

Réponse du cycle hydrologique aux forçages anthropiques

Que nous disent les dernières simulations du Giec ?

Hervé Douville⁽¹⁾ et Pascal Terray⁽²⁾

(1) Météo-France - Centre national d'études et de recherches météorologiques (CNRM)
42, avenue Gaspard Coriolis - 31057 Toulouse Cedex 01
herve.douville@meteo.fr

(2) Lodyc-IPSL - Université Pierre et Marie Curie - Paris

Ndlr Cet article est la reprise du chapitre 5 du rapport Escrime, publication collective de la communauté des chercheurs français dans le domaine du changement climatique (voir la présentation dans *La Météorologie* 56, page 26).

Résumé

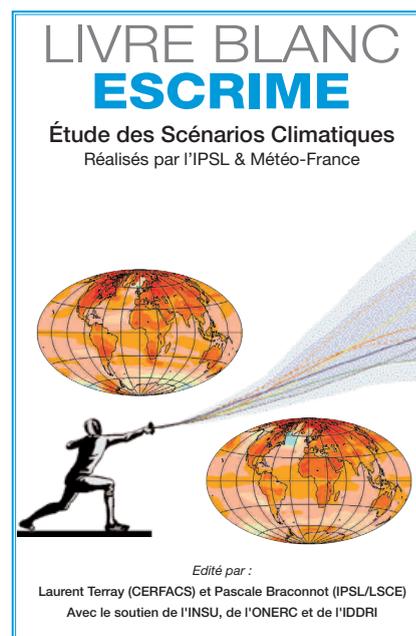
L'objectif de cet article est de dresser un bref inventaire des principaux résultats publiés depuis le 3^e rapport d'évaluation du Giec et de situer la contribution de la communauté française sur le thème de la réponse du cycle hydrologique aux forçages anthropiques pris en compte dans les scénarios climatiques du XXI^e siècle.

Abstract

Response of the hydrological cycle to anthropic forcing: What tell the last IPCC simulations?

The aim of this article is to make an inventory of the main results published since the IPCC 3rd Assessment report and to the french community contribution on the response of the hydrological cycle to the anthropic forcings taken into account in the climatic scenarios of the 21st century.

La réponse du cycle hydrologique aux forçages anthropiques est, pour de nombreuses raisons, beaucoup plus difficile à prévoir que celle des températures. Au-delà des inconnues liées aux différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre⁽¹⁾, qui jouent principalement sur l'amplitude des anomalies simulées, les projections hydrologiques globales demeurent très variables d'un modèle à l'autre. Il s'agit là d'incertitudes beaucoup plus fondamentales et problématiques que celles associées aux forçages, car la réponse d'un modèle particulier ne peut être déduite des autres modèles. Dans certains cas, c'est le signe même des impacts hydrologiques à grande échelle qui reste incertain. Les incertitudes sont cependant réparties de manière très hétérogène. Elles sont importantes en ce qui concerne les précipitations tropicales, notamment sur l'Afrique de l'Ouest. Elles sont généralement plus faibles aux moyennes et hautes latitudes, en particulier sur l'Europe, où la plupart des modèles s'accordent pour prévoir un assèchement estival marqué au Sud et une augmentation des précipitations hivernales au Nord. Globalement, on semble se diriger vers une accentuation des contrastes hydrologiques spatio-temporels qui devrait se traduire par une multiplication et une intensification des inondations et des sécheresses. Cependant, de nombreux points restent encore à éclaircir concernant la nature exacte et la répartition régionale des impacts, montrant la nécessité de mieux contraindre la réponse hydrologique des modèles. Cette tâche prioritaire demeure extrêmement difficile pour deux raisons principales :



- la multiplicité et le caractère parfois grossier des paramétrisations physiques qui contrôlent l'état actuel et la sensibilité du cycle hydrologique ;
- le manque de résultats probants concernant la détection des changements hydrologiques, du fait de l'insuffisance des observations, des faiblesses des modèles, des incertitudes sur les forçages anthropiques du XX^e siècle et de leurs effets parfois antagonistes sur les précipitations.

(1) Pour les scénarios d'émission du Giec, voir Dufresne et al., 2007. Le scénario A2 est « pessimiste », le scénario B1 « optimiste » et le scénario A1B « moyen ».

