

Les impacts des changements climatiques sur le cycle hydrologique

La croissance de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre entraîne un réchauffement désormais inéluctable, dont la simulation climatique nous donne d'ores et déjà une bonne image. L'image l'est beaucoup moins et les incertitudes significativement plus importantes s'agissant du cycle de l'eau. Il ne faudrait pourtant pas en déduire que de telles incertitudes peuvent justifier un certain attentisme quant aux mesures de prévention à mettre en place. La probabilité est forte, en effet, que les populations et les sociétés humaines soient beaucoup plus rapidement sensibles et vulnérables aux changements hydrologiques qu'aux modifications thermiques, et qu'ils se produisent dans un avenir assez rapproché. Et c'est alors une fraction très importante de la population mondiale, parmi la plus démunie, qui sera touchée la première.

par Hervé DOUVILLE (*), Jean-Claude ANDRÉ (***) et Ghislain de MARSILY (***)

Avertissement : Cet article est une version mise à jour, mais allégée, d'un précédent article [8] auquel il emprunte plusieurs développements. On pourra par ailleurs consulter les autres contributions de [15] pour de nombreux compléments.

Bien que ne représentant qu'une très faible partie de la quantité totale d'eau de la planète, l'eau atmosphérique joue un rôle déterminant dans le cycle énergétique de l'atmosphère et constitue, à ce titre, une des composantes majeures à prendre en compte pour l'étude du climat et de son évolution. Ce rôle s'exerce à travers deux propriétés principales de l'eau vapeur et de l'eau liquide :

- ✓ d'une part, les absorptions et libérations de chaleur latente au moment de l'évaporation et de la condensation, aux interfaces avec l'océan et les surfaces continentales ou au sein de l'atmosphère elle-même ;
- ✓ d'autre part, la réflexion, la diffusion, l'absorption et l'émission du rayonnement atmosphérique, que ce soit dans le domaine des courtes longueurs d'onde (où les nuages agissent principalement comme des réflecteurs du rayonnement solaire incident), ou dans le domaine infrarouge correspondant à l'émission tellurique (où la vapeur d'eau se comporte comme un gaz à effet de serre (GES) très efficace, dont les effets sont renforcés par la présence de nuages élevés).

Le cycle de l'eau est, en retour, très largement influencé et modifié par les fluctuations et les évolutions du climat, qu'il s'agisse de sa composante atmosphérique ou des eaux continentales. Le changement climatique est donc de nature à modifier assez significativement la façon dont les ressources en eau sont réparties dans le temps et dans l'espace, avec des conséquences inévitables sur la distribution de l'habitabilité à la surface de la planète Terre.

Le cycle énergétique et le cycle de l'eau, du global au régional

Le cycle énergétique global

Les deux formes d'énergie atmosphérique les plus directement concernées par le problème de l'eau et du climat sont l'énergie cinétique du vent (environ 100 Whm^{-2}), alimentée par des phénomènes d'instabilité (au taux d'environ 2 Wm^{-2}), et l'énergie latente de la vapeur d'eau (environ 15 kWhm^{-2}), alimentée par le flux d'évaporation (au taux d'environ 78 Wm^{-2}) (1). On peut d'abord rappeler que :

- ✓ le flux d'évaporation de 78 Wm^{-2} (énergie récupérée par l'atmosphère lors de la condensation nuageuse) correspond, en moyenne annuelle, à un flux d'eau d'environ 20 millions de m^3s^{-1} pour l'ensemble de la planète ;
- ✓ l'échelle temporelle caractéristique de la partie atmosphérique du cycle de l'eau est d'environ 8 jours ($= 15 \text{ kWhm}^{-2}/78 \text{ Wm}^{-2}$), à comparer à l'échelle caractéristique du mouvement, de l'ordre de 2 jours seulement ($= 100 \text{ Whm}^{-2}/2 \text{ Wm}^{-2}$), illustrant ainsi toute l'importance de la régulation climatique associée aux processus hydriques.

