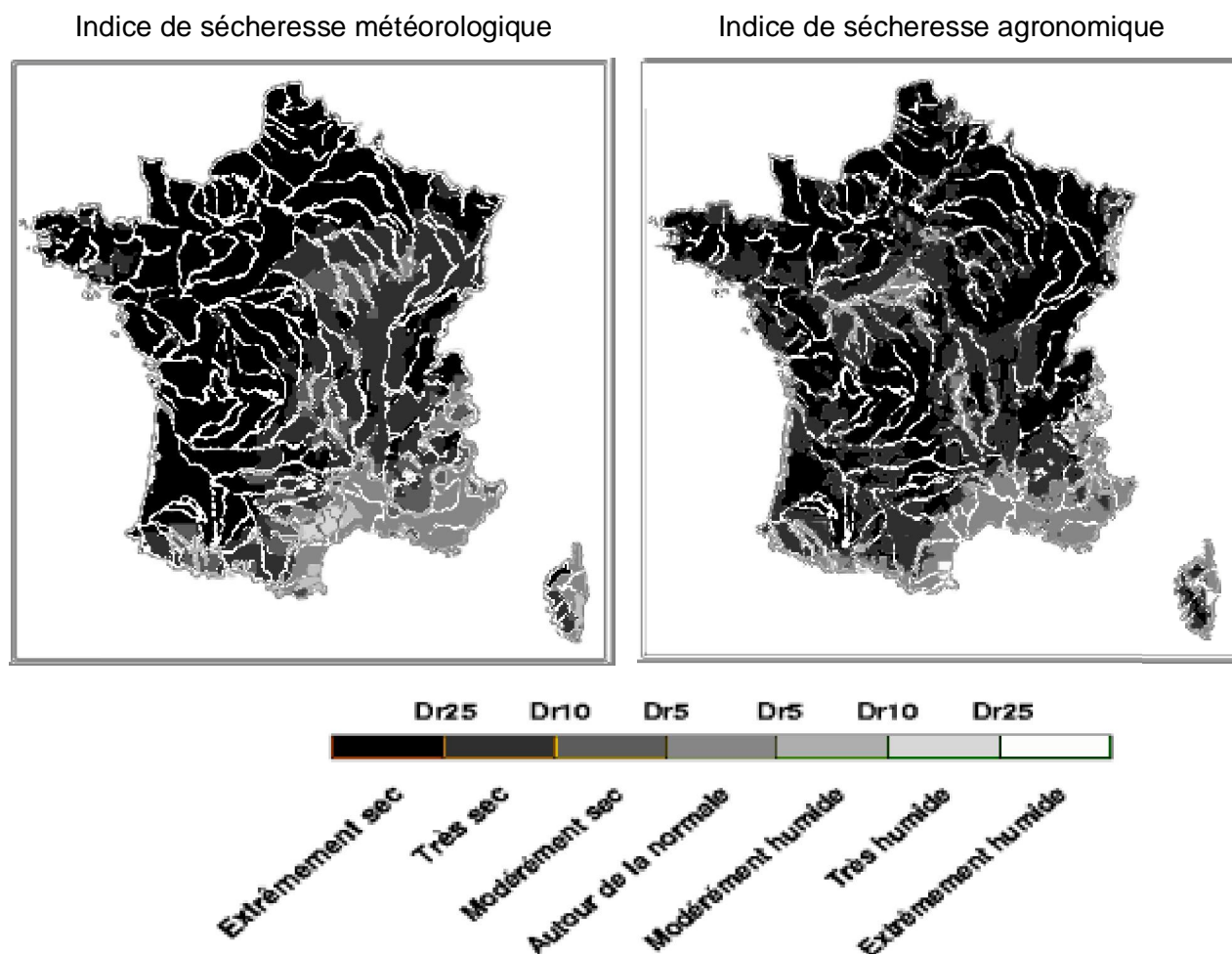


d'évapotranspiration liées aux températures élevées, sans signal équivalent en termes de précipitations. L'analyse de la série de données constituée met en évidence des tendances statistiquement significatives de l'assèchement des sols sur le pays (VIDAL *et al.*, 2010). Au cours des dernières décennies, les sols se sont asséchés en hiver et au début du printemps sur une large moitié sud et en été dans les zones de montagne. Les durées de sécheresse se sont accrues sur la Provence mais aussi les Pays de Loire, le Bassin parisien ainsi que les plaines d'Alsace et de Limagne.