Réponse globale

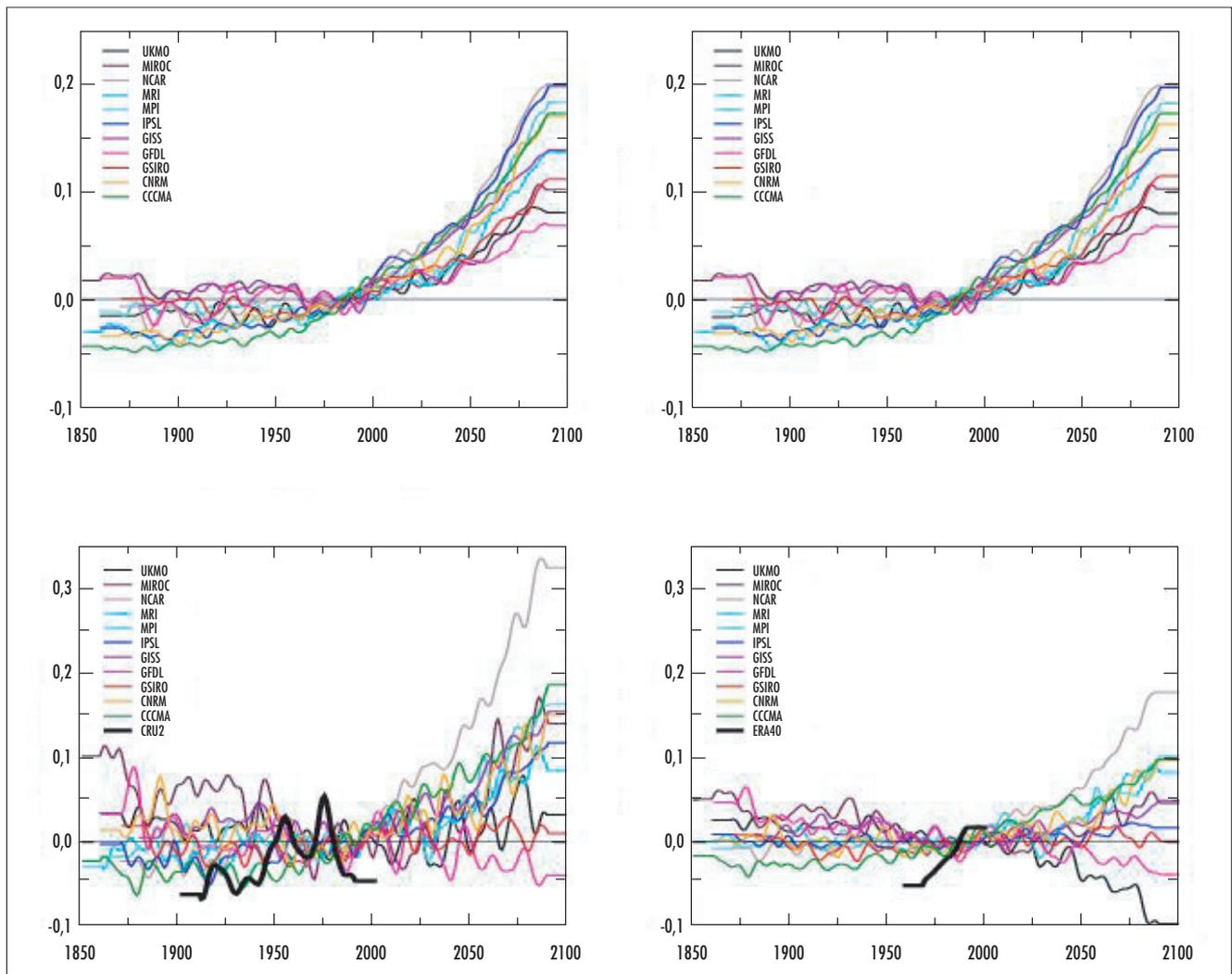
L'intensification à long terme du cycle hydrologique global en réponse à l'accroissement de l'effet de serre ne fait plus guère de doute. Modèles et observations suggèrent en effet que le réchauffement global de la planète se fait à humidité relative quasi constante, c'est-à-dire avec une augmentation significative de la vapeur d'eau présente dans la troposphère. Il faut cependant noter que cette intensification s'accompagne dans les modèles d'un ralentissement du cycle de l'eau, déjà constaté dans les précédents scénarios climatiques réalisés au CNRM (Douville et al., 2002). Il faut aussi remarquer que l'augmentation des précipitations globales n'est pas encore clairement observée, notamment en raison de la couverture très partielle du réseau d'observation conventionnel et d'une diminution des précipitations tropicales continentales pendant la seconde

moitié du xx^e siècle. Cela ne remet pas nécessairement en cause les projections climatiques basées sur les modèles couplés océan-atmosphère. D'une part, la diminution des pluies tropicales continentales est correctement reproduite par certains modèles atmosphériques, qu'ils soient forcés par des températures de surface de la mer (TSM) observées (Kumar et al., 2004) ou couplés à un modèle océanique et forcés par des concentrations observées de gaz à effet de serre (Wang et Lau, 2006). D'autre part, la relative convergence des modèles couplés sur l'accroissement des précipitations globales ne se manifeste qu'à la fin du xx^e siècle et disparaît lorsqu'on se limite au domaine continental (figure 1). Les principales sources d'incertitude recensées concernent la paramétrisation des effets directs et indirects des aérosols anthropiques (Liepert et al., 2004 ; Ramanathan et al., 2006), la répartition spatiale des anomalies de TSM sous les

tropiques (Douville, 2006a ; Barsugli et al., 2006), ainsi que la simulation des téléconnexions entre précipitations et TSM tropicales (Douville et al., 2006 ; Joly et al., 2006).