L'équilibre radiatif de la planète est, pour sa part, largement piloté par le rayonnement atmosphérique situé dans l'infrarouge thermique (187 Wm^{-2}), pratiquement

trois fois plus important que l'émission des surfaces (continentales et océaniques) dans ces mêmes longueurs d'ondes et atteignant directement le sommet de l'atmosphère *via* la fenêtre atmosphérique (51 Wm^{-2}). Or, ce rayonnement est, pour une large part, la résultante de l'émission de la vapeur d'eau, présente au travers de toute l'épaisseur de la colonne atmosphérique, et de celle des nuages, que ceux-ci soient à basse altitude et rayonnent à une température très proche de la température de la surface elle-même, ou qu'ils soient à plus haute altitude, donc plus froids, rayonnant moins, et exerçant une moindre modération de l'effet de serre.

Le cycle de l'eau

Le cycle atmosphérique global de l'eau est caractérisé par une évaporation excédentaire par rapport aux précipitations au-dessus des océans, le surplus étant exporté par l'atmosphère et les nuages au-dessus des continents. Les précipitations y sont alors plus abondantes que l'évaporation, et le surplus, de signe opposé par rapport au précédent, alimente l'océan en eau douce après avoir été transporté des zones de production de ruissellement vers les exutoires des grands fleuves.

La quantité d'eau présente dans l'atmosphère ne représente qu'une toute petite partie des ressources en eau de la planète (figure). Si l'on pouvait condenser toute la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère à un moment donné, le volume ainsi occupé ne dépasserait pas les $13\,000 \text{ km}^3$. Malgré cette faible valeur, la vapeur d'eau atmosphérique est l'élément prépondérant du cycle hydrologique car, outre son rôle essentiel dans le bilan radiatif, elle permet les changements de phase et les échanges énergétiques associés.

Les circulations atmosphériques, le recyclage local de l'eau, et le climat local

Etant donné qu'il tombe annuellement en moyenne 1 m d'eau sur l'ensemble de la planète, le réservoir d'eau précipitable est ainsi recyclé 50 fois par an environ. De façon

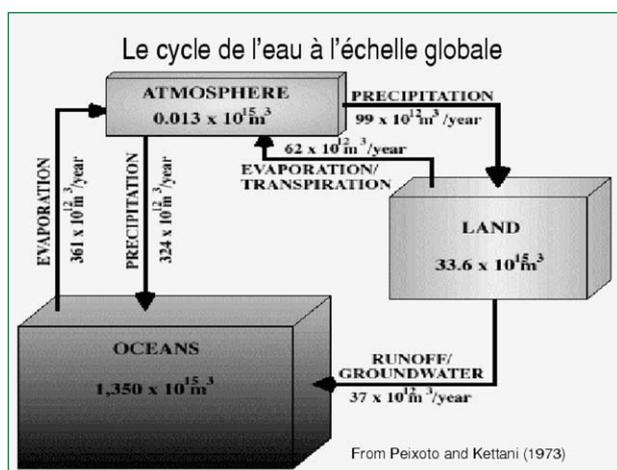


Figure – Le cycle global de l'eau (d'après [18]).

plus quantifiée, il a bien été montré [4] que l'eau atmosphérique était recyclée environ 3 fois par mois, une estimation qu'a aussi confirmée une méthode différente [21], permettant d'estimer un temps moyen de résidence tout juste supérieur à 8 jours. Les masses d'air et l'humidité qu'elles transportent ne voyageant que de quelques milliers de kilomètres pendant de telles durées, il est possible de comprendre pourquoi le cycle de l'eau atmosphérique est responsable de nombre de phénomènes climatiques locaux, et aussi comment il alimente des boucles de rétroaction positive avec le climat : on peut, à cet égard, citer les cas où une sécheresse des sols conduit à une réduction des précipitations et à une augmentation des températures (la vague de chaleur de l'été 1976 en France et en Europe du Nord), ou encore les exemples où un sol inondé réalimente les précipitations, *via* une évaporation accrue et une rétroaction de la couche limite atmosphérique conduisant à une convergence d'humidité plus importante, et contribue ainsi à faire perdurer l'inondation (les inondations de l'été 1993 aux Etats-Unis [2]).