### – Analyse de la sécheresse du printemps 2011

Sous l'influence persistante de conditions anticycloniques, la France a connu un printemps 2011 exceptionnellement sec et chaud. Les indicateurs de sécheresse, précédemment définis, ont été testés pour le suivi hydrologique opérationnel. La Figure 3 montre le caractère exceptionnel de la sécheresse printanière de l'année 2011 avec une « durée de retour » supérieure à 25 ans pour la composante météorologique (précipitations) et agronomique (humidité des sols superficiels) au pas de temps de 3 mois sur quasiment tout le pays à l'exception des régions méditerranéennes.

**FIGURE 3 – Cartographie de l'évolution des indicateurs de sécheresse météorologique et agronomique sur 3 mois en France (de mars à mai 2011) selon une représentation directement reliée à la probabilité d'apparition du phénomène (durée de retour, en années).**

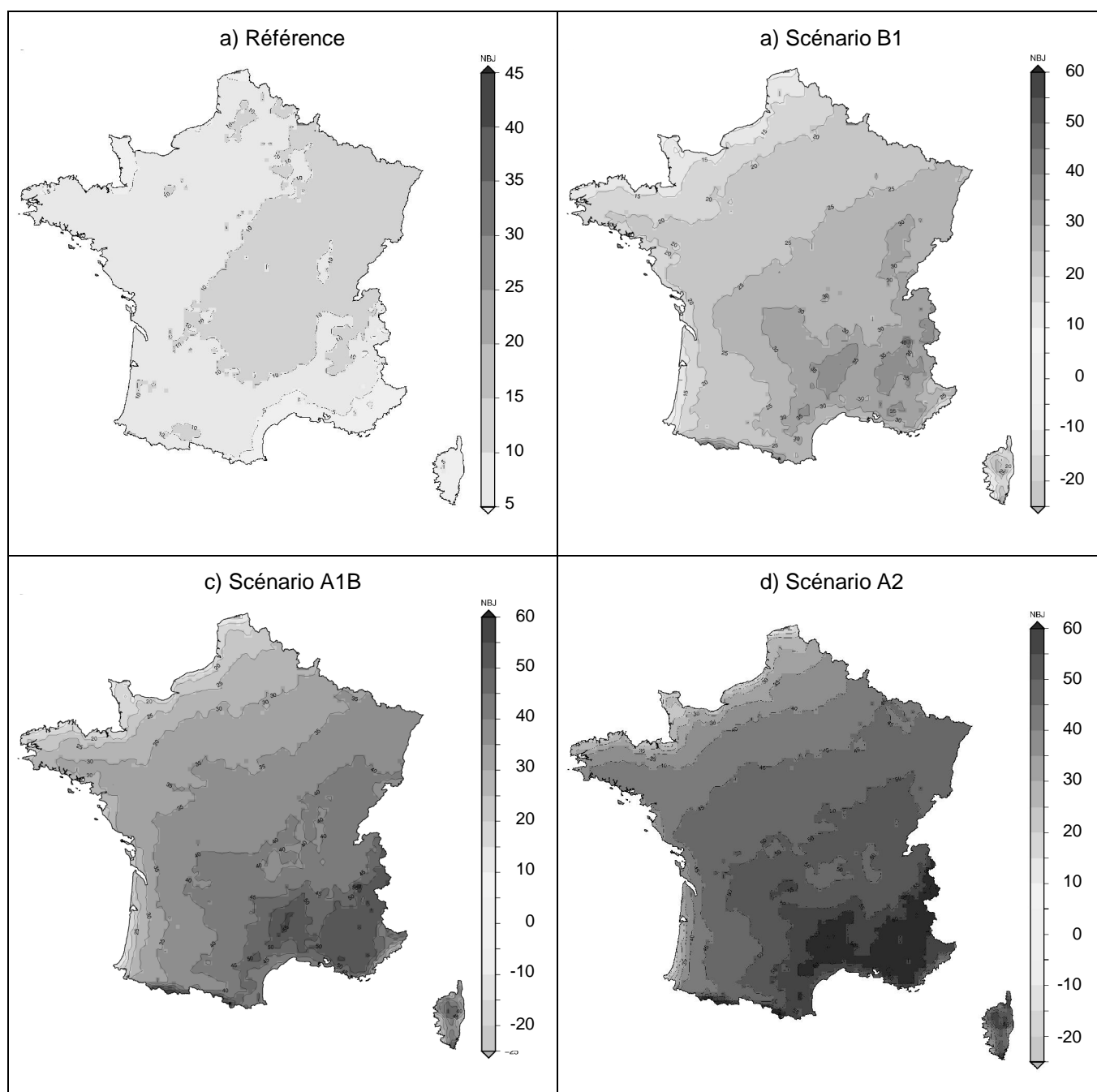


### 3. Les projections climatiques pour le 21<sup>e</sup> siècle

#### 3.1. Méthode de constitution des projections climatiques

Pour explorer les évolutions possibles du climat compatibles avec les lois des écoulements atmosphériques, on a recours à la modélisation numérique. Plusieurs centres de recherches à travers le monde mettent en œuvre de tels modèles comme en France le Centre National de Recherches Météorologiques (Météo France et CNRS), l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) et le Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement (LGGE). Par ailleurs, des scénarios socio-économiques sont nécessaires pour décrire les évolutions possibles des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère au cours du 21<sup>e</sup> siècle. Plusieurs scénarios ont été établis par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC). Dans le cadre du projet SCAMPEI

**FIGURE 4 – Evolution du nombre de jours caniculaires dans un futur lointain (années 2085) pour 3 scénarios d'émission de gaz à effet de serre avec le modèle ALADIN de Météo France (source : Drias). La carte de référence présente le nombre de jours anormalement chauds alors que les cartes pour les 3 scénarios présentent l'anomalie de ce nombre de jours en comparaison avec cette référence.**





soutenu par l'Agence National de la Recherche (<http://www.cnrm.meteo.fr/scampe/>), les 3 modèles de la communauté française ont été mis en œuvre sur la France pour 3 scénarios d'émission (A2, A1B et B1 par ordre d'intensité décroissante). Les modèles climatiques ont été utilisés sur 3 périodes de 30 ans pour reproduire à la fois le climat de référence (1961-1990) et les climats possibles au cours du 21<sup>e</sup> siècle. Les résultats de ce projet, ainsi que d'autres projections climatiques sont disponibles à travers le portail Drias-Les futurs du climat (<http://drias.meteo.fr>).