Une autre interrogation majeure concerne la réponse de l'évaporation globale. La plupart des modèles s'accordent sur un renforcement de l'évaporation océanique dès le xx^e siècle, mais cette tendance reste difficile à vérifier dans les observations (Liu et Curry, 2006). La réponse continentale est, quant à elle, très variable d'un modèle à l'autre, non seulement en raison des incertitudes déjà évoquées sur les précipitations, mais également en raison de l'introduction de nouvelles paramétrisations dans les modèles, telles que l'effet direct du CO_2 atmosphérique sur la transpiration des plantes. Cet effet tendrait à limiter l'évaporation des surfaces recouvertes de végétation et serait important au point

Figure 1 - Anomalies filtrées (filtre digital passe-bas avec une fréquence de coupure à 10 ans) des précipitations et de l'évaporation annuelles en mm/j relativement à la climatologie 1971-2000 dans les simulations historiques et les scénarios A2 du Giec -AR4 (résultats de divers modèles climatiques). En haut : moyennes globales. En bas : moyennes globales continentales (sauf Antarctique). Sont également tracées à titre indicatif l'évolution des précipitations continentales estimées à partir de la climatologie CRU TS2.1 et l'évolution de l'évaporation continentale estimée à partir des réanalyses ERA40 (à considérer avec beaucoup de prudence).



d'expliquer en partie l'accroissement du ruissellement continental global observé au cours du xx^e siècle (Gedney et al., 2006). Ce résultat doit cependant être considéré avec beaucoup de prudence, tant les observations utilisées sont de qualité insuffisante pour prétendre détecter une éventuelle signature de l'enrichissement atmosphérique en CO₂. Une autre étude, basée sur un ensemble de simulations du Giec, suggère à l'inverse que l'effet radiatif du CO₂ suffit à expliquer une part significative de l'évolution récente des débits des grands fleuves, sans pour autant démontrer que le forçage anthropique soit ainsi clairement détecté (Milly et al., 2005). Concernant enfin l'humidité des sols, les scénarios obtenus varient largement d'un modèle à l'autre, mais ils soulignent majoritairement la possibilité d'une diminution des ressources en eau pendant la saison de croissance des végétaux dans les principales régions agricoles (Wang, 2005).

Devant de tels risques et de telles incertitudes, il est urgent de réfléchir aux moyens de contraindre la réponse hydrologique des modèles couplés dans les scénarios climatiques (Allen et Ingram, 2002). Les simulations paléoclimatiques permettent notamment de tester la sensibilité des modèles à des forçages externes relativement importants. Ces forçages sont malheureusement d'une autre nature que ceux pris en compte dans les scénarios, et la validation ne repose alors que sur des observations indirectes et partielles. Les études de **détection-attribution**⁽¹⁾ représentent une solution potentiellement plus efficace. Néanmoins, le caractère limité des observations disponibles au cours du xx^e siècle et l'importance de la variabilité naturelle des précipitations sont des obstacles majeurs. Une étude récente, basée sur la moyenne globale des précipitations continentales, indique que le signal anthropique n'est détecté que dans la moitié des modèles étudiés (Lambert et al., 2005). La formulation des modèles paraît ainsi plus importante que le raffinement des forçages utilisés pour mettre en évidence une modification du cycle hydrologique.

Au-delà de la comparaison des tendances observées et simulées, la validation de la variabilité interannuelle apparaît

comme une alternative intéressante. Douville et al. (2006) montrent par exemple que les relations précipitations-températures globales mises en évidence à l'échelle interannuelle ont un lien apparent avec la sensibilité hydrologique des modèles au renforcement de l'effet de serre. Ils suggèrent ainsi que l'Enso, qui domine la variabilité naturelle du cycle hydrologique global, pourrait représenter un substitut intéressant du réchauffement global pour tester les modèles. L'étude semble notamment discrediter le modèle le plus sensible en termes de précipitations continentales. La méthode demeure cependant critiquable dans la mesure où les anomalies interannuelles de TSM liées à l'Enso sont réparties de façon beaucoup moins uniforme que dans le cas des scénarios du XXI^e siècle. Douville et al. (2006) tentent de répondre à cette critique en stratifiant les anomalies interannuelles selon leur ressemblance avec les structures tropicales du réchauffement global en surface. Cette stratégie originale s'avère parfois payante, mais reste inopérante lorsque le changement climatique ne se projette pas sur les modes de variabilité interannuelle des TSM.