Mais ces chiffres moyens et ces arguments généraux cachent, de fait, des phénomènes de très grande diversité. Il est en effet facile de se convaincre, par exemple en regardant une photographie des nuages qui recouvrent la planète, que l'eau est un composant extrêmement variable de l'atmosphère. Aux latitudes tempérées les systèmes nuageux occupent, pendant plusieurs jours, des zones de quelques milliers de kilomètres, tandis que, dans les régions tropicales, les développements nuageux sont moins étendus mais plus intenses et plus brefs (quelques heures en général). Cette hétérogénéité est source de difficultés pour la modélisation climatique, expliquant pour une bonne part les limitations de celle-ci vis-à-vis de l'évolution des ressources en eau de la planète.

Impacts du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique

Depuis le début de l'ère industrielle, l'homme a sensiblement modifié la concentration atmosphérique des principaux gaz à effet de serre que sont le dioxyde de carbone, le méthane ou le protoxyde d'azote, favorisant ainsi le piégeage atmosphérique du rayonnement infrarouge terrestre et renforçant l'effet de serre (+ $2,3 \text{ W/m}^2$ depuis 1750). La conséquence la plus évidente est un réchauffement atmosphérique global, déjà détecté dans les enregistrements de températures en surface (+ $0,74^\circ\text{C}$ au cours des 100 dernières années) et qui pourrait atteindre jusqu'à $6,4^\circ\text{C}$ à l'horizon 2100 selon les projections les plus alarmistes [10].

Quelles pourront être les conséquences de ce réchauffement global sur le cycle de l'eau ? La prudence est ici recommandée tant la détection des changements hydrologiques demeure délicate [12] en raison de la forte variabilité naturelle des précipitations, de la difficulté des modèles à reproduire certaines tendances observées, et des incertitudes qui pèsent encore sur les impacts des différents forçages anthropiques (gaz à effet de serre, mais

aussi aérosols et occupation des sols). Même s'agissant de la fin du XXI^e siècle, les modélisations climatiques sont loin de fournir une réponse unanime. Au-delà des inconnues liées aux différents scénarios d'émission, qui jouent principalement sur l'amplitude des anomalies, les changements simulés à la fin du XXI^e siècle demeurent très variables d'un modèle à l'autre. On se reportera utilement à l'article de Michel Déqué [6] pour une discussion plus complète des modifications de la partie atmosphérique du cycle de l'eau en réponse à l'accroissement de l'effet de serre d'origine anthropique.

En moyenne globale, l'intensification du cycle hydrologique ne fait cependant guère de doute. Modèles et observations suggèrent, en effet, que le réchauffement global se fait à humidité relative de l'atmosphère quasi-constante, c'est-à-dire avec une augmentation significative de la vapeur d'eau présente dans la troposphère. Ceci représente une rétroaction importante sur la température du globe puisque la vapeur d'eau contribue également à l'effet de serre. En revanche, la variation de la quantité d'eau condensée présente dans les nuages dépend beaucoup plus de la formulation choisie dans les modèles et demeure l'une des rétroactions climatiques les moins bien connues, non seulement en réponse aux émissions de gaz à effet de serre [3], mais également vis-à-vis des aérosols qui peuvent jouer le rôle de noyaux de condensation au sein des systèmes précipitants [14].

Ainsi, si tous les modèles s'accordent pour prévoir une augmentation des précipitations globales au cours du XXI^e siècle, la répartition géographique de ces anomalies demeure assez incertaine [7]. En moyenne zonale, la réponse des précipitations annuelles montre malgré tout un comportement assez cohérent d'un modèle à l'autre : accroissement des précipitations aux moyennes et hautes latitudes accompagné d'un déplacement vers les pôles des trajectoires des dépressions atmosphériques, diminution dans les régions subtropicales, augmentation en zone équatoriale par renforcement des précipitations associées à la zone de convergence intertropicale. Sur les continents, 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 région tropicale, ce n'est pas seulement l'intensité mais aussi le signe des anomalies qui reste incertain. C'est notamment le cas en Afrique de l'Ouest où la responsabilité de l'homme dans la sécheresse qui a sévi à la fin du XX^e siècle n'est pas encore clairement établie (mais pourrait être due, au moins en partie, aux modifications des conditions de surface et de l'albédo des sols). En revanche, les projections sont particulièrement cohérentes 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 [7].

