Prix Prud'homme 2008

Cycle hydrologique et changements climatiques sur la France : mécanismes, incertitudes, impacts sur la ressource en eau

Julien Boé

Climate Modelling and Global Change Team, URA CNRS/Cerfacs 1875, Toulouse, France

Actuellement à l'University of California, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Los Angeles, États-Unis
boe@cerfacs.fr

Résumé

La complexité des mécanismes liés au cycle de l'eau continental joue un rôle important dans la disparité actuelle des résultats des modèles climatiques sur la France et donc dans les incertitudes quant aux impacts du changement climatique d'origine anthropique. Cet article présente les rétroactions qui sont en jeu et souligne l'importance pour les modèles de climat de représenter correctement le cycle hydrologique du climat présent. Cela est particulièrement critique pour prévoir l'effet du changement climatique en été sur la France et plus largement sur une large zone intermédiaire entre l'Europe du Nord et l'Europe du Sud. Pour ces régions, une meilleure compréhension des changements de circulation atmosphérique sur l'Atlantique nord est conjointement nécessaire. Complété par une étude d'impact, l'article souligne que, en France, dans l'état actuel des connaissances, des impacts importants sont à attendre sur la ressource en eau.

Abstract

Hydrological cycle and climate changes over France: mechanisms, uncertainties, impacts on water resources

Discrepancies between climate models results over France are largely due to the complexity of mechanisms involved in the continental water cycle and thus on the ensuing uncertainties in the...

Depuis plus d'un siècle, les activités humaines altèrent la composition chimique de l'atmosphère terrestre par le rejet croissant de gaz à effet de serre (GES) – comme le dioxyde de carbone, le méthane, l'oxyde nitreux ou les halocarbones – et de particules telles que les aérosols sulfatés. Les rejets anthropiques de GES sont en train de renforcer l'effet de serre naturel de l'atmosphère et de modifier le climat terrestre.

Dans ce contexte, la compréhension de la réponse du cycle de l'eau aux modifications anthropiques du climat présente un double intérêt. D'une part, parmi les différents impacts du changement climatique, ceux affectant le cycle hydrologique font partie des plus préoccupants. D'autre part, le cycle hydrologique constitue un rouage important de la machine climatique. Il joue un rôle actif dans les échanges d'énergie à l'intérieur du système climatique : l'évaporation consomme de l'énergie qui est ensuite libérée lors de la condensation, suite au transport de la vapeur d'eau par la circulation atmosphérique. De plus, des produits du cycle hydrologique, comme la vapeur d'eau et les nuages, jouent un rôle primordial dans le bilan énergétique de la Terre, que ce soit via un effet de serre (pour les nuages et la vapeur

d'eau) ou via une limitation de l'énergie solaire atteignant la surface terrestre (pour les nuages). Dans le cadre du changement climatique, comprendre et anticiper les changements du cycle de l'eau est donc indispensable.

Or, de la condensation de la vapeur d'eau dans les nuages autour de microscopiques noyaux de condensation à l'advection de la vapeur d'eau par la circulation atmosphérique sur des milliers de kilomètres, de la transpiration d'une plante à l'écoulement de l'eau dans les sols, une grande gamme d'échelles spatiales et une grande diversité de processus sont impliquées. Cela rend particulièrement complexe la modélisation du cycle de l'eau, et des incertitudes importantes sont associées à l'évolution du cycle hydrologique en réponse au forçage anthropique. Cela contribue plus globalement aux incertitudes sur le changement climatique. Il est ainsi indispensable de progresser dans la compréhension des interactions entre cycle hydrologique et climat pour mieux appréhender le réchauffement global. Cette question étant particulièrement vaste, cet article se focalise sur les cas particuliers de l'Europe et de la France, et sur la saison d'été où les changements climatiques les plus préoccupants sont probablement à attendre en ce qui concerne l'Hexagone.

... impact of the anthropological climate changes. This article presents the feedback mechanisms involved and emphasizes the importance for climate models to properly represent the hydrological cycle of today's climate. This is particularly critical to forecast the effect of climate change in summer over France, and more broadly, over the wide transition zone between Northern and Southern Europe. For these areas, a better understanding of the changes in the atmospheric circulation over the North Atlantic is also necessary. Ending with an impact study, this paper highlights that with today's understanding, important consequences are to be expected on water supply over France.

Changements climatiques sur l'Europe

Les meilleurs outils dont nous disposons pour projeter l'évolution globale du climat en réponse au forçage anthropique sont les modèles climatiques globaux, couplant (au moins) un modèle d'océan et un modèle d'atmosphère. Dans le cadre du dernier rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (Giec) publié en 2007 (IPCC, 2007), des projections climatiques coordonnées ont été réalisées par une vingtaine de groupes de modélisation

climatique dans le monde, dont deux en France – le Centre national de recherches météorologiques (CNRM) de Météo-France et l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL). Ce large ensemble de simulations climatiques, mis à la disposition de tous, a ouvert d'importantes possibilités de progrès dans le cadre de la projection des effets du changement climatique, en termes de compréhension des mécanismes physiques à l'œuvre, de l'estimation des incertitudes associées, ou encore de l'évaluation des impacts.

Les figures 1 et 2 présentent, pour chaque saison, les changements de température de l'air en surface et de précipitations simulés par les modèles du

Figure 1 - Changements saisonniers de température (en °C) sur l'Europe, entre les périodes 2080-2099 et 1961-1990, donnés par la moyenne d'ensemble des modèles du Giec. Ici, comme dans tout cet article, le scénario d'émission en GES est le scénario intermédiaire SRESA1B.