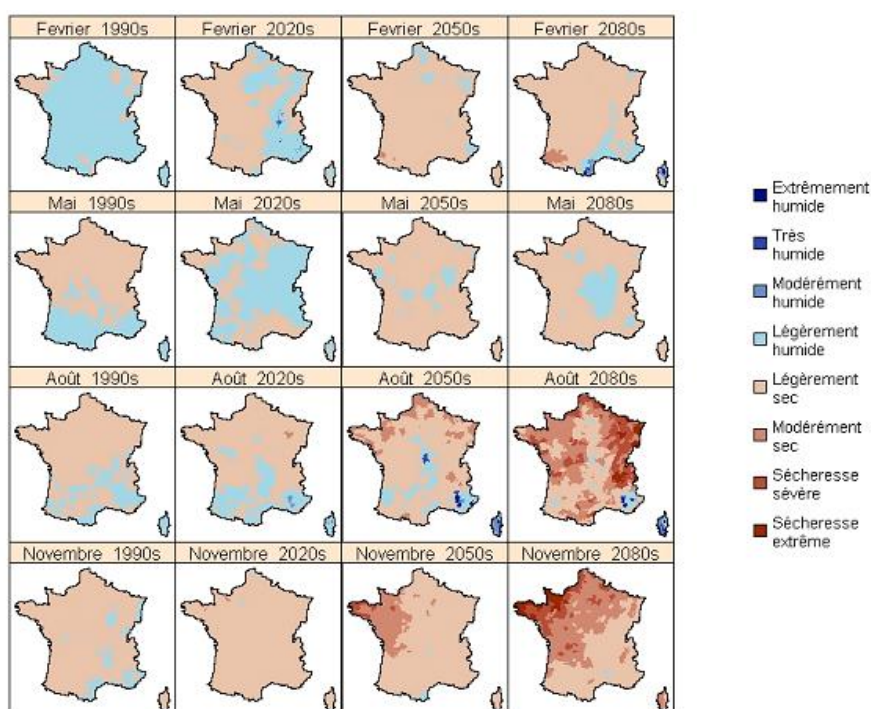
### 3.2. Evolutions des températures

Afin de caractériser les évolutions des températures, l'anomalie du nombre de jours anormalement chauds en été est présentée pour un futur lointain (2071-2100, Figure 4). Un jour est considéré comme caniculaire si la température maximale diurne dépasse d'au moins 5°C pendant plus de 5 jours consécutifs la valeur normale, calculée sur la période de référence. Quel que soit le scénario d'émission de gaz à effet de serre utilisé, le nombre de jours caniculaires tend à augmenter (DEQUE, 2007). Sur la période de référence (1961-1990), le nombre de jours anormalement chauds en été est entre 5 et 15 sur la majeure partie du territoire (Figure 4a). Dans un futur lointain, le nombre de jours moyen de canicule augmenterait de 15 à 30 dans le cas d'un scénario de faibles émissions de GES (B1) sur la majeure partie de la France (Figure 4b). Il augmenterait de 20 à 40 jours dans le cas du scénario intermédiaire (A1B, Figure 4c) et de 30 à 50 jours dans le cas du scénario d'émission le plus pessimiste (A2, Figure 4d). On remarque que les zones du Sud-Est de la France sont les plus sensibles à cette augmentation du nombre de jours de canicule.

### 3.3. Evolution des sécheresses

Afin d'évaluer l'évolution des sécheresses dans le futur, la même chaîne de modèles que celle utilisée pour établir leur climatologie sur la période 1958-2008 a été utilisée avec les projections issues des modèles climatiques pour le 21<sup>e</sup> siècle. Les indicateurs standardisés de sécheresses météorologique et agronomique précédemment cités ont été calculés et la période 1961-1990 a été choisie comme référence climatologique conformément aux travaux du GIEC. L'évolution des sécheresses en métropole au cours du 21<sup>e</sup> siècle, étudiée à partir des différentes projections climatiques, montre de grandes cohérences dans la tendance temporelle, malgré les incertitudes liées aux modèles climatiques, aux scénarios socio-économiques ou les méthodes de descente d'échelle.

**FIGURE 5 – Évolution temporelle moyenne des sécheresses météorologiques (3 mois) au cours du 21<sup>e</sup> siècle selon les saisons (février : hiver, mai : printemps, août : été, novembre : automne) à partir des projections Arpège V4.6 scénario A2 (SOUBEYROUX *et al.*, 2011).**