Dans bien des régions, l'évolution des ressources en eau demeure difficile à prévoir. Elle résulte non seulement de la réponse des précipitations, mais également des changements d'évapotranspiration. Ces derniers dépendent de

nombreux facteurs, tels que l'effet direct des aérosols sur le rayonnement solaire incident, la rétroaction des nuages ou celle de la végétation. Ainsi, sur les continents, l'effet des gaz à effet de serre sur le bilan radiatif observé en surface semble devoir être en partie contrecarré par l'effet des aérosols sulfatés et/ou par un accroissement de la nébulosité [13]. D'autre part, quelques modèles prévoient une diminution de l'évaporation continentale d'ici la fin du XXI^e siècle, en raison d'un effet anti-transpirant du dioxyde de carbone. Cet effet a été observé à l'échelle de la plante ou de la parcelle, mais son importance globale reste très incertaine malgré des travaux récents [9] suggérant que sa prise en compte est indispensable à la compréhension des tendances contrastées sur les précipitations et les débits observés, depuis 1960, à l'échelle continentale. Si cette hypothèse demande à être confirmée par d'autres études, la plupart des modèles s'accordent, en revanche, sur un retrait progressif de la couverture neigeuse aux hautes latitudes et sur une diminution de l'humidité du sol pendant la saison de croissance des végétaux dans les grandes régions agricoles, principalement aux moyennes latitudes.

De nombreux points restent à éclaircir quant à la nature exacte et la répartition régionale des impacts hydrologiques, montrant la nécessité de mieux contraindre la sensibilité des modèles [1]. De ce point de vue, une piste originale consiste à utiliser la variabilité interannuelle pour calibrer et valider les modèles, qui offre l'avantage d'être bien documentée mais l'inconvénient de correspondre à une répartition beaucoup moins uniforme des anomalies de température de surface de la mer que celle associée au réchauffement global [7]. D'autres données de validation des modèles peuvent être imaginées, telle leur capacité à reproduire le cycle annuel et/ou certains climats du passé. Enfin, les études de détection-attribution (2) des changements climatiques doivent maintenant aller au-delà des indicateurs thermiques et s'intéresser davantage au cycle hydrologique [11]. Cette tâche demeure cependant extrêmement difficile en raison de la difficulté de paramétrer l'ensemble des processus physiques qui contrôlent la sensibilité du cycle hydrologique et de l'insuffisance du réseau d'observation. Ce qui souligne, au passage, la nécessité de développer et de pérenniser les mesures spatiales dédiées au cycle hydrologique.

Actuellement, environ un tiers de la population mondiale vit dans des pays considérés comme à risque en ce qui concerne les ressources en eau, du simple fait de la variabilité spatio-temporelle naturelle du cycle hydrologique. Au-delà, 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 *via* l'augmentation du risque d'épisodes de sécheresse ou de crues. 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 que celui des variations du climat [15]. 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 [20]. Au-delà de l'étude de la variation de l'intensité moyenne des précipitations, c'est donc l'étude des impacts du changement climatique sur les événements extrêmes qui doit être approfondie pour orienter les politiques d'adaptation à ce changement.

A cet égard, il y a lieu de s'interroger sur l'influence éventuelle des changements climatiques sur la fréquence des événements El Niño. Historiquement [voir, par exemple, 5], on sait que des événements El Niño très intenses ont été la cause des épisodes de sécheresse les plus catastrophiques du XIX^e siècle (1876-77, 1899), ayant frappé simultanément l'Amérique du Sud, l'Asie et l'Afrique dans la zone de mousson, et provoqué de terribles famines (30 à 60 millions de morts estimés, [voir également 19]). On sait aussi que le fort événement El Niño de 1998 a été à l'origine de récoltes très insuffisantes cette année-là en Chine et en Indonésie, qui ont pu être compensées par des achats massifs sur les marchés internationaux [15]. Ortlieb [17] a, de plus, mis en évidence par des études historiques conduites en Amérique du Sud depuis le XVI^e siècle, que la fréquence moyenne observée de ces événements El Niño très intenses est d'environ deux par siècle. Sachant que le stock mondial de nourriture est actuellement de l'ordre de 400 millions de tonnes de céréales, soit deux mois de consommation, que les besoins de nourriture augmentent actuellement plus vite que la ressource en raison de la croissance démographique, laissant déjà plus de 850 millions d'êtres humains en conditions de sous-alimentation chronique [15], il y a lieu de s'interroger sur les conséquences potentielles très graves que pourraient avoir l'occurrence d'événements El Niño très intenses, et l'augmentation de leur fréquence.

