



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 337 (2005) 193–202



<http://france.elsevier.com/direct/CRAS2A/>

Géophysique externe, climat et environnement (Climat)

Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique

Serge Planton*, Michel Déqué, Hervé Douville, Bruno Spagnoli

Centre national de recherches météorologiques, Météo-France, 42, av. Gaspard-Coriolis, 31057 Toulouse cedex 1, France

Reçu le 24 mai 2004 ; accepté après révision le 1^{er} octobre 2004

Disponible sur Internet le 25 novembre 2004

Rédigé à l'invitation du Comité éditorial

Résumé

À l'échelle planétaire, les modèles simulent de façon cohérente une intensification du cycle hydrologique dans un climat futur, plus chaud que le climat actuel. Cependant, cette intensification du cycle pourrait s'accompagner de son ralentissement dû à l'augmentation du temps de résidence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. L'impact des changements climatiques sur les événements extrêmes de précipitations est beaucoup plus difficile à évaluer, tant les résultats dépendent des méthodologies employées, des scénarios d'émissions et, principalement, des modèles. L'augmentation des précipitations extrêmes hivernales sur l'Europe du Nord est cependant un trait commun de ces évaluations. Le cycle hydrologique, au travers de la répartition géographique des humidités de surfaces continentales, semble jouer un rôle déterminant sur la possibilité de détecter le réchauffement climatique en France. *Pour citer cet article : S. Planton et al., C. R. Geoscience 337 (2005).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Impact of climate warming on the hydrological cycle. At the planetary scale, the models consistently simulate an intensification of the hydrological cycle in a future climate, warmer than the present-day one. However, this intensification might be accompanied by its slowing down due to an increase of the residence time of water vapour in the atmosphere. The impact of climate change on extreme events is even more difficult to evaluate, as results are dependent on methods, emission scenarios and, above all, on models. However, the increase of extreme winter precipitation over northern Europe is a common feature of these evaluations. The hydrological cycle, through the geographical distribution of continental surface humidity, seems to play a key role on the possibility to detect the warming in France. *To cite this article: S. Planton et al., C. R. Geoscience 337 (2005).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Cycle hydrologique ; Changements climatiques ; Extrêmes ; Détection

Keywords: Hydrological cycle; Climate change; Extremes; Detection

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : serge.planton@meteo.fr (S. Planton).

Abridged English version

The analysis of climate-change scenarios' simulations performed in the context of the 'Coupled Model Intercomparison Project' (CMIP), shows that dry regions might become drier and wet regions might become wetter [1]. This gives the picture of an intensified hydrological cycle at the planetary scale related to increased evaporation over warmer oceans. However, a recent study by Douville et al. [3] demonstrates in a specific climate-change scenario's simulation that this intensification is accompanied by a slowing down of this cycle, linked to a decrease of the precipitation efficiency. Such a response needs of course to be confirmed in other climate-change scenarios' simulations, and might be further investigated with mesoscale and cloud-resolving models to estimate the influence of microphysical processes.

This same simulation also reveals that precipitation change over Europe is consistent with the common features of precipitation change at mid-latitudes. The main source of precipitation increase in winter appears to be linked to the atmospheric transport of wetter Atlantic air by the mean circulation and by transient eddies. The latter contribute to extend the precipitation increase over northern Europe. In summer, the decrease in precipitation efficiency leads to a slight decrease in precipitation, in agreement with the results of most climate-change scenarios' simulations performed with other low-resolution coupled models [8].

As far as the surface hydrological cycle is concerned, the response over the European continent is characterised by an earlier snowmelt that induces an earlier springtime peak of surface runoff. This change, combined with the precipitation change, results on average in an enhanced seasonal cycle of the soil water content [3]. However, the uncertainties of the impact of climate change on the surface hydrological cycle are even greater than those of its impact on the atmospheric hydrological cycle, due in particular to the parameterisation of runoff processes in large-scale models.

Climate models reproduce with difficulty extreme precipitation events, particularly those of convective origin, with scales lower than the model grid scale. Estimates of climate change impact on extreme events generally result from an extrapolation of these imper-

fectly simulated processes and are thus highly method-dependent. A first method based on the application of extreme value distribution function was applied by Kharin and Zwiers [9]. One of their conclusions is that extreme precipitation might increase more than mean precipitation.

Analysing results from the CMIP simulations, Palmer and Räisänen [12] calculated that the probability of a very wet winter, corresponding to precipitation exceeding two standard deviations above the mean, might increase from about 2.5% to about 15% over northern Europe, at a time of near CO₂ doubling (after 60 years of 1% per year CO₂ increase). Over France, their calculation gives an increase by a factor from 2 to 5. This result is significantly different from the one obtained with the same method applied to the daily precipitation calculated in a regional climate change scenario simulation performed with the variable resolution ARPEGE-Climat (Fig. 1). In this case, the increasing factor of extreme precipitation generally does not exceed 1.6 whatever the emission scenario (A2 and B2 of IPCC), showing a strong sensitivity of the result to the temporal resolution of the analysed data and to the model horizontal resolution. In addition, these regional simulations show that the probability of extreme summer precipitation should generally decrease, but, according to one of the two scenarios, might very locally increase even when mean precipitation is decreasing. The method reveals to be inappropriate to characterize extreme low precipitation due to the high standard deviation compared to the mean.