Figure 2 - Idem que figure 1 pour les précipitations. Le changement est ici relatif, donc sans unité. Les croix signalent les mailles où il n'y a pas cohérence entre les modèles sur le signe du changement, c'est-à-dire où moins de 80 % des modèles simulent un changement du même signe.

Giec sur l'Europe, en moyenne d'ensemble, à la fin du ^{xxi}e siècle, avec le scénario d'émission en GES intermédiaire SRESA1B (Nakicenovic et Swart, 2000).

Sur l'Europe, une augmentation généralisée des températures a lieu. La structure spatiale est variable selon la saison, avec une augmentation de température maximale en hiver sur le nord-est de l'Europe, liée en partie à la rétroaction neige/albédo (la diminution du couvert neigeux provoque une augmentation de l'énergie solaire absorbée en surface et donc des températures), et une augmentation maximale en été sur l'Europe du Sud, liée en partie aux rétroactions sol/atmosphère comme nous le verrons par

la suite. Sur la France, l'augmentation de température moyenne va d'environ 2,5 °C au printemps à 4 °C en été.

Pour ce qui est des précipitations, une augmentation est visible sur le nord de l'Europe et une diminution sur le sud, quelle que soit la saison. Néanmoins, la limite varie au cours de l'année : elle se situe plus au nord en été et plus au sud en hiver. Sur une large partie de l'Europe, entre ces deux zones où l'effet du forçage anthropique sur les précipitations est assez clair, les modèles ne s'accordent pas sur le signe du changement. C'est le cas de beaucoup de régions françaises durant la majeure partie de l'année. Il n'y a en fait qu'en été que l'on trouve une cohérence de

signe sur la majorité du territoire français, avec de fortes diminutions des précipitations simulées, souvent de l'ordre de 30 %.

Les figures 1 et 2 indiquent que les changements climatiques les plus préoccupants en ce qui concerne la France sont probablement à attendre en été. C'est donc principalement cette saison qui sera étudiée dans la suite de cet article.

Il est intéressant de remarquer que les modèles simulant les plus forts changements de température sur la France sont souvent aussi ceux simulant les plus importantes diminutions de précipitations, comme le montre la figure 3. La relation n'est certes pas parfaite (en

Figure 3 - Changement relatif des précipitations (sans unité) à la fin du xx^e siècle (2080-2099 et 1961-1990) en fonction du changement de température (en $^{\circ}\text{C}$), en moyenne sur la France en été. Chaque point correspond à un modèle du Giec. Le point correspondant à la simulation Arpège forcée, utilisée par la suite, est aussi indiqué par un carré noir (numéro 21), tout comme le point correspondant au modèle climatique utilisé pour forcer Arpège (voir section « Analyse à plus fine échelle »).

particulier, deux points – qui correspondent en fait à un seul modèle avec deux résolutions différentes – apparaissent comme singuliers), et elle n'est pas linéaire, mais un lien est visible. Cette relation non-linéaire entre assèchement estival et augmentation de température est attendue pour des raisons physiques, compte tenu de ce que l'on nomme les interactions sol/atmosphère.

Quelques généralités sur les interactions sol/atmosphère

Les interactions sol/atmosphère ont reçu un intérêt croissant de la part de la communauté scientifique ces dernières années, et de nombreuses études ont montré leur importance dans le cadre de la variabilité et de la prévisibilité climatique à l'échelle de la saison (Vautard et al., 2007 ; Douville, 2009), dans la survenue d'événements extrêmes comme la canicule de 2003 (Fisher et al., 2007) ou encore dans le cadre du changement climatique (Seneviratne et al., 2006 ; Rowell et Jones, 2006 ; Boé et Terray, 2008). Le cycle hydrologique et l'humidité des sols en particulier jouent un rôle clé dans ces mécanismes.

Le bilan énergétique de la surface terrestre fait intervenir différentes composantes : les flux radiatifs, c'est-à-dire le rayonnement solaire et le rayonnement infrarouge ; le flux de chaleur sensible, transport direct de chaleur par les flux turbulents ; le flux de chaleur latente, transport indirect de chaleur induit par le transport de la vapeur d'eau par les flux turbulents et les changements de phase de l'eau (l'évaporation de l'eau en surface consomme de l'énergie qui est ensuite libérée dans l'atmosphère lors de la condensation). Lorsque le sol est humide,

un accroissement de l'énergie radiative (dans le domaine solaire et/ou infrarouge) disponible en surface peut se traduire par une augmentation de l'évaporation, et de façon équivalente du flux de chaleur latente. L'énergie consommée par l'évaporation modère alors l'augmentation de température en surface et celle du flux de chaleur sensible qui se produirait en cas de sol parfaitement sec (à noter que l'humidité des sols et l'énergie radiative disponible en surface ne sont pas les seuls facteurs influant sur l'évaporation : l'humidité de l'air et le vent en surface jouent aussi un rôle).