Une façon de faire apparaître clairement le signal hydrologique lié au changement climatique est de considérer une augmentation particulièrement forte de la concentration atmosphérique de GES, de telle sorte que le « signal » lié au changement climatique puisse alors sortir du « bruit » lié à la variabilité naturelle et à l'imprécision des modèles : c'est ainsi [16] que des simulations globales où la concentration des GES a été multipliée par quatre (à partir d'un modèle dont les simulations des débits moyens des grands bassins avaient été qualifiées de réalistes) ont été réalisées, dont l'analyse montre que la fréquence des fortes crues, c'est-à-dire celles dont la période de retour est de 100 ans, augmente de manière importante sur les fleuves de hautes latitudes, et dont les bassins occupent des surfaces supérieures à 200 000 km². Les observations actuelles indiquent d'ailleurs, pour ces mêmes fleuves, un accroissement des fortes crues dans la deuxième partie du XX^e siècle [16]. Ces résultats devront toutefois être confirmés par d'autres études.

Des incertitudes mais pas d'attentisme

De nombreux processus et phénomènes lient le climat et l'eau, principalement *via* le maillon atmosphérique du cycle hydrologique. Le climat est déterminé, pour une large part, par les échanges énergétiques utilisant le cycle de l'eau comme véhicule de l'énergie. En retour, la distribution des ressources en eau superficielle de la planète, bien que contrôlée au premier ordre par la distribution des climats régionaux et locaux, témoigne d'une variabilité spatiale et temporelle bien plus importante que celle du climat thermique. Cette forte variabilité spatio-temporelle est certainement l'une des raisons majeures pour lesquelles la simulation par les modèles climatiques du cycle hydrologique, et la prédiction de son devenir, restent difficiles et encore assez imparfaites.

La croissance de la concentration atmosphérique des GES entraîne, en effet, un réchauffement inéluctable, dont la simulation climatique nous donne d'ores et déjà une relativement bonne image, pour ce qui concerne tant les régimes thermiques moyens que quelques extrêmes. Cette même simulation climatique est par contre affectée par des incertitudes significativement plus importantes quant au cycle de l'eau, entre autres raisons parce que le niveau naturel des fluctuations du cycle hydrologique (le « bruit ») reste fort par rapport aux modifications attendues (le « signal »), tout au moins tant que l'accroissement de la concentration atmosphérique des GES n'aura pas atteint un niveau suffisant, ou que leurs effets ne se seront pas totalement exprimés en raison de la relative inertie du système climatique et de certains effets compensatoires liés aux aérosols.

Il ne faudrait pourtant pas en déduire que de telles incertitudes, encore assez grandes, peuvent justifier un certain attentisme quant aux mesures de prévention à mettre en place : il existe, en effet, une très forte présomption que les populations et les sociétés humaines soient beaucoup plus rapidement sensibles et vulnérables aux changements hydrologiques qu'aux changements thermiques, et que ces changements hydrologiques puissent se produire dans un avenir assez rapproché. C'est par ailleurs une fraction très importante de la population mondiale, appartenant de plus aux couches les plus démunies, qui sera atteinte la première par la diminution de la ressource en eau. Cette diminution concernera non seulement la quantité d'eau disponible pour les usages humains et sociétaux, en augmentant les risques de pénuries en années sèches, mais elle affectera aussi la qualité de cette ressource, avec des conséquences directes sur la santé des populations les plus vulnérables.

Notes

(*) Météo-France, Centre national de Recherches météorologiques, 31057 Toulouse cedex 1.

(**) Cerfacs, 31057 Toulouse cedex 1.

(***) UMR Sisyphe, Université Pierre et Marie Curie, 75252 PARIS cedex 05.

(1) Les quantités totales d'énergie, rapportées à l'unité de surface, sont exprimées en Whm^{-2} , tandis que les taux de conversion entre les différentes formes d'énergie, toujours rapportés à l'unité de surface, sont exprimés en Wm^{-2} .

