



## Eaux continentales Continental Waters

### Avant-propos

Trois grandes questions scientifiques viennent immédiatement à l'esprit quand on évoque les « problèmes de l'eau » du XXI<sup>e</sup> siècle :

- les habitants de la planète Terre vont-ils manquer d'eau dans un proche futur ? Que faire pour y remédier ?
- les changements climatiques annoncés vont-ils induire une modification du cycle de l'eau, et, en particulier, observera-t-on une intensification des phénomènes extrêmes et singulièrement des crues ?
- la qualité générale des eaux naturelles, des écosystèmes aquatiques, et même des eaux distribuées n'est-elle pas en train de se dégrader de façon inquiétante ?

Ces questions ont en commun d'être pertinentes, de devoir être traitées, et de ne pas être l'expression de craintes, de rumeurs ou d'angoisses irrationnelles auxquelles il serait scientifiquement plus difficile d'apporter des réponses. Elles ont, de plus, la caractéristique principale de traverser les frontières des disciplines scientifiques classiques, et de nécessiter un examen en associant étroitement les réflexions des spécialistes des sciences de la Terre et de l'Univers, mais aussi des historiens, des démographes, des économistes et, plus généralement, des spécialistes des sciences humaines (rapport historique, social et spirituel de l'homme et de l'eau), des climatologues, des écologistes, des agronomes, des nutritionnistes, des spécialistes de la santé humaine, des spécialistes des problèmes de l'énergie, du dessalement de l'eau de mer, des urbanistes, des spécialistes de l'analyse des risques, des créateurs de

### Foreword

Three major scientific questions spring immediately to mind when the 'water problems of the 21st century' are discussed:

- will there be water shortages on Planet Earth in the near future? What can be done to prevent them?
- will the predicted climate variations cause changes in the water cycle, and, in particular, will there be an intensifying of extreme events, among which floods?
- is the general quality of natural water, aquatic ecosystems and even mains water becoming degraded to a worrying extent?

These questions all have in common that they are pertinent, urgent and not expressions of fears, rumours or irrational anxieties for which it would be more difficult to find scientific remedies. Moreover, their main characteristic is that they cross the frontiers between classical scientific disciplines and must be dealt with through careful studies, not only by earth scientists, but also by historians, population experts, economists, social science specialists (social, historical and spiritual relations between humans and water), climatologists, ecologists, agronomists, nutritionists, human health specialists, experts on energy problems and sea water desalination, city planners, forecasters, risk assessment specialists, and many others whom I have forgotten. It is clear that this time the 'water problems' cannot be expressed rationally, examined scientifically, and perhaps, finally solved unless all these aspects are taken into account together.

After an initial report on groundwater pollution [1] published in 1991, the French Academy of Sciences

scénarios de notre évolution future, et bien d'autres que j'oublie de citer. Car, pour une fois au moins, il est clair que les « problèmes de l'eau » ne pourront être posés de façon rationnelle, puis examinés de façon scientifique, et enfin éventuellement résolus qu'en abordant de façon conjointe et unitaire l'ensemble de ces facettes.

Après avoir publié en 1991 un premier rapport sur la pollution des eaux souterraines [1], l'Académie des sciences a décidé d'apporter sa contribution à cette tâche complexe en débutant en 2003 un programme de réflexion transversal, dont les premiers résultats vont prochainement voir le jour. Il s'agit :

(i) d'un colloque sur l'eau, qui s'est tenu à Paris, à l'Institut de France, du 15 au 17 septembre 2003, et dont le présent numéro des *Comptes rendus Geoscience* publie les travaux ; y a été abordé un ensemble important de sujets, qui sont résumés ci-dessous ;

(ii) de la préparation d'un « rapport sciences et technologie » sur les eaux continentales, en cours de rédaction, et dont la parution est prévue pour le deuxième semestre 2005. Ce rapport a été demandé par le Gouvernement pour proposer des orientations aux politiques publiques dans le domaine de l'eau, avec des objectifs à court, moyen et long terme, qui reprendront les trois grandes questions abordées ci-dessus, en s'appuyant également sur le présent compte rendu du colloque de 2003.