A third method was also applied to the daily precipitation simulated in the same regional climate change scenario simulation (with the A2 emission scenario) and another one performed at IPSL (Institut Pierre-Simon-Laplace). This method consists in correcting the model biases for all the classes of precipitation intensity. The increase of extreme winter precipitation over France is confirmed, since the probability of daily precipitation greater than 20 mm day⁻¹ might be multiplied by a factor generally larger than one, but lower than 2.

To summarize the reported results on the impact of climate change on extreme precipitation, we may conclude that these events should become more frequent in a future climate in winter, particularly over northern Europe, and generally less frequent in summer. However, the quantitative results depend on the evaluation

method, on the emission scenario, on the model used and on its resolution.

An analysis of recent temperature change over France shows that the hydrological cycle might play a key role in the possibility to detect a warming signal. The starting point of this analysis is the detection of a warming signal in the 30-year trends of summer daily minimum temperature that is not explained by internal climate variability [14,17]. This detection is based on the so-called ‘fingerprint’ method already applied at the planetary scale. The role of the hydrological cycle on this detection is illustrated in Fig. 2. It shows the ratio between actual evapotranspiration and potential evapotranspiration calculated in summer at each grid point located in France, as a function of the corresponding soil water index (equal to 0 when soil water reaches the wilting point, and equal to 1 at field capacity). The adjustment curve (dashed line) shows that the lower the soil water index, the lower is this ratio, and the higher is the sensitivity of actual evapotranspiration change to a soil water-content change. As evapotranspiration change between present and future climate is, in summer, negatively correlated to the daily minimum temperature change (correlation coefficient of about -0.6), this implies that a decrease in soil water content in summer, accompanying climate change, will be associated with a greater increase in temperature wherever the soil water index is low. This is confirmed in Fig. 2, since the points that exhibit the greater warming (red circles) are generally associated with the lower soil-water index. A greater sensitivity of surface evapotranspiration to soil-water change in drier areas can thus be at the origin of temperature-change spatial variability and thus of the possibility to detect a climate-change signal for the summer daily minimum temperature. This mechanism needs to be confirmed in the real world, but this seems to occur according to preliminary results obtained with observation-derived soil water content [15].

1. Les résultats des modèles et leur interprétation

1.1. Le cycle hydrologique à l'échelle planétaire

Les exercices d'intercomparaison de simulations de scénarios du changement climatique induit par une augmentation des émissions anthropiques de gaz

à effet de serre permettent de donner une première idée de l'impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique. Dans le cadre du projet international *Coupled-Model Intercomparison Project* (CMIP), Covey et al. [2] ont analysé les résultats de 18 modèles couplés océan-atmosphère simulant l'impact climatique d'une augmentation de la concentration du CO_2 atmosphérique à un taux régulier de 1 % par an. Les modèles simulent en moyenne une augmentation des précipitations totales sur la planète de l'ordre de $0,07 \text{ mm j}^{-1}$ sur une période de 60 ans, à comparer à l'estimation des précipitations totales déduites d'observations, qui se situe entre $2,66$ et $2,82 \text{ mm j}^{-1}$, suivant différentes sources [18]. Si l'augmentation des précipitations totales reste limitée, cela pourrait être dû, d'après Yang et al. [19], à la compétition entre un mécanisme de réduction des précipitations, lié à la réponse de l'atmosphère au réchauffement radiatif impliqué par l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, et un mécanisme d'amplification des précipitations, associé au réchauffement de la surface, qui est toutefois dominant. Cette augmentation limitée des précipitations totales masque aussi des disparités importantes suivant les régions de la planète considérées et suivant les saisons. Lorsque les changements moyens de précipitations simulés sont rapportés à l'écart entre les précipitations simulées par les différents modèles, certains traits caractéristiques communs apparaissent en effet clairement. Les moyennes et hautes latitudes, tant de l'hémisphère nord que de l'hémisphère sud, tant sur l'océan que sur les continents, connaîtraient ainsi des augmentations de précipitations significatives. Bien que moins faciles à distinguer de la variabilité inter-modèle, les tendances à l'augmentation des précipitations le long de la zone de convergence intertropicale et à la diminution des précipitations dans les régions intertropicales se dégagent aussi de l'analyse. Cette répartition géographique des changements de précipitations simulés donne l'image simplifiée d'un cycle hydrologique atmosphérique plus contrasté, les précipitations étant généralement augmentées dans les régions où elles sont déjà importantes et diminuées là où elles sont plus faibles. Cette image est effectivement confirmée lorsque les tendances sur le terme complémentaire du bilan de l'eau atmosphérique, à savoir l'évaporation en surface ou l'évapotranspiration sur les régions continentales, sont examinées de manière conjointe.