(2) Par « détection-attribution » on entend la mise en évidence, d'une part, d'un signal au sein de fluctuations naturelles (détection) et, d'autre part, d'un mécanisme physique qui en est responsable (attribution).

Bibliographie

- [1] Allen, M.R., et W.J. Ingram (2002). « Constraints on future changes in the hydrological cycle ». *Nature*, **419**, 224-228.
- [2] Betts, A.K., J.H. Ball, A.C.M. Beljaars, M. Miller et P. Viterbo (1994). « Coupling between land-surface, boundary-layer parameterizations and rainfall on local and regional scales : lessons from the wet summer of 1993 », *5th Symp. « Global Change Studies »*, Amer. Meteor. Soc., Nashville, TN, 174-181.
- [3] Bony, S., R. Colman, V.M. Kattsov, R.P. Allan, C.S. Bretherton, J.L. Dufresne, A. Hall, S. Hallegatte, M.M. Holland, W. Ingram, D.A. Randall, B.J. Soden, G. Teselioudis et M.J. Webb, « How well do we understand and evaluate climate change feedback processes ? », *J. Climate*, **19**, 3445-3482 (2006).
- [4] Chahine, M.T., R. Haskins et E. Fetzer. « Observation of the recycling rate of moisture in the atmosphere : 1988-1994 », *GEWEX News*, **7**, 1-4 (1997)..
- [5] Davis, M. *Génocides tropicaux. Catastrophes naturelles et famines coloniales aux origines du sous-développement*. La Découverte/Poche, Paris, 479 pp (2006).
- [6] Déqué, M. *Annales des Mines, Responsabilité et Environnement* (juillet 2007).
- [7] Douville, H., D. Salas-Méla 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.
- [8] Douville, H., K. Laval, D. Cariolle, S. Planton et J.C. André (2006) Eau et climat. In « *Les eaux continentales* » Rapport sur la science et la technologie de l'Académie des Sciences, G. de Marsily Editeur, **25**, Editions EDP Sciences, 201-238.
- [9] 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.
- [10] Giec (2007) Résumé à l'intention des décideurs (traduction non-officielle). Contribution du groupe de travail 1 au 4^e rapport d'évaluation du GIEC. Bilan 2007 des changements climatiques : les bases scientifiques physiques. 25pp.
- [11] Hegerl, G.C., T.R. Karl, M. Allen, N.I. Bindoff, N. Gillett, D. Karoly, X. Zhang et F. Zwiers (2006) « Climate change detection and attribution : beyond mean temperature signals ». *J. Climate*, **19**, 5058-5077.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Lohmann, U., et J. Feichter (2005) « Global indirect aerosol effects : a review ». *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 715-737.
- [15] de Marsily, G., Editeur (2006) *Les Eaux Continentales. Rapport sur la science et la technologie de l'Académie des Sciences*, Editions EDP Sciences **25**, 328pp.
- [16] Milly, P. C. D., R. T. Wetherald, K. A. Dunne et T. L. « Delworth (2002). Increasing risk of great floods in a changing climate », *Nature*, **415**, 514-517, Doi : 10.1038/415514a.
- [17] Ortlieb, L. (2000) « The documented historical period of El Niño events in Peru : an update of the Quinn record (16th to 19th centuries) ». In : *El Niño and the southern oscillation. Multiscale variability and local and regional impacts*. H.F. Diaz and V. Markgraf, Editeurs, Cambridge University Press.
- [18] Peixoto, J.P., et M. A. Kettani (1973). « The control of the water cycle », *Sci. American*, **228**, 46-61.
- [19] Sen, A., Drèze, J. (1999) *Omnibus*, Oxford University Press, New Delhi, Inde.
- [20] Tebaldi, C., K. Hayhoe, J.M. Arblaster et G.A. Meehl (2006) « Going to the extremes : An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events ». *Climatic change* (in press).
- [21] Trenberth, K.E. (1998). « Atmospheric moisture residence times and cycling : Implications for rainfall rates with climate change », *Climate Change*, **39**, 667-694, Doi : 10.1023/A :1005319109110.