La figure 4 illustre ces mécanismes bien connus au cours du cycle saisonnier, dans le climat présent. Elle montre la moyenne sur la France des corrélations à l'échelle de temps interannuelle entre l'évaporation et (1) l'énergie radiative disponible en surface – définie comme la somme des rayonnements solaire et infrarouge incidents –, et (2) l'humidité des sols, pour chaque mois de l'année. Pour quantifier l'humidité des sols et l'évaporation sur la France, une simulation du modèle hydrométéorologique SIM [Safran-Isba-Modcou] (Habets et al., 2008) sur la période 1970-2005 a été utilisée. En effet, un des problèmes majeurs de l'étude du cycle hydrologique continental vient du fait que certaines variables clés, comme l'humidité des sols et l'évaporation, ne sont pas observées avec un bon échantillonnage spatial et/ou temporel et/ou sur une période suffisamment longue. Il n'y a donc guère d'autre choix dans ce contexte que de recourir à un modèle hydrométéorologique (ici Isba-Modcou), forcé par les variables météorologiques observées (fournies ici par l'analyse Safran : précipitations, température, vent, humidité, rayonnements incidents), afin d'estimer les différentes composantes du cycle hydrologique continental. La comparaison des débits simulés et des débits observés permet de valider indirectement et au moins partiellement les autres composantes du bilan d'eau en surface, et donc d'avoir relativement confiance dans l'humidité des sols et l'évaporation simulées.

Comme la figure 4 le montre, en hiver et au printemps, saisons caractérisées par une énergie radiative disponible en surface limitée mais des sols humides, la corrélation entre l'évaporation et l'énergie radiative disponible est forte et positive en moyenne sur la France. À la fin du printemps, une transition vers un nouveau régime a lieu : la corrélation entre l'énergie disponible en surface et l'évaporation devient négative, tandis que la corrélation de l'humidité des sols et de l'évaporation devient très forte. L'été étant caractérisé par des sols climatologiquement secs, même si l'énergie radiative disponible en surface est

Figure 4 - Moyenne spatiale sur la France des corrélations interannuelles sur la période 1970-2005, calculées pour chaque mois de l'année, de l'évaporation et (1) de la somme des rayonnements solaire et infrarouge descendants en surface et (2) de l'humidité des sols, mesurée ici comme par la suite par l'indice d'humidité des sols ou SWI = $(W_{tot} - W_{wilt}) / (W_{fc} - W_{wilt})$ avec W_{tot} le contenu total en eau de la colonne de sol, W_{fc} la capacité au champ et W_{wilt} le contenu en eau des sols au point de flétrissement. Le SWI est une mesure de l'eau dans le sol directement utilisable par la végétation. Une valeur du SWI égale à 1 indique qu'il n'y a pas de stress hydrique.

importante, l'humidité des sols devient le principal facteur limitant et donc contrôlant l'évaporation. L'anticorrélation modérée entre l'énergie disponible en surface et l'évaporation vient du fait que les étés les plus chauds, avec une forte énergie radiative disponible en surface, sont aussi généralement les plus secs.

L'humidité des sols peut aussi jouer sur les précipitations, via les rétroactions humidité des sols/précipitations dont les mécanismes sont complexes et pas encore parfaitement compris à l'heure actuelle. En effet, un sol devenant plus

sec peut conduire à une diminution des précipitations. Dans une région où une part importante des précipitations est due à l'évaporation locale, une diminution de l'humidité des sols se traduit directement par une diminution des précipitations (Trenberth, 1998). On emploie le terme de « recyclage » pour désigner ces précipitations résultant directement de l'évaporation locale, car elles recyclent en quelque sorte la pluie tombée précédemment et stockée dans le sol. Mais même si l'on considère une région où le recyclage est quasi nul, c'est-à-dire une région où les précipitations se font principalement grâce à la vapeur d'eau transportée dans le domaine par la circulation atmosphérique, un sol plus sec peut quand même indirectement favoriser une diminution des précipitations, en créant des conditions moins propices à la survenue d'événements pluvieux, via une stabilisation de la couche limite atmosphérique (voir Betts et al., 1996 ; Eltahir, 1998 ; Schär et al., 1999, pour une description détaillée des mécanismes impliqués). Sur la France, il semblerait que le recyclage soit plutôt faible (Schär et al., 1999 ; Trenberth, 1998), et la seconde rétroaction aurait donc potentiellement un rôle plus important.

Interactions sol-atmosphère et changement climatique

On s'intéresse maintenant au rôle des interactions sol/atmosphère dans le cadre du changement climatique. La figure 5 présente le cycle annuel des changements des flux de chaleur latente et sensible dans les modèles du Giec en moyenne sur la France à la fin du XXI^e siècle.

Alors que la dispersion entre les modèles en ce qui concerne les changements des flux de chaleur latente et sensible est relativement faible d'octobre à mai, elle devient très forte au cours de l'été. En hiver, printemps et automne, le flux de chaleur latente augmente dans la quasi-totalité des modèles en raison de l'augmentation de l'énergie radiative disponible en surface due à l'augmentation de la concentration en GES et aux rétroactions radiatives. En revanche, en été, les modèles ne s'accordent pas du tout sur les changements du flux de chaleur latente, ni en termes de magnitude, ni même simplement en termes de signe, même si l'humidité des sols diminue dans tous les modèles en été (non montré ici ; voir Boé, 2007). Cette forte incertitude sur les changements d'évaporation se répercute sur les changements du flux de chaleur sensible en été, et comme nous le verrons par la suite, sur la température et les précipitations. Il est donc important de comprendre

pourquoi les modèles du Giec ne s'accordent pas sur les changements du flux de chaleur latente en été sur la France.