Les tendances simulées sur la différence entre précipitations et évaporation en surface, une mesure du transfert d'eau de l'atmosphère vers la surface, vont en effet dans le sens d'une humidification des régions humides et d'un assèchement des régions sèches.

Il faut bien sûr nuancer cette conclusion par trop simplificatrice. Il est d'abord légitime de se demander si ce résultat est robuste, compte tenu de la difficulté des modèles à reproduire avec précision les précipitations observées. Le processus de formation des pluies est, en effet, fondamentalement un processus microphysique, mettant en jeu des mécanismes physico-chimiques complexes (activation des noyaux de condensation, interactions entre vapeur d'eau, eau liquide et glace, etc.). Ce type de processus ne peut être reproduit dans un modèle climatique qu'au travers de paramétrisations, qui ne représentent que leurs effets à grande échelle. Les contraintes dynamiques sur les processus de condensation s'exercent aussi, en particulier dans les régions tropicales, à l'échelle de cellules convectives, dont les dimensions sont très inférieures aux échelles résolues par les modèles. Mais, du fait de l'importance des contraintes dynamiques et thermodynamiques de grande échelle sur les processus microphysiques et la dynamique nuageuse, les modèles arrivent cependant à reproduire de façon satisfaisante la distribution des précipitations observées à l'échelle planétaire. C'est à la composante de la modification du cycle hydrologique, qui est liée aux processus les mieux décrits par les modèles, que l'on aura naturellement tendance à attribuer le plus de crédit. Or, les changements de précipitations induits par une augmentation de la concentration en CO₂ semblent pouvoir être interprétés à grande échelle par une modification des contraintes dynamiques et thermodynamiques que les modèles reproduisent de manière cohérente. Il s'agit, par exemple, d'une intensification de la circulation de Hadley intertropicale [10] ou d'une augmentation de la quantité d'eau contenue par l'atmosphère, notamment aux moyennes latitudes.

Dans une étude récente, Douville et al. [3] ont détaillé la réponse des différentes composantes du cycle hydrologique dans une simulation de scénario de changement climatique induit par une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, conforme au scénario d'émission dit B2 du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) [16]. Des calculs effectués avec un mo-

dèle du cycle du carbone conduisent, pour ce scénario, à une concentration de 611 ppmv de CO₂ en 2100, au lieu de 1052 ppmv pour le scénario CMIP sur la base d'une concentration de 352 ppmv en 1990. La réponse en termes de changement de précipitations est bien conforme à celle exposée précédemment. Mais cette étude permet aussi de montrer que l'intensification du cycle hydrologique à l'échelle planétaire ne s'accompagne pas d'une accélération, mais, au contraire, d'un ralentissement de ce cycle. Le temps moyen de résidence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, évalué comme le rapport entre le contenu total en vapeur d'eau et le taux de précipitations, a en effet, sur la plupart des régions, tendance à augmenter dans le climat simulé d'ici à la fin de ce siècle. Ce résultat, obtenu avec un modèle couplé océan-atmosphère particulier, devra être bien sûr confirmé dans d'autres simulations de scénarios de changement climatique.

1.2. Le cycle hydrologique à l'échelle européenne

Si les modèles représentent de façon relativement cohérente l'impact des changements climatiques sur le cycle hydrologique à l'échelle planétaire, les incertitudes sur la représentation des mécanismes mis en jeu dans les changements climatiques, aux échelles continentales et sous-continentales, sont une source importante d'incertitude sur le cycle hydrologique à ces échelles [13]. L'analyse présentée ici, qui ne porte que sur les résultats de la simulation déjà évoquée [3], n'a de sens que dans la mesure où ces résultats sont représentatifs de cas plus généraux, ce que nous tenterons de préciser dans la suite.

Cette simulation met en évidence un impact du changement climatique sur les précipitations en Europe conforme à celui qui est noté en général aux moyennes latitudes [3]. En hiver, l'augmentation des précipitations est plus importante sur l'Europe du Nord, mais cette augmentation n'est pas compensée par l'augmentation de l'évapotranspiration. Ce sont les changements associés aux termes de transport par la circulation qui permettent d'équilibrer le bilan de l'eau atmosphérique. Il est intéressant de noter que, si l'augmentation de l'apport d'eau au-dessus de l'Europe est essentiellement liée à la circulation moyenne atmosphérique, qui transporte un air océanique plus humide dans le climat plus chaud, les changements du transport par les perturbations, ou plus précisément de

la convergence de ce transport, ont souvent un effet du même ordre de grandeur. Ils contribuent à étendre la région d'augmentation des précipitations vers le Nord de l'Europe. C'est l'importance de ces termes de transport dans le bilan qui peut expliquer la sensibilité des changements climatiques simulés en Europe en hiver à la représentation du rail des dépressions par les modèles [14].