Il a été jugé intéressant de présenter les articles de ce colloque dans un ordre un peu différent de celui de leur présentation orale, pour mettre en évidence leur cohérence et les contributions qu'ils apportent aux trois problématiques posées en introduction. On commencera ainsi, comme introduction, par l'article de S.E. van der Leeuw [31], qui analyse la crise environnementale qu'a connue la basse vallée du Rhône à l'époque romaine. Les vestiges archéologiques sont nombreux, qui permettent de remonter à la caractérisation climatique de cette crise, à sa composante anthropique et à ses conséquences, qui ont conduit à abandonner de nombreuses fermes implantées un siècle plus tôt par les légions romaines conquérantes. L'histoire semble nous dire que la « crise », liée à la désorganisation des aménagements hydrauliques de la plaine, est la conjonction d'un changement climatique, sans doute mineur, et d'une lente désorganisation de la société civile, les paysans gallo-romains n'ayant probablement pas su maintenir les digues et canaux

has decided to continue its contribution to this complex subject by a programme of cross-disciplinary studies started in 2003 and soon to publish its first results. They concern:

(i) a symposium on water organised in Paris, at the French Institute, on 15–17 September 2003. The presentations can be found in the present issue of *Comptes rendus Geoscience* and concern many of the subjects mentioned above;

(ii) preparation of a 'Technological and Scientific Report' on Continental Waters, in progress and expected to be published during the second semester of 2005. This report was requested by the Government to enable it to direct public policy in matters concerning water towards short-, medium- and long-term objectives that take into account the three important questions mentioned above as well as the results of the present proceedings of the 2003 Symposium.

It was considered interesting to present the articles of the symposium in a slightly different order than that in which they were given orally in order to show that their contribution was coherent with the three questions posed in the introduction. Thus, the introduction is the article by S.E. van der Leeuw [31], who analyses the environmental crisis experienced by the lower Rhone valley in Roman times. With the help of numerous archaeological remains, one can reconstruct the climate at the time of this crisis as well as its human components and its consequences, which led to the abandon of many farms built by the conquering Romans a century earlier. History seems to tell us that the 'crisis' caused by the dysfunction of the hydraulic installations in the plain was the result of a combination of a, probably minor, climate change and a slow disintegration of the civil society; the Gallo-Roman peasants were presumably unable to maintain the dikes and canals built by the centurions and reaching the extreme limits of the capacities of their environment. This is the problem at the very heart of the present-day debate, natural climate variations and human influence, 'environmental' migrations.

The mixture of the two effects as an explanation for the 'crisis' is taken up by Lebel and Vischel [17], but for the present and near future. Their focal point is the African monsoon and they ask if there is a possible link between the change of land use (deforestation, planting of crops, over-grazing) and the intensity of the monsoon, where the phenomena are

qu’avaient construits, aux limites des possibilités du milieu, les centurions... Nous sommes là au cœur du débat actuel : variations climatiques naturelles et effets anthropiques, migrations « environnementales ».

Le mélange de ces deux effets pour expliquer la « crise » est repris par Lebel et Vischel [17], cette fois pour l’actuel et le futur proche. S’intéressant à la mousson africaine, ces auteurs s’interrogent sur le lien possible entre la modification de l’usage de l’espace (déforestation, mise en culture, surpâturage) et l’intensité de la mousson, phénomènes couplés au sein du cycle hydrologique par l’augmentation du ruissellement. Ils posent enfin la question de notre responsabilité environnementale devant la vulnérabilité des pays les plus pauvres face aux perspectives de modification du climat. De même, Perrier et Tuzet [22] analysent dans le détail les liens entre l’évapotranspiration des surfaces continentales et les modifications du couvert végétal par l’homme (déforestation–aridification–désertification), avec ses rétroactions sur le climat. Tardieu [29], quant à lui, s’intéresse aux possibilités d’accroître la tolérance des plantes aux déficits hydriques, pour lutter efficacement contre les manques d’eau. Ceci est un problème crucial, puisque près de 70 % de la consommation globale en eau est liée à l’irrigation. L’échange « eau contre carbone » vient cependant limiter fortement ces espoirs.