Malgré la diminution d'humidité des sols, certains modèles simulent un climat futur avec quand même une augmentation d'évaporation en été : l'humidité des sols ne serait donc pas un facteur limitant pour ces modèles. Il est logique de penser qu'il en est de même dans leur modélisation du climat présent. Cela peut être testé avec le même genre de diagnostics que ceux montrés figure 4. La corrélation inter-annuelle entre le total des flux radiatifs descendants en surface et l'évaporation, sur la période 1970-2000 en été et en moyenne sur la France, est calculée pour les différents modèles (cette corrélation est appelée *Cre* par la suite). Les valeurs de *Cre* sont très variables d'un modèle à l'autre (figure 6, abscisse) : elles vont de -0,8 à pratiquement +0,9. Ainsi, avec certains modèles, caractérisés par une *Cre* positive, l'humidité des sols ne joue pas de rôle limitant sur l'évaporation en été dans la simulation du climat présent, en contradiction avec la simulation SIM introduite précédemment (-0,37, ligne verticale sur la figure 6).

La figure 6 confirme cette différence de comportement pour la simulation du climat futur entre les modèles pour lesquels l'humidité des sols joue un rôle limitant dans la simulation du climat présent et ceux pour lesquels ce n'est pas le cas. En effet, tous les modèles avec une *Cre* négative (et en particulier les cinq modèles les

Figure 5 - Changements pour chaque mois de l'année entre les périodes 2080-2099 et 1961-1990 du flux de chaleur latente (à gauche) et du flux de chaleur sensible (à droite) moyennés sur la France (W/m^2) pour différents modèles du Giec. Les flux sont comptés positivement vers le haut, un changement positif correspond donc à une perte d'énergie pour la surface.

Figure 6 - En haut à gauche : changement relatif d'évaporation (sans unité) moyenne sur la France entre les périodes 2080-2099 et 1961-1990 en été, en fonction de la corrélation présente en été entre le total des flux radiatifs descendants en surface et l'évaporation en moyenne sur la France (ou C_{re}). Le trait vertical plein indique la valeur de C_{re} calculée pour Safran-Isba-Modcou. En haut à droite : changements d'évaporation en été (mm/j) dans l'ensemble des modèles du Giec. En bas à gauche : différence des changements d'évaporation en été (mm/j) entre le groupe A et l'ensemble des modèles. En bas à droite : différence des changements d'évaporation en été (mm/j) entre le groupe B et l'ensemble des modèles.

Figure 7 - En haut, différence des changements de température en été (en °C) et, en bas, différence des changements de précipitations en été (mm/j) entre (à gauche) le groupe A et l'ensemble des modèles et (à droite) le groupe B et l'ensemble des modèles.

plus proches de SIM, groupe A) simulent des changements d'évaporation négatifs ou nuls sur la France, alors que pour les cinq modèles (groupe B) caractérisés par une forte valeur positive de C_{re} , proche de 0,8 et irréaliste si l'on s'en réfère à SIM, les changements d'évaporation sur la France sont positifs.

La réponse en évaporation des modèles dans le climat futur semble donc être largement liée aux mécanismes de contrôle de l'évaporation dans le climat présent. Compte tenu des interactions sol/atmosphère évoquées précédemment, des effets sont aussi visibles sur les changements de précipitations et de température (figure 7).

Les modèles du groupe A caractérisés par une diminution d'évaporation simulent une augmentation de température plus forte que l'ensemble des modèles d'environ 0,5 °C sur la France et une diminution des pluies plus marquée d'environ 0,15 mm par jour, tandis que l'inverse est vrai pour les modèles du groupe B (augmentation de température plus faible que l'ensemble des modèles d'environ 0,5 °C et diminution des pluies moins marquée d'environ 0,25 mm par jour sur la France).

D'après les résultats de cette section, la bonne représentation par les modèles climatiques du cycle hydrologique, tel qu'il est dans le climat présent, est un a priori nécessaire pour mieux prévoir les conséquences du forçage anthropique l'été pour la France, ainsi que pour toute une zone de transition entre l'Europe du Nord et l'Europe du Sud.

Dans certains modèles (groupe A), l'humidité des sols joue un rôle limitant sur l'évaporation dans le climat présent, qui ne peut que s'amplifier dans le climat futur, conduisant à une diminution de l'évaporation et de plus forts changements de température et précipitations. Dans d'autres modèles (groupe B), l'humidité des sols n'est pas un facteur

limitant de l'évaporation en été dans le climat présent, et ne l'est toujours pas dans le climat futur, conduisant à une augmentation de l'évaporation, et conséquemment à des changements de température et précipitations plus modérés. Si l'on se réfère aux résultats de SIM, les modèles du groupe A sont plus réalistes et il convient d'accorder plus de confiance à leurs résultats. Il est donc probable que les changements climatiques sur la France en été seront plus sévères que ne le laisse envisager la simple moyenne d'ensemble des modèles du Giec (montrée sur les figures 1 et 2 pour la température et les précipitations). Ces conclusions sont d'ailleurs valides pour toute une zone de transition climatique (en termes d'humidité des sols et de mécanisme de contrôle de l'évaporation en été) entre l'Europe du Nord et l'Europe du Sud où le même type de comportement que sur la France est constaté.

La différence entre les modèles des groupes A et B pourrait être liée structurellement aux modèles de sol utilisés (pour calculer les bilans d'eau et d'énergie en surface). On peut aussi penser que l'emplacement précis de cette zone de transition climatique, à l'humidité des sols intermédiaire, est difficile à simuler exactement pour les modèles. De faibles variations des valeurs climatologiques de certaines variables comme les précipitations peuvent se répercuter sur l'humidité des sols, et faire basculer le modèle vers un contrôle de l'évaporation par l'humidité des sols ou bien par l'énergie radiative disponible en été.

Analyse à plus fine échelle

On s'intéresse maintenant au rôle du cycle hydrologique dans la structure spatiale à plus fine échelle du changement climatique sur la France.