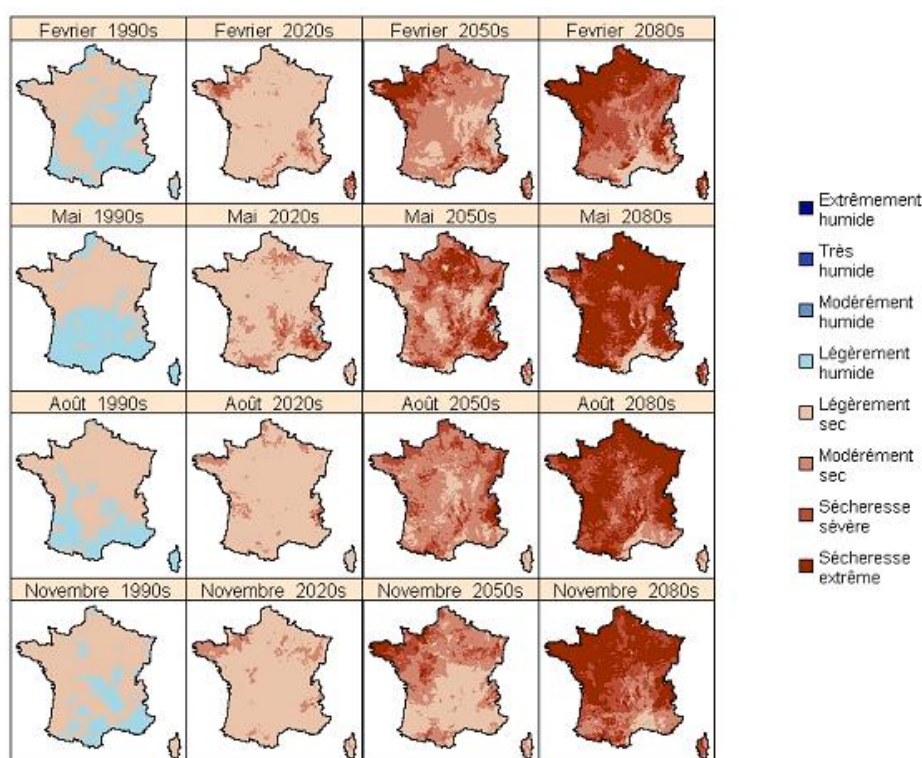
On peut aussi caractériser les évolutions spatio-temporelles des sécheresses de manière globale au cours de l'année mais l'intensité moyenne des sécheresses selon la période de l'année où elles se produisent a une grande influence sur les impacts pour les écosystèmes et les activités économiques, agricoles notamment.

Les Figures 5 et 6, calculées à partir des données du modèle de Météo France ARPEGE (V4.6) pour le scénario d'émission A2 (fortes émissions), présentent respectivement une cartographie moyenne sur 30 ans des indices de sécheresses météorologique et agronomique pour les mois de février, mai, août et novembre au cours du 21<sup>e</sup> siècle, représentant respectivement les sécheresses hivernales, printanières, estivales et automnales. Les indicateurs de sécheresse hydrologique n'ont pas été évalués avec ces projections climatiques.

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 ; des événements tels qu'observés en 1976 sont alors fréquemment dépassés ;
- pas d'évolution des sécheresses printanières même en fin de siècle.

**FIGURE 6 – Évolution temporelle moyenne des sécheresses agronomiques (3 mois) au cours du 21<sup>e</sup> siècle selon les saisons** (février : hiver, mai : printemps, août : été, novembre : automne) à partir des projections Arpège V4.6 scénario A2 (SOUBEYROUX *et al.*, 2011).



Le diagnostic établi pour les sécheresses agricoles (Figure 6) est en revanche assez différent :

- l'aggravation des sécheresses au cours du 21<sup>e</sup> 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 ; des sécheresses inhabituelles en termes d'expansion spatiale ou d'intensité pourraient apparaître : une sécheresse, telle qu'observée en 1990 pour l'indice d'humidité des sols superficiels, pourra être fréquemment dépassée ;



- 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. Une grande partie du territoire pourrait connaître de très longues sécheresses du sol quasiment sans retour à la situation normale, définie selon le climat actuel.

### 3.4. Incertitudes

Dans les travaux d'étude d'impact du changement climatique, un certain nombre d'incertitudes existent et doivent être mentionnées :

- les scénarios d'émission de GES représentent plusieurs futurs possibles de concentration en GES ;
- le choix des modèles d'écoulement atmosphérique ;
- le choix des méthodes de descente d'échelle pour atteindre des résolutions spatiales pertinentes pour l'étude des régions françaises ;
- la variabilité naturelle du climat, qui fait que les années se suivent et ne se ressemblent pas, est aussi un facteur important d'incertitude, surtout dans la première moitié du 21<sup>e</sup> siècle et quand on considère un climat de référence plus proche du climat présent ;
- le choix des modèles d'impact.