En été, dans la simulation de scénario de changement climatique analysée par Douville et al. [3], les changements du transport de l'eau atmosphérique vont au contraire dans le sens d'une diminution de l'eau disponible pour former des précipitations au-dessus de l'Europe. Malgré une augmentation de l'évaporation de surface, toutefois plus faible qu'en hiver, les précipitations diminuent faiblement, en conformité avec les résultats de la plupart des simulations de scénario de changement climatique réalisées avec d'autres modèles couplés de basse résolution [8]. À noter que des simulations de scénario de changement climatique réalisées récemment avec une dizaine de modèles climatiques régionaux européens, sous la contrainte d'un scénario de concentrations issu du scénario d'émission dit A2 du GIEC (concentration en CO₂ de 836 ppmv en 2100), indiquent de manière cohérente une diminution des précipitations estivales, plus marquée sur le Sud de l'Europe (Michel Déqué, communication personnelle). La diminution des pluies estivales s'explique ici par une diminution, plus importante en été qu'aux autres saisons, de l'efficacité du processus de formation des précipitations, en conformité avec le ralentissement du cycle hydrologique. L'origine et l'importance de ce mécanisme de modification de l'efficacité des pluies restent à évaluer dans d'autres simulations de scénarios de changement climatique.

L'évolution du cycle hydrologique de surface sous l'effet du changement climatique a aussi été analysée par Douville et al. [3]. Ils concluent que la fonte plus précoce de la neige devrait conduire en Europe à un avancement du pic printanier des écoulements. L'humidité des sols serait augmentée en hiver, particulièrement sur le Nord de l'Europe, à la fois du fait de l'augmentation des précipitations et de cette fonte plus précoce. En été, au contraire, l'humidité des sols devrait diminuer, en liaison avec l'augmentation de l'évaporation, notamment au printemps, et avec la baisse des précipitations estivales. Le changement climatique aurait donc pour effet moyen de renforcer le

cycle saisonnier de l'humidité des sols. Cependant, les auteurs soulignent le caractère encore plus incertain de l'évaluation des impacts sur le cycle hydrologique continental que sur le cycle hydrologique atmosphérique, en particulier en raison des incertitudes qui portent sur la représentation des écoulements à l'échelle décrite par les modèles climatiques. Il en est de même pour la représentation de l'impact des changements climatiques sur les débits des fleuves, dont les estimations dépendent fortement de la résolution du modèle utilisé [13]. Quelques études de régionalisation des impacts des changements climatiques sur les débits de fleuves français, conduites au moyen de modèles hydrologiques détaillés, vont dans le sens d'une amplification du cycle saisonnier des débits (voir par exemple Etchevers et al. [4]). Mais, ici aussi, les études sont trop peu nombreuses pour qu'on puisse conclure quant à la généralité des résultats.

2. Changements climatiques et précipitations extrêmes

L'impact des changements climatiques sur les événements extrêmes de précipitations est très difficile à évaluer à partir des simulations de scénarios de changement climatique. En effet, lorsque ces événements sont d'origine convective, ils se situent à une échelle non résolue par les modèles. Lorsqu'ils sont associés à des passages répétés de perturbations à nos latitudes, leur représentation dépend de l'aptitude des modèles à reproduire l'occurrence des régimes de temps associés. Dès lors, il s'agit souvent d'extrapoler les résultats portant sur des situations que les modèles reproduisent correctement à des situations que le modèle ne reproduit qu'imparfaitement. De plus, la définition des extrêmes est inhérente au choix de la méthode utilisée pour en calculer l'évolution. L'impact ainsi estimé des changements climatiques sur les événements extrêmes dépend donc aussi de la méthodologie employée pour le caractériser.

Une première méthode, mise en application par Kharin et Zwiers [9], consiste à définir les extrêmes à partir de l'ajustement des paramètres de lois statistiques de distribution des événements extrêmes sur les résultats des simulations pour différentes périodes d'une vingtaine d'années. Cette méthode permet de s'affranchir de la nécessité de disposer de très longues

simulations pour déterminer l'impact du changement climatique sur les extrêmes, ou de jeux de données de très longues durées pour valider les simulations sur le climat présent. Elle présente, bien sûr, toutes les limites d'une extrapolation de résultats à partir de lois statistiques dont la validité ne peut être complètement vérifiée, faute de disposer de séries de données quotidiennes observées multicentennaires de qualité suffisante. À titre d'exemple, ces auteurs ont évalué la valeur du seuil de précipitations définissant les événements dont la durée de retour moyenne est de 20 ans, à la fois pour le climat présent et pour le climat futur, calculé suivant un scénario de concentration analogue à celui des scénarios CMIP (CO_2 augmentant au rythme de 1 % par an). Ils concluent qu'à l'échelle planétaire, ces valeurs s'accroîtraient de 8 et 14 % par rapport au climat actuel, respectivement aux horizons 2040–2060 et 2080–2100. Cette augmentation serait plus importante que celle des précipitations moyennes, qui n'augmenteraient, sur les mêmes périodes, que de 1 et 4 %, respectivement.