Comme la résolution des modèles climatiques du Giec utilisés précédemment n'est pas suffisante dans ce contexte, on utilise ici un modèle de circulation générale atmosphérique doté d'une haute résolution sur l'Europe (environ 60 km sur la France). Il s'agit du modèle Arpège-Climat développé au CNRM de Météo-France (Déqué et al., 1994), dans sa version à résolution variable (Gibelin et Déqué, 2003). Ce modèle a été forcé sur la période 1950-2100 par une projection des températures de surface océanique provenant d'une simulation climatique couplée océan/atmosphère (utilisant Arpège à basse résolution comme modèle atmosphérique), un scénario d'émission SRESA1B dans le climat futur, et les forçages observés durant le xx^e siècle.

La figure 8 présente les changements d'évaporation sur l'Europe en été à la fin du xxi^e siècle simulés par Arpège, ainsi que, sur la France, leur relation avec la climatologie du climat présent de l'humidité des sols. À l'échelle de l'Europe, l'évaporation augmente sur le Nord et diminue sur le Sud, et la structure spatiale simulée par Arpège est très cohérente avec celle donnée par la moyenne de l'ensemble des modèles du Giec (voir figure 6). Pour la France, un

contraste est/ouest est visible avec de fortes diminutions sur l'ouest du pays, mais des augmentations sur les Alpes. Ces changements sur la France sont fortement liés à la climatologie de l'humidité des sols dans le climat présent. Les régions caractérisées par une faible humidité des sols voient de larges diminutions d'évaporation se produire dans le climat futur, alors que les zones aux sols actuellement climatologiquement plus humides sont caractérisées par des diminutions d'évaporation moins sévères, voire par des augmentations. Quelques points ont un comportement clairement particulier : il s'agit de points de grille où les précipitations augmentent, situés dans les Alpes. L'augmentation future des précipitations y favorise une augmentation de l'évaporation indépendamment de la valeur climatologique actuelle de l'humidité des sols.

La relation entre l'humidité des sols climatologique actuelle et les changements futurs d'évaporation peut se comprendre dans le cadre d'un mécanisme décrit par Planton et al. (2005) s'appuyant sur l'analyse du même modèle Arpège. En raison de la non-linéarité de la relation entre l'humidité des sols et le ratio de l'évaporation réelle sur l'évaporation potentielle (i.e. l'évaporation qui aurait lieu dans le cas hypothétique d'un sol parfaitement humide), plus un sol est climatologiquement sec, plus la diminution d'évaporation associée à une même diminution d'humidité des sols est importante. Comme ici l'humidité des sols diminue en été de façon relativement homogène

Figure 8 - À gauche, changements d'évaporation simulés par Arpège en été (mm/j) sur l'Europe entre les périodes 2080-2099 et 1961-1990. À droite, changements d'évaporation sur la France (mm/j) sur la même période en fonction de la valeur climatologique du SWI en été sur la période 1961-1990. Chaque point est un point de la grille Arpège sur la France. La couleur des points représente les changements de précipitations (mm/j).

sur la France (excepté sur les Alpes où elle augmente pour les raisons évoquées précédemment), la climatologie de l'humidité des sols dans le climat présent impose son empreinte spatiale sur les changements d'évaporation et, par suite, sur d'autres variables comme les températures (Planton et al., 2005).

Un corollaire important est associé au résultat précédent : une représentation correcte de la climatologie de l'humidité des sols dans le climat présent est nécessaire pour prévoir correctement la structure spatiale et l'intensité des changements climatiques sur la France dans le climat futur. La question est alors de savoir si la climatologie de l'humidité des sols est simulée de façon réaliste dans le climat présent. L'absence d'observations satisfaisantes ne permet pas de répondre directement à cette question. Néanmoins, les résultats de la simulation SIM, forcée par les variables météorologiques observées, sont ici une nouvelle fois utiles.

La figure 9 présente la comparaison de l'humidité des sols sur la France calculée par SIM et simulée par Arpège dans le climat présent, chaque point correspondant à un point de grille Arpège sur la France.

Tout d'abord, une relativement bonne corrélation spatiale est à noter, ce qui donne confiance dans la structure spatiale des changements climatiques simulés par Arpège sur la France en été.

Néanmoins, sur la France, l'humidité des sols d'Arpège est le plus souvent supérieure à celle simulée par SIM. Comme c'est le même modèle de sol qui est utilisé par Arpège et SIM, même si les versions sont légèrement différentes, on ne

s'attend pas à trouver de grosses différences structurelles liées à ces faibles différences. Et c'est plus probablement parce que les variables météorologiques en entrée du modèle de sol sont différentes que les humidités des sols le sont.

Pour tester cette hypothèse, on corrige les biais des variables météorologiques issues des simulations Arpège par comparaison aux analyses SIM avant d'appliquer le modèle de sol. Comme supposé, on obtient alors une climatologie de l'humidité des sols sur la France en été tout à fait identique à celle de SIM (figure 9-droite).

On peut finalement utiliser la même méthode de correction des biais (sur les variables météorologiques avant application du modèle de sol) pour évaluer, à l'ordre zéro, l'effet de ces biais sur les simulations d'évaporation faites par le modèle Arpège pour le climat futur. La figure 10 présente la différence des changements d'évaporation simulés directement par Arpège à ceux obtenus lorsque les variables météorologiques sont corrigées des biais calculés précédemment pour le climat présent. Comme attendu, excepté encore une fois pour quelques points situés dans les Alpes, un lien fort existe entre les biais sur les variables météorologiques du temps présent et les changements d'évaporation futurs. Le sol d'Arpège, souvent climatologiquement un peu trop humide dans le climat présent, conduit à des diminutions d'évaporation plus faibles qu'elles ne devraient l'être dans le climat futur, toutes choses étant égales par ailleurs.