Contrastes régionaux et variabilité temporelle

En moyenne zonale (figure 2), la réponse des précipitations annuelles dans les scénarios SRES A2 réalisés en vue du 4^e rapport d'évaluation du Giec montre un comportement assez cohérent d'un modèle à l'autre (Douville et al., 2006) :

- accroissement des précipitations aux moyennes et hautes latitudes, accompagné d'un déplacement vers les pôles des maxima de précipitations associés aux rails dépressionnaires (Douville et al., 2002) ;
- diminution dans les régions sub-tropicales ;
- augmentation en zone équatoriale par renforcement des précipitations associées à la zone de convergence inter-tropicale.

(1) *Détection : démonstration que le climat a changé dans un sens statistique défini, sans donner de raison à ce changement. Attribution : établissement des causes les plus probables pour un changement détecté avec un certain niveau de confiance.*

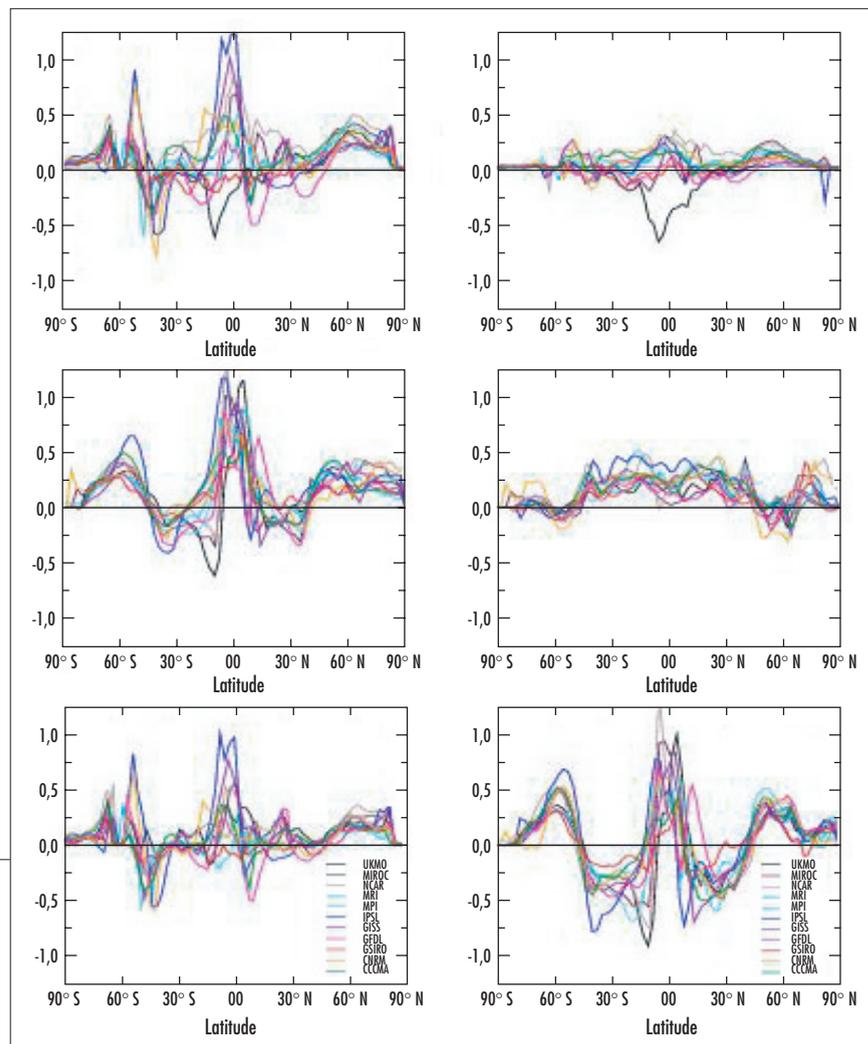


Figure 2 - Moyennes zonales des anomalies annuelles de précipitations (P), d'évaporation (E) et de convergence d'humidité (P-E) sur continent (en haut) et sur océan (en bas) dans les scénarios A2 du Giec -AR4 par comparaison entre les climatologies calculées sur les trente dernières années du xx^e et du XXI^e siècle respectivement.