On note que c'est l'incertitude liée aux méthodes de descente d'échelle qui semble la plus réduite au milieu du 21<sup>e</sup> siècle. En revanche, l'incertitude des modèles climatiques est du même ordre de grandeur que celle liée aux scénarios d'émissions entre A2, A1B ou B1. Le poids relatif des sources d'incertitudes est comparable pour les sécheresses météorologiques et agricoles, même si l'amplitude des incertitudes est beaucoup plus forte en matière d'humidité des sols, cumulant les incertitudes relatives des différentes composantes des écoulements atmosphériques (rayonnement, température, précipitations, humidité, vent) et des modèles utilisés en aval qui calculent l'humidité dans le sol. Par ailleurs, dans l'étude ClimSec sur l'évolution des sécheresses agronomiques, l'impact de l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> sur la physiologie des plantes et notamment l'évapotranspiration n'a pas été pris en compte. Enfin, à des échelles de temps aussi importantes, des transformations du paysage et de l'occupation des sols sont une source d'incertitude sur les évolutions à attendre de la disponibilité en eau.

## Conclusions

Le climat de la France s'est réchauffé d'environ 1°C au cours du 20<sup>e</sup> siècle et un assèchement des sols a été estimé en hiver et dans la moitié sud du pays. Les projections pour le futur se caractérisent par une élévation des températures en toutes saisons, surtout en été, et par une réduction significative des précipitations en toutes saisons, sauf en hiver. Les scénarios étudiés ici correspondent aux scénarios du GIEC utilisés dans le 4<sup>e</sup> rapport de 2007. Pour le prochain rapport qui paraîtra en 2014, de nouveaux scénarios seront mis en œuvre (RCP4.5 et RCP8.5) et permettront d'affiner la quantification du changement climatique et de ses impacts. Par ailleurs, les travaux entamés dans le cadre du projet Climsec seront poursuivis pour s'intéresser à l'évolution de l'indice hydrologique de sécheresse qui conditionne aussi l'accès à l'eau.

Les travaux sur l'analyse des sécheresses en France menés dans le cadre du projet ClimSec ont permis de mettre au point des méthodes et des outils de caractérisation des différents types d'événements dans une perspective historique longue, débutant en 1958 avec une chaîne opérationnelle de modèles. Ces outils sont aujourd'hui applicables en temps réel et ont été mis à disposition des services hydrologiques pour le suivi de la sécheresse printanière 2011. Ces méthodes ont également été utilisées en climat futur à partir des principales projections climatiques régionalisées disponibles sur notre pays. Malgré les incertitudes liées aux modèles climatiques, aux scénarios socio-économiques et aux méthodes de descente d'échelle, les grandes lignes de l'évolution attendue des sécheresses annoncent de possibles modifications profondes des événements connus jusqu'à ce jour. Ces modèles et ces dispositifs opérationnels mis au point peuvent être mobilisés par les acteurs de la Recherche et du Développement agricole. Ainsi, Météo-France avec les autres acteurs de la communauté scientifique climatique met à disposition des

projections climatiques sur la France à différents horizons temporels par l'intermédiaire du portail Internet Drias, les futurs du climat (<http://drias.meteo.fr/>). Ces informations constituent un socle pour aider à la conception de voies d'adaptation au changement climatique et sécuriser les systèmes de production.

### Références bibliographiques

- DEQUE 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, 16-26.
- GARNIER E. (2010) : "Basses extraordinaires et grandes chaleurs. 500 ans de sécheresses et de chaleurs en France et dans les pays limitrophes", *La Houille Blanche*, 4, 26-42.
- SOUBEYROUX J.-M., VIDAL J.-P., NAJAC J., KITOVA N., BLANCHARD M., DANDIN P., MARTIN E., PAGE C., HABETS F. (2011) : "Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol", *Rapport final du proje*, <http://www.cnrm-game.fr/projet/climsec>
- VIDAL J.-P., MARTIN E., FRANCHISTÉGUY L., HABETS F., SOUBEYROUX J.-M., BLANCHARD M., BAILLON M. (2010) : "Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite", *Hydrology and Earth System Sciences*, 14 (3), 459-478.