Bien entendu, le sol et l'atmosphère sont en réalité couplés, ce que la simple analyse linéaire précédente ne prend pas

Figure 10 - Différence des changements d'évaporation sur la France en été (mm/jour) entre les périodes 2080-2099 et 1961-1990 simulés par Arpège et par Isba-Modcou à partir du forçage Arpège avec les biais corrigés, en fonction de leur différence climatologique de SWI sur la période 1961-1990. Chaque point correspond à un point de grille Arpège sur la France.

en compte, et ces résultats doivent être considérés avec précaution du point de vue quantitatif. Néanmoins, ils démontrent encore une fois l'importance des processus hydrologiques dans les changements climatiques sur la France et renforcent l'idée qu'une représentation correcte des processus hydrologiques et de l'humidité des sols en particulier dans le climat présent est cruciale pour la réponse du climat sur la France au forçage anthropique. La diminution de l'évaporation trop faible, simulée directement par Arpège en été sur la France, suggérée par cette analyse, conduit probablement à une sous-estimation des changements climatiques projetés, en termes de changement de température et de précipitations estivales, compte tenu des interactions sol/atmosphère. Cette simulation est déjà pourtant du côté des modèles réalistes, en ce qui concerne les processus décrits dans la partie précédente, et dans la fourchette haute des changements climatiques simulés en été (voir rectangle sur figure 3).

Figure 9 - À gauche, valeurs climatologiques en été du SWI sur la France dans Arpège en fonction de la valeur du SWI dans SIM sur la période 1970-1999. À droite, valeurs climatologiques du SWI simulé par Isba-Modcou en été sur la France à partir du forçage Arpège avec les biais corrigés, en fonction de la valeur du SWI dans SIM sur la période 1970-1999. Chaque point est un point de la grille Arpège sur la France.

Impacts sur la ressource en eau

Les résultats produits jusqu'à présent montrent qu'il y a des incertitudes importantes sur l'évolution du climat et du cycle hydrologique sur la France en réponse au forçage anthropique. Est-ce à dire qu'il n'est pas possible de tirer de conclusions robustes quant aux changements climatiques et aux impacts à attendre ? C'est loin d'être le cas. Ainsi, les figures 1 et 2 montrent que des signaux

Rôle de la circulation atmosphérique

Les rétroactions sol/atmosphère ne sont pas les seuls mécanismes pouvant intervenir dans les changements du climat et plus spécifiquement des précipitations sur la France. Comme le terme « rétroaction » l'indique d'ailleurs, elles ne peuvent venir qu'amplifier des changements initialement causés par d'autres processus. Les changements de circulation atmosphérique jouent ainsi un rôle majeur dans ce contexte (Boé et al., 2009). La circulation atmosphérique est caractérisée ici au moyen du concept de régime de temps. La circulation atmosphérique de grande échelle sur l'Atlantique nord en été peut en effet se classer en quatre états préférentiels, ou régimes (Cassou et al., 2005). Cette approche permet ensuite de caractériser de façon simple les changements de circulation en réponse au forçage anthropique, en calculant le changement d'occurrence des régimes dans le climat futur (i.e. le temps que l'atmosphère passe dans chacun des états préférentiels, en faisant l'hypothèse que les états préférentiels eux-mêmes ne changent pas dans le climat futur). Les changements d'occurrence des quatre régimes obtenus en été ont été calculés pour les différents modèles du Giec (pour des résultats complets se reporter à Boé et al., 2009). Il apparaît en particulier que le régime de blocage (qui peut aussi se voir comme la phase négative de l'oscillation Nord Atlantique d'été), caractérisé par des hautes pressions centrées sur les îles Britanniques (figure A), devient plus fréquent dans le climat futur dans la plupart des modèles climatiques. Comme ce régime est associé à des précipitations plus faibles que la normale sur la quasi-totalité du territoire français (non montré ici ; voir Boé, 2007), ces changements de circulation devraient conduire à une diminution des précipitations sur la France. La figure A-droite montre effectivement que les diminutions des précipitations en été sur la France dans les modèles du Giec sont généralement plus fortes lorsque la fréquence d'occurrence du blocage augmente plus fortement. La moitié de la dispersion des changements de précipitation en été sur la France dans les modèles du Giec trouve ainsi son origine dans les changements d'occurrence du blocage. Les changements de précipitation initialement causés par la circulation atmosphérique peuvent ensuite être amplifiés par les rétroactions humidité des sols/précipitations, et de façon différente selon les modèles, comme nous l'avons vu précédemment. Quoi qu'il en soit, il est donc aussi nécessaire d'améliorer notre compréhension des changements de circulation atmosphérique sur l'Atlantique nord, en réponse au forçage anthropique, pour réduire les incertitudes des projections climatiques sur la France.

Figure A - À gauche, anomalies de pression de surface (hPa) correspondant au régime de blocage en été dans le climat présent. À droite, changement relatif entre les périodes 2081-2100 et 1961-2000 des précipitations moyennées sur la France en été, en fonction du changement du nombre de jours de blocage au cours de l'été pour quatorze modèles du Giec. La corrélation est de -0,75.

clairs apparaissent, notamment en été, avec une diminution importante des précipitations et une forte augmentation de température en moyenne d'ensemble, et une très bonne cohérence des modèles sur le signe des changements à attendre.