Sur continent, cette distribution zonale des anomalies doit cependant être nuancée. Elle se superpose à des gradients de plus fine échelle et laisse apparaître des divergences importantes entre les modèles. En zone tropicale, ce n'est pas seulement l'intensité mais aussi le signe des anomalies continentales qui reste incertain. Dans ces régions, une grande partie des pluies annuelles est associée au phénomène de mousson, notamment en Afrique de l'Ouest et au sud de l'Asie. Bien que les modèles montrent en général un affaiblissement de ces circulations de grande échelle, conformément aux études précédemment réalisées au CNRM (Douville et al., 2000b ; Ashrit et al., 2003) et à certains arguments théoriques (Held et Soden, 2006), les précipitations de mousson ne diminuent pas nécessairement dans les scénarios climatiques du XXI^e siècle. Elles tendent plutôt à augmenter sur le sud de l'Asie, tandis que la réponse reste très incertaine sur l'Afrique de l'Ouest (Douville et al., 2006). La difficulté des modèles à reproduire les caractéristiques actuelles des climats de mousson n'est pas la seule explication à la diversité des résultats obtenus. Parmi les autres sources d'incertitudes, le rôle des aérosols semble particulièrement important (Biasutti et Giannini, 2006 ; Held et al., 2006 ; Ramanathan et al., 2006) ainsi que la réponse du Pacifique tropical (Douville et al., 2006 ; Douville, 2006a) ou, dans une moindre mesure, les rétroactions biophysiques potentiellement liées aux surfaces continentales (Douville et al., 2000a).

Aux moyennes et hautes latitudes, la réponse des précipitations est plus consensuelle avec une augmentation en moyenne annuelle (Douville et al., 2006). Les projections sont particulièrement cohérentes sur l'Europe, avec un assèchement marqué sur le Sud et une augmentation plus ou moins importante des précipitations annuelles sur le Nord, la limite entre les deux régions se situant entre 45 et 50° N. De manière générale, les changements régionaux de précipitations prévus dans les nouveaux scénarios réalisés pour le 4^e rapport d'évaluation du Giec semblent plus cohérents que dans la génération précédente (Giorgi et Bi, 2005). La réponse du bilan d'eau en surface reste cependant très incertaine. Elle dépend, non seulement des anomalies de précipitations simulées, mais également de la modélisation du sol et de la végétation. À titre d'exemple, la paramétrisation de la résistance stomatique des plantes influence la réponse de l'évapotranspiration (Gedney et al., 2006), de même que celle du permafrost influence

la réponse du ruissellement aux hautes latitudes (Poutou et al., 2004). Par ailleurs, contrairement à ce qu'indiquent certaines simulations, le réchauffement en surface observé aux moyennes latitudes de l'hémisphère Nord ne s'est, pour le moment, pas encore traduit par un assèchement estival des sols (Robock et al., 2005) ni même par une augmentation de l'évaporation potentielle (Roderick et Farquhar, 2002), si l'on se réfère aux quelques observations disponibles. Le retrait progressif de la couverture neigeuse hivernale observé depuis les années 1970 est, en revanche, reproduit par certains modèles, comme cela avait déjà été mis en évidence dans la précédente génération de scénarios du CNRM (Douville et al., 2002).

Une fois encore, les études de détection-attribution demeurent un outil privilégié pour tester la sensibilité des modèles. Elles demeurent cependant rares à l'échelle régionale, en raison d'une diminution fréquente du ratio signal sur bruit par rapport aux études plus globales. Des tentatives sont cependant en cours pour tenter de mettre à jour des réponses hydrologiques significatives sur l'Afrique de l'Ouest, l'Europe ou même la France dans le cadre du projet français Discendo (www.cerfacs.fr/globc/Discendo). De tels travaux peuvent être complétés par une analyse approfondie de certains scénarios, visant à comprendre les principaux mécanismes qui sous-tendent la réponse hydrologique des modèles à l'échelle régionale (Douville et al., 2002). De ce point de vue, l'étude la plus ambitieuse est probablement celle de Rowell et Jones (2006) visant à dis-

criminer quatre mécanismes susceptibles d'expliquer l'assèchement estival simulé sur l'Europe. En remontant ainsi aux causes des anomalies de précipitations prévues, on peut formuler certaines hypothèses sur leur caractère plus ou moins robuste. La réduction des incertitudes régionales passe également par une approche probabiliste multimodèles. Des réflexions sont en cours pour pondérer chaque scénario selon une métrique susceptible de rendre compte de la qualité des modèles. Le débat sur la métrique idéale reste cependant très ouvert (Collins et al., 2005).

Au-delà des hétérogénéités spatiales, la réponse hydrologique des modèles aux forçages anthropiques montre également des signatures temporelles. On note en particulier un renforcement des contrastes saisonniers, notamment aux moyennes latitudes de l'hémisphère Nord (Douville et al., 2002 ; Wang, 2005), même si cette tendance est difficile à vérifier dans les observations (Robock et al., 2005). De nombreux modèles s'accordent également pour prévoir une augmentation de la variabilité interannuelle des précipitations, notamment dans les régions de mousson, ainsi que des extrema de précipitations mensuelles aux moyennes et hautes latitudes. L'analyse des sorties quotidiennes indique, par ailleurs, un accroissement probable de l'intensité des pluies, déjà perceptible dans les séries observées du XX^e siècle sur la plupart des continents extratropicaux (Groisman et al., 2005 ; Klein Tank et Können, 2003). De tels changements ne sont guère étonnants dans les régions où les cumuls saisonniers tendent à augmenter, étant donné la nature asymétrique