Une autre méthode de détermination de l'évolution des extrêmes consiste à définir ces événements à partir d'une estimation de l'écart type de la distribution des précipitations du climat actuel. Cette méthode a été mise en application par Palmer et Räisänen [12] sur les

résultats des simulations CMIP évoquées dans la précédente section. Ils calculent que la probabilité pour que les précipitations hivernales dépassent la moyenne de deux fois la valeur de l'écart type actuel passerait d'environ 2,5 % actuellement à environ 15 % sur l'Europe du Nord à la fin de la période simulée. En France, le facteur d'augmentation de cette probabilité serait compris entre 2 et 5. Nous avons appliqué cette même méthode aux précipitations quotidiennes issues de deux simulations de scénarios de changement climatique régional utilisant le modèle ARPEGE-Climat, à résolution augmentée sur l'Europe et la Méditerranée [6]. L'intérêt d'utiliser, pour ce type de diagnostic, un modèle dont la dimension de maille élémentaire est plus petite que celle des modèles couplés globaux du type de ceux utilisés dans CMIP (environ 50 km au lieu de 250 à 300 km) est que la représentation de la distribution des intensités des précipitations y est généralement améliorée. À titre d'exemple, une analyse conduite par Frei et al. [5] sur les Alpes montre que les modèles climatiques régionaux, dont ARPEGE-Climat à résolution variable, sont à même de reproduire de façon satisfaisante la distribution des intensités des précipitations quotidiennes, avec toutefois une tendance à la sous-estimation des événements estivaux les plus intenses. Les modèles couplés glo-

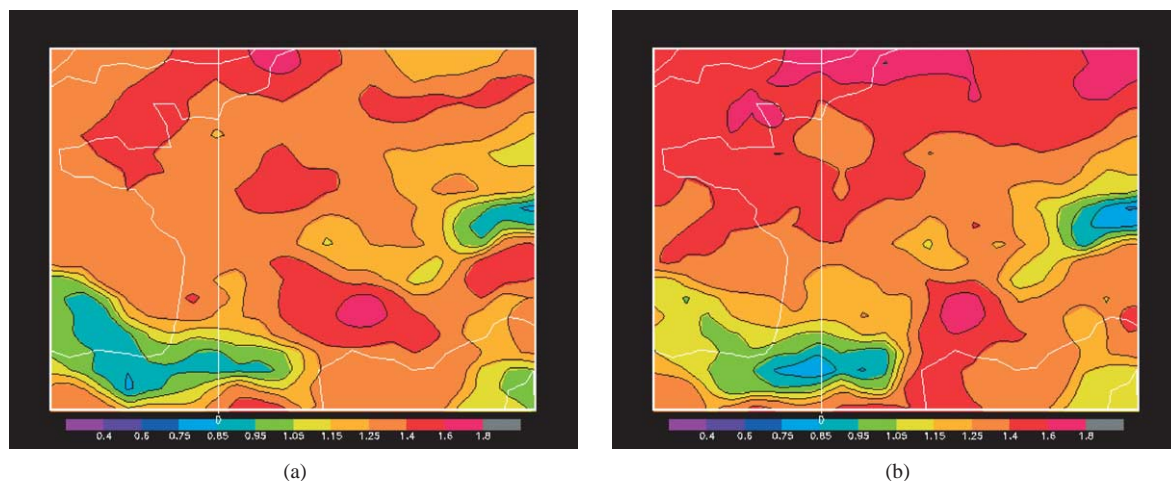


Fig. 1. Rapport entre la probabilité de précipitations quotidiennes extrêmes (voir texte) en hiver (décembre–janvier–février) à la fin du XXI^e siècle (2071–2100) et la même probabilité à la fin du XX^e siècle (1961–1990), dans les cas d'un scénario B2 (a) et d'un scénario A2 (b) du GIEC.

Fig. 1. Ratio between the probability of extreme daily precipitation (see text) in winter (December–January–February) at the end of the 21st century (2071–2100) and the same probability at the end of the 20th century (1961–1990), in the cases of scenario B2 (a) and of scenario A2 (b) of IPCC.

baux de basse résolution ont, quant à eux, le défaut fréquent de surestimer la fréquence des faibles précipitations et de sous-estimer la fréquence des fortes précipitations, quelle que soit la saison [8]. La Fig. 1 reproduit le rapport entre la probabilité des précipitations quotidiennes hivernales en France extrêmes au sens défini plus haut, entre le climat futur (période 2071–2100) et le climat actuel. Pour les deux scénarios d'émissions considérés (A2 et B2 du GIEC), l'augmentation de cette probabilité n'excède en général pas 60%. Sur certaines régions de montagnes (Pyrénées, Alpes du Nord), on note aussi une très légère diminution de la probabilité. Bien que ces résultats dépendent du modèle utilisé, l'importante différence avec ceux obtenus par Palmer et Räisänen [12] conduit à considérer la résolution du modèle climatique utilisé et la résolution temporelle des données analysées comme des éléments déterminants du calcul. Selon la même méthode appliquée au cas des pluies quotidiennes estivales, la probabilité de précipitations extrêmes estivales diminuerait, dans la plupart des régions, d'un taux pouvant atteindre environ 40%. En conformité avec une autre étude conduite avec un autre modèle climatique régional appliqué à l'Europe [1] pour le scénario B2, une augmentation très localisée de la probabilité d'un été humide peut accompagner une diminution de la moyenne des précipitations estivales (non montré). Il faut cependant rappeler que, dans ce cas, les extrêmes de pluies sont d'origine convective et sont moins bien reproduits par les modèles que ne le sont les extrêmes hivernaux. La méthode s'avère, par ailleurs, inappropriée à l'étude des événements de pluies quotidiennes les plus faibles, en raison de l'importance de la valeur de l'écart type par rapport à la moyenne.