Mais que savons-nous des variations des climats anciens ? Cette question sera débattue au fil de six textes. Loutre et Berger [18] montrent, par la modélisation, comment les variations des paramètres orbitaux de la Terre peuvent expliquer les cycles interglaciaires du Quaternaire, et utilisent le même modèle pour simuler les climats futurs, en prenant en compte l’augmentation du CO<sub>2</sub> anthropique. Gasse [11], en travaillant sur des archives paléohydrologiques principalement africaines, démontre, dans les faits, les variations holocènes du climat, l’histoire correspondante des sociétés passées, et s’interroge sur les risques hydrologiques futurs. Duplessy et al. [9] confirment, par les archives sédimentaires marines, les mêmes variations climatiques holocènes, et attirent l’attention sur certains événements particuliers, comme les grandes variations des moussons indiennes et africaines, l’existence d’une phase anoxique en Méditerranée, et des variations de la circulation thermo-haline dans l’Atlantique nord, encore difficiles à interpréter. Vincent et al. [32] analysent, sur le XX<sup>e</sup> siècle, les variations

couplées par la variation dans le cycle hydrologique causée par l’augmentation des débits. Elles reflètent notre responsabilité pour l’environnement, compte tenu de la vulnérabilité des pays les plus pauvres face aux perspectives de changements climatiques. De même, Perrier et Tuzet [22] analysent dans le détail les liens entre l’évapotranspiration des surfaces continentales et les transformations par l’homme de la couverture végétale (déforestation–acidification–désertification) avec leurs impacts sur le climat. Tardieu [29] discute des possibilités d’augmenter la tolérance des plantes à la sécheresse afin de combattre efficacement le manque d’eau. C’est un problème crucial, puisque environ 70 % de la consommation mondiale d’eau est destinée à l’irrigation. Toutefois, l’échange « eau contre carbone » limite sévèrement ces espoirs.

Qu’en savons-nous des variations climatiques anciennes ? Cette question est débattue dans six articles. Loutre et Berger [18] expliquent, à l’aide de modèles, comment les variations des paramètres orbitaux de la Terre pourraient expliquer les cycles interglaciaires pendant le Quaternaire. Ils utilisent les mêmes modèles pour simuler les climats futurs, en tenant compte de l’augmentation du CO<sub>2</sub> anthropique. Gasse [11] a travaillé sur des archives paléohydrologiques, principalement en Afrique, et démontre la réalité des variations climatiques du Holocène, l’histoire correspondante des sociétés passées et reflète les risques hydrologiques futurs. Duplessy et al. [9] confirment, sur la base des archives sédimentaires marines, l’existence des mêmes variations climatiques du Holocène et soulignent certains événements particuliers tels que les grandes variations des moussons indiennes et africaines, l’existence d’une phase anoxique en Méditerranée et des variations de la circulation thermo-haline dans l’Atlantique nord, encore difficiles à interpréter. Vincent et al. [32] analysent, au cours du XX<sup>e</sup> siècle, les variations

comparées des glaciers alpins et andins, qui se révèlent être des indicateurs très sensibles des variations récentes du climat. Meybeck et Vörösmarty [19] étudient, à l'échelle du globe, la variation des débits et des apports de solutés et de matériaux alluvionnaires des continents aux océans, depuis 18 000 ans, avec une analyse très fine sur la « crise anthropocène », c'est-à-dire les variations accélérées de ces flux sous l'action de l'homme, depuis 200 ans. Enfin, Ramstein et al. [24] cherchent à expliquer, par la modélisation couplée atmosphère-océans, en prenant en compte l'effet du CO<sub>2</sub>, trois événements climatiques anciens majeurs, l'entrée en période glaciaire il y a 115 000 ans par accumulation de glace sur le continent nord-américain, le démarrage de la mousson indienne à la fin du Tertiaire, et enfin l'épisode supposé de la Terre entièrement glacée, dite « boule de neige », qui serait la plus grande « crise » climatique jamais connue, survenue il y a 750 millions d'années.

Remontant encore dans le temps, Javoy [16] explique comment l'eau, dans le système solaire, s'est distribuée entre les planètes, et en particulier montre qu'une « eau tardive », une sorte de vernis, est arrivée sur Terre après la formation de la planète. Cet article donne également un aperçu du cycle interne de l'eau entre les océans et le manteau, par le jeu de la subduction et du volcanisme. Deux exposés magistraux, Cabane et Villeumier [6] et Bellissent-Funel [3], de nature fondamentale, projettent ensuite un éclairage moderne sur les propriétés physiques et chimiques de la molécule d'eau (ses trois formes physiques, son rôle de solvant, de constituant des cellules vivantes...), qui conditionnent l'ensemble des comportements observés.