Les inondations, un danger du changement climatique ? (Photo Météo-France)



de la distribution des précipitations quotidiennes. Il serait donc intéressant de distinguer ce qui relève réellement d'un accroissement de la variance de ce qui reflète simplement une augmentation de la moyenne. Nous ne prolongerons pas ici la discussion sur les événements climatiques extrêmes car ils font l'objet d'un chapitre [du livre blanc Escrime, Ndlr] spécifique. Notons toutefois que le renforcement des contrastes spatiaux et saisonniers des précipitations devrait aboutir à un accroissement des risques d'inondations et/ou de sécheresses dans de nombreuses régions du globe. Notons également que les études de détection devraient bénéficier des analyses en cours sur les précipitations quotidiennes, car certains travaux suggèrent que les changements prévus sur les queues de distribution pourraient être plus robustes que les anomalies sur la moyenne des précipitations (Hegerl et al., 2004).

Conclusions

Actuellement, environ un tiers de la population mondiale vit dans des pays considérés comme à risque en ce qui concerne les ressources en eau. En accentuant les contrastes hydrologiques existants, notamment en termes de précipitations, le réchauffement global de la planète pourrait aboutir à une aggravation de la situation. Le changement climatique n'est cependant qu'une facette du problème et l'évolution de la demande en eau, liée notamment à des contraintes démographiques, représente dans certaines régions un danger beaucoup plus important (De Marsily et al., 2006). Par ailleurs, dans les régions où les précipitations annuelles devraient augmenter, l'accroissement des ressources en eau n'est pas garanti si les pluies se concentrent sur une période relativement courte et si la capacité de stockage (réservoirs) ne permet pas de tirer parti de cet excédent. Une augmentation du nombre et de l'intensité des inondations n'est donc pas à exclure, d'autant plus que le changement climatique devrait dans de nombreuses régions s'accompagner d'un accroissement des risques de fortes pluies.

Les simulations climatiques réalisées en vue de la préparation du 4^e rapport d'évaluation du Giec représente un effort sans précédent de la communauté scientifique pour tenter de dégager un consensus sur les conséquences climatiques des forçages anthropiques récents et futurs. Cet objectif n'est cependant atteint que



La sécheresse représente une autre menace. (Photo Météo-France)

partiellement car la multiplication des modèles, si elle permet de tendre vers une approche probabiliste du changement climatique, n'exclut pas la possibilité de réponses parfois antagonistes, sans qu'il soit pour autant aisé de discerner le « vrai » du « faux ». Par ailleurs, si les impacts hydrologiques déjà soulignés par le 3^e rapport d'évaluation se confirment (ce qui est en soi un résultat très positif), le 4^e rapport ne devrait pas fournir de nouveautés majeures sur ce thème, en dehors d'une évaluation des changements climatiques déjà engagés (« *committed climate change* ») et d'une analyse beaucoup plus approfondie des impacts sur la variabilité et les extrêmes.

Ainsi, malgré (ou en raison de ?) la sophistication croissante des outils numériques, les impacts hydrologiques du réchauffement global restent parfois très incertains. Ces incertitudes sont toutefois réparties de manière hétérogène et certaines tendances semblent relativement robustes. Le bassin méditerranéen apparaît ainsi comme une zone particulièrement sensible, où le stress hydrique devrait largement augmenter. Progresser dans la localisation et la quantification des risques hydrologiques demandera encore beaucoup d'efforts. Il s'agit, d'une part, de préciser la réponse climatique de grande échelle en termes de moyenne et de variabilité, d'autre part, de développer des méthodes efficaces de régionalisation des scénarios climatiques, permettant d'évaluer les impacts à une échelle pertinente (cf. chapitre 4 consacré à ce thème). Au-delà des travaux de modélisation, le développement de nouveaux instruments de télédétection permettant un suivi global et régulier de certaines variables hydrologiques est une priorité

pour appréhender l'évolution du cycle de l'eau dans sa globalité et contraindre les modèles utilisés pour produire les scénarios climatiques.

Notons enfin que la réponse du cycle hydrologique est au cœur des multiples questions que soulèvent les perturbations anthropiques du système climatique. Elle présente ainsi des liens étroits avec les autres chapitres de ce rapport. Les rétroactions liées à la branche atmosphérique du cycle hydrologique, et plus particulièrement les nuages, modulent ainsi fortement le réchauffement global simulé par les modèles (Bony et Dufresne, 2005). Les principaux modes de variabilité atmosphérique (Enso, NAO) ont une influence majeure sur les précipitations observées au cours du xx^e siècle dans de nombreuses régions. La réponse de ces modes au réchauffement global est donc déterminante pour comprendre et prévoir celle du cycle hydrologique (Camberlin et al., 2004 ; Terray et al., 2004 ; Douville et al., 2006). Par ailleurs, le couplage entre cycles de l'eau et du carbone semble également devoir être un enjeu majeur, que ce soit pour prévoir la variabilité des émissions de CO₂ (Ciais et al., 2005) ou celle du bilan hydrique continental (Gedney et al., 2006). Enfin, en matière de détection-attribution, la forte variabilité naturelle des précipitations et leur réponse incertaine dans les scénarios climatiques représentent un obstacle important pour identifier, à l'échelle régionale, la signature des forçages anthropiques sur les températures de surface. Ce problème peut toutefois être en partie résolu en utilisant le lien qui existe entre température et précipitations à l'échelle interannuelle pour « corriger » les tendances de température (Douville, 2006b).