Une troisième méthode a également été récemment mise en œuvre dans le cadre du projet IMFREX (Impact des changements anthropiques sur la fréquence des phénomènes extrêmes de vent, de température et de précipitation). Cette méthode consiste à corriger les distributions des intensités des pluies simulées par comparaison avec les distributions des intensités de pluie observées. En chaque point d'une station d'observation météorologique française comportant une longue série d'observations contrôlées des précipitations quotidiennes, les précipitations quotidiennes simulées pour le climat actuel au point du modèle le plus proche sont corrigées, de façon à re-

produire exactement la fréquence des intensités observées. Ces mêmes corrections sont ensuite appliquées à la distribution des intensités simulée en ce point pour le climat futur, en faisant l'hypothèse d'invariance des corrections. L'application de ce mode de calcul permet de montrer, par exemple, que la fréquence de dépassement du seuil de 20 mm j^{-1} en hiver serait multipliée par un facteur le plus souvent inférieur à 2, dans des simulations de scénarios de type A2 réalisées à partir des modèles climatiques régionaux de Météo-France (trois simulations différentes de celles mentionnées précédemment) et de l'institut Pierre-Simon-Laplace (Laurent Li, communication personnelle).

L'ensemble de ces résultats montre que, si l'évaluation des changements sur les extrêmes de précipitations dépend de la méthode statistique employée, elle dépend aussi de la nature des modèles utilisés et, plus particulièrement, de leur résolution.

3. Cycle hydrologique et détection des changements climatiques

Nous analysons dans cette section des résultats de simulations de scénarios régionaux de changement climatique, qui montrent que le cycle hydrologique, agissant sur l'amplitude des changements climatiques, peut être à l'origine de la possibilité de détecter ces changements dans les observations récentes en France.

Le point de départ de cette analyse est la détection d'un signal de changement climatique sur les températures minimales journalières observées en France au cours des dernières décennies, qui se distingue de la variabilité interne du climat [14,17]. Cette détection est fondée sur l'utilisation d'une méthode statistique, dite de l'« empreinte digitale » [7], permettant de mettre en évidence une corrélation entre la tendance observée sur 30 ans de ces températures et le signal de changement climatique calculé dans un ensemble de simulations de scénarios climatiques régionaux utilisant le modèle ARPEGE-Climat, à résolution augmentée sur l'Europe et la Méditerranée. Bien que le niveau de confiance de la détection d'un signal calculé à partir de cette méthode soit de 90%, cela n'exclut cependant pas la possibilité d'une ressemblance fortuite entre le modèle et les observations. L'analyse du cycle hydrologique dans les simulations de scénarios

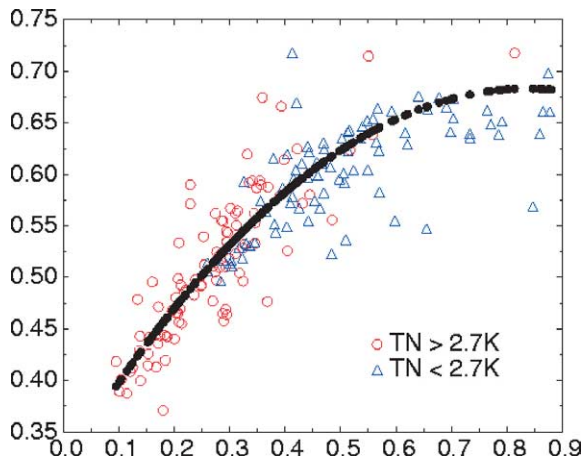


Fig. 2. Rapport entre les évapotranspirations réelle et potentielle en moyenne estivale de la première année simulée, en fonction de l'indice d'humidité du sol correspondant. Les cercles rouges correspondent aux points du modèle localisés en France, où la température minimale journalière d'été simulée augmente de plus de 2,7 K, entre le climat présent et la fin du XXI^e siècle; les triangles violets correspondent aux points pour lesquels ce seuil n'est pas franchi. La courbe en pointillé représente un ajustement sur l'ensemble des points.

Fig. 2. Ratio between actual and potential evapotranspiration in summer of the first simulated year, as a function of the corresponding soil water index. The red circles correspond to the model points in France with a warming of summer daily minimum temperature, between present climate and the end of 21st century, greater than 2.7 K; the purple triangles correspond to the points where the warming is lower. The dashed line is an adjustment curve to the ensemble of points.

de changement climatique et à partir des observations permet cependant d'obtenir une confirmation indirecte de la réalité de cette détection.