Ces changements des variables météorologiques laissent envisager des impacts importants sur les ressources en eau. Pour évaluer ces impacts, le modèle hydrométéorologique Isba-Modcou est utilisé, forcé par des projections climatiques régionalisées (Boé, 2007).

L'étude des impacts du changement climatique présente une difficulté particulière : les modèles climatiques ont une résolution limitée à l'heure actuelle (de l'ordre de 200 km), comparée à la résolution typiquement nécessaire aux modèles d'impacts – souvent inférieure à 10 km – (8 km pour Isba-Modcou). Il est donc nécessaire de mettre en œuvre

des méthodes dites de « régionalisation » ou « désagrégation », pour dériver des modèles climatiques à basse résolution les scénarios climatiques à haute résolution nécessaires pour le modèle d'impact. On peut utiliser pour cela des modèles comme Arpège à résolution variable afin d'obtenir une plus haute résolution sur le domaine d'intérêt. On parle alors de régionalisation dynamique. Cette approche a le désavantage d'être coûteuse en temps de calcul, et il est donc difficile de l'appliquer à un grand nombre de modèles, ce qui est pourtant important afin d'échantillonner correctement les incertitudes liées aux modèles climatiques. Alternativement, ici, une méthode de régionalisation statistique a été développée (Boé et al., 2006 ; Boé et al., 2007). Elle consiste à utiliser les liens existants entre les variables climatiques locales nécessaires au modèle d'impact et les variables météorologiques de grande

échelle comme la pression de surface et la température sur un grand domaine afin de d'obtenir, à partir des changements de grande échelle simulés par les modèles climatiques basse résolution, des projections climatiques locales à haute résolution. Cette approche permet de régionaliser un grand nombre de modèles climatiques et d'obtenir une meilleure caractérisation des impacts du changement climatique.

La figure 11 présente, pour chaque saison, les changements relatifs des débits simulés à partir des scénarios régionalisés, pour différents rivières et fleuves français, entre les périodes 2046-2065 et 1971-1999. L'impact du changement climatique sur les débits y est ici caractérisé par la moyenne d'ensemble des débits obtenus après modélisation hydrologique Isba-Modcou, pour quatorze modèles du Giec. Des diminutions fortes apparaissent en été et en automne sur la majeure partie du territoire français, souvent supérieures à -30 %. La cohérence des modèles sur le signe du changement est quasi parfaite pour ces deux saisons (non montré ici ; voir Boé, 2007). Les changements au printemps sont plus modérés, avec des diminutions des débits généralement inférieures à 20 %. Il n'y a qu'en hiver qu'une augmentation des débits à grande échelle est notée, sur les Alpes et le sud-est du pays, liée à la fois dans certains modèles à une augmentation des précipitations sur cette région et à un changement du ratio entre précipitations

Figure 11 - Changement relatif (sans unité) des débits sur la France en moyenne d'ensemble entre les périodes 2046-2065 et 1970-1999 pour les quatre saisons.

commence à être incorporé dans la nouvelle génération de modèles climatiques, mais était rarement pris en compte jusqu'à présent.

Une part importante de cet article est dédiée aux incertitudes, car comprendre les incertitudes en jeu et les mécanismes associés est nécessaire afin de progresser. D'une part, cela fournit des pistes pour pouvoir améliorer en priorité les points faibles des modèles climatiques. D'autre part, comprendre les processus importants et les incertitudes associées est nécessaire pour interpréter plus correctement et de façon plus physique les projections climatiques fournies par les modèles. On peut ainsi accorder plus de poids (simplement qualitativement comme ici, mais aussi quantitativement) aux projections des modèles représentant les processus physiques clés d'une façon plus réaliste. Comme on l'a vu dans cet article, certains modèles climatiques actuels sont probablement trop « optimistes » en ce qui concerne les changements climatiques simulés sur la France en été, et plus de confiance doit être accordée aux modèles simulant les changements les plus forts, car leur représentation des processus clés du cycle hydrologique continental sur la France semble plus réaliste.

Pourtant, même si des incertitudes persistent, cela ne doit pas masquer le fait que de nombreux résultats robustes sur les effets du changement climatique sur la France en été existent. On en sait ainsi suffisamment aujourd'hui pour anticiper avec une bonne confiance des changements climatiques sévères sur la France en été, avec une diminution importante des pluies et des débits, un assèchement des sols, des augmentations de température importantes. Il ne fait guère de doute que ces changements sont préoccupants.

Remerciements

Un grand merci à Laurent Terray pour avoir initié et encadré ce projet de recherche, ainsi qu'à Florence Habets et Éric Martin pour le rôle qu'ils ont joué dans ce travail. Merci également au jury du prix Prud'homme 2008 et aux développeurs des jeux de données et modèles utilisés pour ce travail.

solides et liquides. Sur le reste du territoire des diminutions modérées sont notées. Les incertitudes sur la magnitude et le signe des changements sont généralement plus importantes en hiver et au printemps qu'en été et automne. Il faut noter que des incertitudes sont aussi associées à la méthode de désagrégation choisie. Deux autres méthodes, largement différentes, ont été testées. Les différences obtenues avec les différentes méthodes restent relativement limitées et ne remettent globalement pas en question les résultats montrés ici (Boé, 2007).