Bibliographie

- Allen M. R. et W. J. Ingram, 2002 : Constraints on future changes in the hydrological cycle. *Nature*, 419, 224-228.
- Ashrit R. G., H. Douville et K. Rupa Kumar, 2003 : Response of the Indian Monsoon and Enso-monsoon teleconnection to Enhanced Greenhouse Effect in the CNRM Coupled Model. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 81, 779-803.
- Barsugli J. J., S.-I. Shin et P. D. Sardeshmukh, 2006 : Sensitivity of global warming to the pattern of tropical ocean warming. *Climate Dyn.*, 27, 483-492.
- Biasutti M. et A. Giannini, 2006 : Robust Sahel drying in response to late 20th century forcings. *Geophys. Res. Letters*, 33, L11706, DOI :10.1029/2006GL026067.
- Bony S. et J.-L. Dufresne, 2005 : Marine boundary layer clouds at the heart of tropical cloud feedback uncertainties in climate models. *Geophys. Res. Letters*, 32, L20806, DOI :10.1029/2005GL023851.
- Camberlin P., F. Chauvin, H. Douville et Y. Zhao, 2004 : Simulated Enso-tropical rainfall teleconnections and their changes under enhanced greenhouse gases conditions. *Climate Dyn.*, 23, 641-657.
- Ciais P., M. Reichstein, N. Viovy, A. Granier, J. Ogee, V. Allard, M. Aubinet, N. Buchmann, C. Bernhofer, A. Carrara, F. Chevallier, N. De Noblet, A. D. Friend, P. Friedlingstein, T. Grünwald, B. Heinesch, P. Kerönen, A. Knohl, G. Krinner, D. Loustau, G. Manca, G. Matteucci, F. Miglietta, J. M. Ourcival, D. Papale, K. Pilegaard, S. Rambal, G. Seufert, J. F. Soussana, M. J. Sanz, E. D. Schulze, T. Vesala et R. Valentini, 2005 : Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437, 529-533.
- Collins M. et CMIP Modelling Groups, 2005 : El Niño-or La Nina-like climate change? *Climate Dyn.*, 24, 89-104.
- De Marsily G. et al., 2006 : *Les Eaux continentales*. Rapport sur la science et la technologie, Académie des sciences, EDP Sciences, Courtabœuf, 328 p.
- Douville H., S. Planton, J.-F. Royer, D. B. Stephenson, S. Tyteca, L. Kergoat, S. Lafont et R. A. Betts, 2000a : Importance of vegetation feedbacks in doubled-CO₂ time-slice experiments. *J. Geophys. Res.*, 105, 14841-14861.
- Douville H., J.-F. Royer, D. B. Stephenson, S. Tyteca, J. Polcher, P. Cox, N. Gedney et P. Valdes, 2000b : Impact of CO₂ doubling on the Asian summer monsoon: robust versus model-dependent responses. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 78, 421-439.
- Douville H., F. Chauvin, S. Planton, J.-F. Royer, D. Salas y Mélia et S. Tyteca, 2002 : Sensitivity of the hydrological cycle to increasing amounts of greenhouse gases and aerosols. *Climate Dyn.*, 20, 45-68, DOI :10.1007/s00382-002-0259-3.
- Douville H., 2006a : Impact of regional SST anomalies on the Indian monsoon response to global warming in the CNRM climate model. *J. Climate*, 19, 2008-2024.
- Douville H., 2006b : Detection-attribution of global warming at the regional scale: How to deal with precipitation variability? *Geophys. Res. Letters*, 33, L02701, DOI :10.1029/2005GL024967.
- Douville H., D. Salas y Mélia et S. Tyteca, 2006 : On the tropical origin of uncertainties in the global land precipitation response to global warming. *Climate Dyn.*, 26, 367-385, DOI :10.1007/s00382-005-0088-2.
- Dufresne J.-L., D. Salas y Mélia, S. Denvil, S. Tyteca, O. Arzel, S. Bony, P. Braconnot, P. Brockmann, P. Cadule, A. Caubel, F. Chauvin, M. Déqué, H. Douville, L. Fairhead, T. Fichefet, M.-A. Foujols, P. Friedlingstein, J.-Y. Grandpeix, J.-F. Guérémy, F. Hourdin, A. Idelkadi, G. Krinner, C. Levy, G. Madec, P. Marquet, O. Marti, I. Musat, S. Planton, J.-F. Royer, D. Swingedow, A. Voldoire, 2006 : Simulation du climat récent et futur par les modèles du CNRM et de l'IPSL. *La Météorologie*, 8^e série, 55, 45-59.