Dans les simulations de scénarios régionaux de changement climatique réalisées avec le modèle régional, nous avons en effet pu montrer que la répartition de l'augmentation des températures minimales d'été pouvait être interprétée par les variations d'évapotranspiration en surface et, plus précisément, de la sensibilité de la réponse de l'évapotranspiration à un changement d'humidité des sols donné. La Fig. 2 illustre ce résultat. Cette figure représente la moyenne estivale, pour la première année simulée (1960), du rapport entre l'évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration potentielle aux différents points de calcul du modèle, en fonction de l'indice d'humidité du sol correspondant. L'indice d'humidité du sol est une

mesure de l'eau utilisable par la végétation, puisqu'il s'agit ici de la différence entre le contenu en eau du sol actuel et le contenu en eau du sol au point de flétrissement de la végétation, rapportée à la valeur maximale de cette différence lorsque le contenu en eau du sol se situe à la capacité au champ (en conditions proches de la saturation, mais après écoulement gravitaire). L'évapotranspiration potentielle étant définie ici comme l'évapotranspiration du sol en conditions de saturation de la surface, toutes choses égales par ailleurs, le rapport des deux évapotranspirations représente la contrainte sur l'évapotranspiration réelle induite par le contenu en eau du sol. La courbe en pointillé est une courbe d'ajustement sur les différents points, qui montre que, plus le sol est sec, plus l'augmentation (la diminution) d'évapotranspiration réelle consécutive à une humidification (un assèchement) donnée du sol est importante. Or, c'est aussi lorsque le sol est plus sec dans le climat actuel simulé que le réchauffement des températures minimales d'été entre le climat actuel et le climat de la fin du XXI^e siècle est le plus fort (cercles rouges sur la Fig. 2). Cette différence de réchauffement peut donc pour partie s'interpréter comme le résultat d'une plus forte sensibilité, lorsque le sol est déjà sec, de la diminution d'évapotranspiration à la diminution du contenu en eau du sol estival résultant du changement climatique. En effet, la diminution d'évapotranspiration favorise le réchauffement et ce mécanisme est dominant sur le changement climatique comparé, en particulier, aux processus radiatifs ou à l'advection d'air au-dessus de la surface, comme le montre la corrélation négative entre les changements d'évapotranspiration et ceux des températures minimales journalières (coefficient de corrélation d'environ $-0,6$ sur la France). Il reste à vérifier que ce mécanisme agit aussi dans le monde réel, ce qui semble être effectivement le cas d'après une étude préliminaire fondée sur des reconstitutions de contenus en eau à partir d'observations [15].

Le cycle hydrologique, au travers de la répartition géographique des humidités de surfaces continentales, semble donc parfois jouer un rôle dominant dans la répartition géographique du réchauffement climatique. Il paraît être, de ce fait, à l'origine de la possibilité de détecter un signal de changement climatique, observé en France sur les tendances de températures minimales d'été.

4. Conclusion

Les intercomparaisons des simulations de scénarios climatiques montrent, de manière cohérente, une intensification du cycle hydrologique à l'échelle planétaire dans un climat futur, en liaison avec l'augmentation de l'évaporation océanique due à l'augmentation de la température de surface. Cependant, l'analyse détaillée d'une simulation particulière semble indiquer que cette intensification s'accompagne, dans la plupart des régions, d'un ralentissement de ce cycle, en liaison avec une diminution de l'efficacité du mécanisme de formation des précipitations [3]. Il conviendrait de vérifier que la plupart des modèles présentent le même type de réponse. Il faut aussi s'interroger sur l'impact du changement climatique sur les processus microphysiques qui jouent aussi un rôle déterminant dans le processus de formation des précipitations (rôle des aérosols, modification des interactions entre les phases de l'eau, etc.). Ces processus étant encore mal reproduits par les modèles climatiques de grande échelle, il sera nécessaire de conduire des études plus détaillées, en particulier avec des modèles de moyenne échelle résolvant les cellules nuageuses. L'analyse déjà mentionnée fait aussi apparaître que la source des changements de précipitations varie suivant la région et la saison. Au-dessus de l'Europe, en hiver, ces précipitations sont principalement d'origine dynamique, faisant intervenir l'échelle des perturbations atmosphériques, tandis qu'en été, une des sources importantes est une décroissance accrue de l'efficacité des processus de formation des pluies. La réponse du cycle hydrologique continental européen est, quant à elle, marquée par l'avancement du pic de fonte nivale et par l'amplification du cycle saisonnier des humidités de surface, du fait de l'amplification du cycle saisonnier des précipitations.