Quand on considère les impacts du changement climatique, il ne faut pas uniquement penser en termes d'aléa, mais aussi en termes de vulnérabilité. Les changements estivaux sont particulièrement préoccupants dans ce cadre. En effet, l'été est la période de l'année où les débits minimaux sont souvent climatologiquement atteints. C'est aussi une période durant laquelle les besoins en eau sont importants, pour l'irrigation par exemple, et c'est la période où les changements des températures et précipitations sur la France seront les plus forts.

Bilan

Les processus liés au cycle hydrologique continental jouent un rôle important dans le cadre du changement climatique sur la France, en particulier en été. L'amélioration des projections climatiques, sur la France comme sur de nombreuses régions du globe, passe par une meilleure compréhension et une meilleure modélisation du cycle hydrologique. C'est un problème complexe, tout d'abord en raison du manque d'observations : des variables importantes comme l'humidité des sols et l'évaporation ne sont pas observées de façon satisfaisante. Une seconde difficulté est liée à la grande diversité de nature des processus en jeu, certains étant d'ordre purement physique/thermodynamique, d'autres du domaine de la biologie. La transpiration des plantes constitue ainsi une part importante de l'évaporation totale. Or le changement climatique (que ce soit par les changements des températures, des précipitations, mais aussi de la concentration atmosphérique en CO_2), va avoir un effet sur les plantes, qui vont alors rétroagir sur le climat via une modulation de leur transpiration. Ce mécanisme

Bibliographie

- **Betts A. K., J. H. Ball, A. C. M. Beljaars, M. J. Miller et P. A. Viterbo**, 1996 : The land surface-atmosphere interaction. A review based on observational and global modeling perspectives. *J. Geophys. Res.*, 101(3), 7209-7225.
- **Boé J., L. Terray, F. Habets et É. Martin**, 2006 : A simple statistical-dynamical down-scaling scheme based on weather types and conditional resampling. *J. Geophys. Res.*, 111, D23106, DOI: 10.1029/2005JD006889.
- **Boé J.**, 2007 : *Changement global et cycle hydrologique : une étude de régionalisation sur la France*. Thèse de doctorat, université Paul-Sabatier (Toulouse III).
- **Boé J., L. Terray, F. Habets et É. Martin**, 2007 : Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *Int. J. Clim.*, 27 (12), 643-1655, DOI: 10.1002/joc.1602.
- **Boé J. et L. Terray**, 2008 : Uncertainties in summer evapotranspiration changes over Europe and implications for regional climate change. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L05702, DOI: 10.1029/2007GL032417.
- **Boé J., L. Terray, C. Cassou et J. Najac**, 2009 : Uncertainties in European summer precipitation changes: role of large scale circulation. *Climate Dyn.*, publié online, DOI: 10.1007/s00382-008-0474-7.
- **Cassou C., L. Terray et A. S. Phillips**, 2005 : Tropical Atlantic influence on European heatwaves. *J. Climate*, 18, 2805-2811.
- **Déqué M., C. Dreveton, A. Braun et D. Cariolle**, 1994 : The climate version of the ARPEGE-IFS: a contribution of the french community climate modelling. *Climate Dyn.*, 10, 249-266.
- **Douville H.**, 2009 : Relative contribution of soil moisture and snow mass to seasonal climate predictability: a pilot study. *Climate Dyn.*, publié online, DOI: 10.1007/s00382-008-0508-1.
- **Eltahir E. A. B.**, 1998 : A soil moisture-rainfall feedback mechanism. 1. Theory and observations. *Water Resour. Res.*, 34, 765-776.
- **Fischer E. M., S. I. Seneviratne, P. L. Vidale, D. Lüthi et C. Schär**, 2007 : Soil moisture - atmosphere interactions during the 2003 European summer heatwave. *J. Climate*, 20, 5081-5099.
- **Gibelin A.-L. et M. Déqué**, 2003 : Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dyn.*, 20, 327-339.
- **Habets F., A. Boon, J.-L. Champeaux, P. Etchevers, L. Franchisteguy, E. Leblos, É. Ledoux, P. Le Moigne, É. Martin, S. Morel, J. Noilhan, P. Quintana Seguí, F. Rousset Regimbeau et P. Viennot**, 2008 : The Safran-Isba-Modcou hydrometeorological model applied over France. *J. Geophys. Res.*, 113, D06113, DOI: 10.1029/2007JD008548.
- **IPCC**, 2007 : *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Core Writing Team, R. K. Pachauri and A. Reisinger, (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 p.
- **Nakicenovic N. et R. Swart**, 2000 : *Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 599 p.
- **Planton S., M. Déqué, H. Douville et B. Spagnoli**, 2005 : Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique. *C. R. Geophys.*, 337(1-2), 193-202.
- **Rowell D. P. et R. G. Jones**, 2006 : Causes and uncertainty of future summer drying over Europe. *Climate Dyn.*, 27(2-3), 281-299, DOI: 10.1007/s00382-006-0125-9.
- **Schär C., D. Lüthi, U. Beyerle et E. Heise**, 1999 : The soil-precipitation feedback : a process study with a regional climate model. *J. Climate*, 12, 722-741.
- **Seneviratne S. I., D. Lüthi, M. Litschi et C. Schär**, 2006 : Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature*, 443, 205-209.
- **Trenberth K. E.**, 1998 : Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for rainfall rates with climate change. *Clim. Change*, 39, 667-694.
- **Vautard R., P. Yiou, F. D'Andrea, N. de Noblet, N. Viovy, C. Cassou, J. Polcher, P. Ciais, M. Kageyama et Y. Fan**, 2007 : Summertime European heat and drought waves induced by wintertime Mediterranean rainfall deficit. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L07711, DOI: 10.1029/2006GL028001.