- Gedney N., P. M. Cox, R. A. Betts, O. Boucher, C. Huntingford et P. A. Stott, 2006 : Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. *Nature*, 439, 835-838, DOI :10.1038/nature04504.
- Giorgi F. et X. Bi, 2005 : Updated regional precipitation and temperature changes for the 21st century from ensembles of recent AOGCM simulations. *Geophys. Res. Letters*, 32, L21715, DOI :10.1029/2005GL024288.
- Groisman P. Y., R. W. Knight, D. R. Easterling, T. R. Karl, G. C. Hegerl et V. N. Razuvayev, 2005 : Trends in intense precipitation in the climate record. *J. Climate*, 18, 1326-1350.
- Hegerl G. C., F. W. Zwiers, P. A. Stott et V. V. Kharin, 2004 : Detectability of anthropogenic changes in annual temperature and precipitation extremes. *J. Climate*, 17, 3683-3700.
- Held I. et B. J. Soden, 2006 : Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *J. Climate* (à paraître).
- Held I., T. L. Delworth, J. Lu, K. L. Findell et T. R. Knutson, 2006 : Simulation of Sahel drought in the 20th and 21st centuries. *PNAS*, 102, 17891-17896.
- Joly M., A. Voldoire, H. Douville, P. Terray et J.-F. Royer, 2006 : African monsoon teleconnections with tropical SSTs in a set of IPCC-AR4 coupled models. *Climate Dyn.* (soumis).
- Klein Tank A. M. G. et G. P. Können, 2003 : Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-1999. *J. Climate*, 16, 3665-3680.
- Kumar A., F. Yang, L. Goddard et S. Schubert, 2004 : Differing trends in the tropical surface temperatures and precipitation over land and oceans. *J. Climate*, 17, 653-664.
- Lambert F. H., N. P. Gillett, D. A. Stone et C. Huntingford, 2005 : Attribution studies of observed land precipitation changes with nine coupled models. *Geophys. Res. Letters*, 32, L18704, DOI :10.1029/2005GL023654.
- Liepert B. G., J. Feichter, U. Lohmann et E. Roeckner, 2004 : Can aerosols spin down the water cycle in a warmer and moister world? *Geophys. Res. Letters*, 31, L06207, DOI :10.1029/2003GL019060.
- Liu J. et J. A. Curry, 2006 : Variability of the tropical and subtropical ocean surface latent heat flux during 1989-2000. *Geophys. Res. Letters*, 33, L05706, DOI :10.1029/2005GL024809.
- Milly P. C. D., K. A. Dunne et A. V. Vecchia, 2006 : Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438, 347-350, DOI :10.1038/nature04312.
- Poutou E., G. Krinner, C. Genthon et N. De Noblet, 2004 : Role of soil freezing in future boreal climate change. *Climate Dyn.*, 23, 621-639.
- Ramanathan V., C. Chung, D. Kim, T. Bettge, J. T. Kiehl, W. M. Washington, Q. Fu, D. R. Sikka et M. Wild, 2006 : Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle. *PNAS*, 102, 5326-53333.
- Robock A., M. Mu, K. Vinnikov, I. V. Trofimova et T. I. Adamenko, 2005 : Forty-five years of observed soil moisture in the Ukraine: No summer desiccation (yet). *Geophys. Res. Letters*, 32, L03401, DOI :10.1029/2004GL021914.
- Roderick M. L. et G. D. Farquhar, 2002 : The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 298, 1410-1411.
- Rowell D. P. et R. G. Jones, 2006 : Causes and uncertainty of future summer drying over Europe. *Climate Dyn.*, 27, 281-299, DOI :10.1007/s00382-006-0125-9.
- Terray L., M. E. Demory, M. Déqué, G. de Coetlogon et E. Maisonnave, 2004 : Simulation of the late twenty-first century changes in wintertime atmospheric circulation over Europe due to anthropogenic causes. *J. Climate*, 17, 4630-4635.
- Wang G., 2005 : Agricultural drought in a future climate: results from 15 global climate models participating in the IPCC 4th Assessment. *Climate Dyn.*, 25, 739-753, DOI :10.1007/s00382-005-0057-9.
- Wang H. et K. M. Lau, 2006 : Atmospheric hydrological cycle in the tropics in twentieth century coupled climate simulations. *Int. J. Climatol.*, DOI : 10.1002/joc.1279.