La cohérence de la réponse du cycle hydrologique, simulée par les différents modèles, est en général beaucoup moins forte à l'échelle sub-continentale qu'à l'échelle planétaire. La dispersion des résultats est particulièrement marquée en ce qui concerne les événements extrêmes de précipitations. Suivant certaines simulations de scénarios régionaux, la probabilité d'occurrence des précipitations extrêmes quotidiennes pourrait augmenter en France et en hiver d'au plus 60%. Ce résultat dépend fortement de la résolution du modèle et de la résolution temporelle des données

analysées, puisqu'une estimation obtenue à partir de modèles couplés de basse résolution suivant la même méthode donne un facteur multiplicatif de la probabilité pour les hivers les plus pluvieux compris entre 2 et 5. Indépendamment des incertitudes sur les modèles, les scénarios d'émissions et les méthodes, nous pouvons cependant conclure que la fréquence d'occurrence des événements extrêmes de précipitations hivernales devrait augmenter sur le Nord de l'Europe et sur la plupart des régions françaises. Cette augmentation devrait être proportionnellement plus importante que celle de la moyenne des précipitations. Par ailleurs, en été, les précipitations extrêmes les plus fortes, qui devraient généralement diminuer, pourraient localement augmenter, malgré la diminution des précipitations moyennes. Ce dernier résultat dépend lui aussi fortement du scénario et du modèle considéré.

Le cycle hydrologique pourrait jouer un rôle important sur la détection de signaux de changement climatique, comme le cas des températures minimales d'été en France semble le montrer. Au-delà de cette question, celle de la détection du changement dans le cycle hydrologique lui-même mérite d'être posée. Les études conduites jusqu'à ce jour avec les résultats de longues séries de données de précipitations se sont avérées infructueuses. Il n'est cependant pas exclu que cette détection devienne possible à partir de paramètres intégrés tels que les débits des fleuves, comme une étude sur la fréquence d'occurrence des inondations des grands fleuves mondiaux semble le suggérer [11].

Références

- [1] C. Covey, K.M. AchutaRao, U. Cubasch, P. Jones, S.J. Lambert, M.E. Mann, T.J. Phillips, K.E. Taylor, An overview of results from the Coupled Model Intercomparison Project, *Global Planet. Change* 37 (2003) 103–133.
- [2] J.H. Christensen, B. Christensen, Climate modelling: severe summertime flooding in Europe, *Nature* 421 (2003) 805–806.
- [3] H. Douville, F. Chauvin, S. Planton, J.-F. Royer, D. Salas-Méla, S. Tyteca, Sensitivity of the hydrological cycle to increasing amounts of greenhouse gases and aerosols, *Clim. Dyn.* 20 (2002) 45–68.
- [4] P. Etchevers, C. Golaz, F. Habets, J. Noilhan, Impact of a climate change on the Rhone River catchment hydrology, *J. Geophys. Res.* 107D (16) (2002) 4316.
- [5] C. Frei, J.H. Christensen, M. Déqué, D. Jacob, R.G. Jones, P.L. Vidale, Daily precipitation statistics in regional climate models: evaluation and intercomparison for the European Alps, *J. Geophys. Res.* 108D (3) (2003) 4124.

- [6] A.-L. Gibelin, M. Déqué, Anthropogenic Climate Change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model, *Clim. Dyn.* (2003) 327–339.
- [7] G.C. Hegerl, H. Von Storch, K. Hasselmann, B.D. Santer, U. Cubash, P.D. Jones, Detecting greenhouse-gas-induced climate change with an optimal fingerprint method, *J. Clim.* 9 (1996) 2281–2306.
- [8] J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, University Press Cambridge, Cambridge, UK, 2001.
- [9] V.V. Kharin, F.W. Zwiers, Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere–ocean GCM, *J. Clim.* 13 (2000) 3760–3788.
- [10] H. Le Treut, Les scénarios globaux de changement climatique et leurs incertitudes, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 525–533.
- [11] P.C. Milly, R.T. Wetherald, K.A. Dunne, T.L. Delworth, Increasing risk of great floods in a changing climate, *Nature* 415 (2002) 514–517.
- [12] T.N. Palmer, J. Räisänen, Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate, *Nature* 415 (2002) 512–514.
- [13] S. Planton, Scénarios de changement climatique et impacts sur l'hydrologie, *La Houille Blanche* 8 (2002) 73–77.
- [14] S. Planton, À l'échelle des continents, le regard des modèles, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 535–544.
- [15] S. Planton, B. Spagnoli, Quand la simulation numérique reproduit et explique le réchauffement des nuits d'été, *La Météorologie*, 8^e série 42 (2003) 4–5.
- [16] J.-F. Royer, D. Cariolle, F. Chauvin, M. Dequé, H. Douville, R.M. Hu, S. Planton, A. Rascol, J.-L. Ricard, D. Salas-Melia, F. Sevault, P. Simon, S. Somot, S. Tyteca, L. Terray, S. Valcke, Simulation des changements climatiques au cours du XXI^e siècle incluant l'ozone stratosphérique, *C. R. Geoscience* 334 (2002) 147–154.
- [17] B. Spagnoli, S. Planton, M. Déqué, O. Mestre, J.-M. Moisselin, Detecting climate change at the regional scale: the case of France, *Geophys. Res. Lett.* 29 (10) (2002) 1450.
- [18] P. Xie, P. Arkin, Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs, *Bull. Am. Meteor. Soc.* 78 (1997) 2539–2558.
- [19] F. Yang, A. Kumar, M.E. Schlesinger, W. Wang, Intensity of hydrological cycles in warmer climates, *J. Clim.* 16 (2003) 2419–2423.