Cinq articles présentent le cycle hydrologique continental actuel, avec en filigrane un objectif de prévision des crues. Habets et al. [13] décrivent le couplage du cycle hydrologique avec la circulation générale atmosphérique, et insistent sur le maillon le plus difficile à modéliser du cycle, les échanges entre le sol et l'atmosphère. Ils envisagent comment ces modèles pourront bientôt servir à l'anticipation des pluies intenses à l'échelle locale pour la prévision des débits. Planton et al. [23] étudient, par modélisation, comment ce cycle peut être perturbé par le réchauffement climatique, tant pour ses comportements moyens que pour les extrêmes. Un troisième article, qui devait s'attacher à décrire les écoulements superficiels et souter-

continent, the start of the Indian monsoon at the end of the Tertiary period and the assumed episode of the totally frozen earth, called 'snow-ball', which is thought to be the greatest climate 'crisis' ever to have occurred, dating back 750 million years.

Going even further back in time, Javoy [16] explains how water, in the solar system, was distributed among the planets and shows, in particular, that 'late water', a sort of varnish, arrived on earth after the formation of the planet. This article also gives an insight into the internal water cycle between the oceans and the mantle through subduction and volcanic activity. Two masterly presentations, by Cabane and Villeumier [6] and Bellissent-Funel [3], of fundamental character, provide a modern view of the physical and chemical properties of a water molecule (three states, universal solvent, constituent of living cells...), which condition all the observed behaviours.

Five articles discuss the present continental hydrological cycle with the underlying aim of predicting floods. Habets et al. [13] describe a coupling between the hydrological cycle and the general atmospheric circulation, with particular emphasis on the link in the cycle that is the most difficult to model, i.e., the exchanges between the soil and the atmosphere. They anticipate that these models will soon be able to signal heavy rains at the local scale in order to forecast flow rates. Planton et al. [23] use a model to study how, as the climate gets warmer, this cycle may be disturbed both in its mean and its extreme behaviour. A third article by M. Vauclin, CNRS Grenoble, which was to describe surface- and groundwater flow, could unfortunately not be obtained. Moore et al. [21] discuss tools to be used in real-time flood alerts, based on continuous measurements of rainfall and discharge, as demonstrated by experiments in Great-Britain. Hubert [15] advocates predetermination of floods, i.e., defining statistical distributions of recurring floods with a given intensity. In particular, he shows how algebraic distributions, justified by a multifractal law of scale invariance, give a better account of observed floods than the exponential distributions most commonly used, which would greatly underestimate extreme floods. He also provides several references showing that, despite proven climate changes, the extreme flood events distribution apparently has not changed over the last few hundred years, and that it is thus reasonable to believe that it will not change in this new century; this is a

rains, par M. Vauclin, du CNRS à Grenoble, n'a hélas pas pu être préparé par son auteur. Moore et al. [21] parlent des outils d'annonce des crues en temps réel, à partir des mesures en continu des pluies et des débits, en s'appuyant sur l'expérience anglaise. Hubert [15], lui, s'attache à la prédétermination des crues, c'est-à-dire à la détermination des lois statistiques de retour des crues d'intensité donnée. Il montre, en particulier, comment des lois algébriques, fondées sur une invariance d'échelle multifractale, rendent mieux compte des crues observées que les lois exponentielles le plus souvent utilisées, qui, elles, sous-estimeraient grandement les crues extrêmes. Il donne enfin plusieurs références montrant qu'en dépit de modifications climatiques avérées, le régime des crues extrêmes n'a apparemment pas varié depuis plusieurs centaines d'années et qu'il est donc raisonnable de penser qu'il en sera de même au cours du siècle qui commence, ce qui apporte un premier élément de réponse à la question de l'éventuelle intensification des événements extrêmes. Enfin, Givone [12] indique comment, du débit de la crue, on passe aux inondations, et comment les aménagements de l'espace influencent ce passage, en s'appuyant sur l'exemple de la couverture végétale et de sa variabilité, ainsi que des pratiques agricoles. Quelques stratégies d'aménagement alternatives sont proposées, qui minimisent les inondations.

Cinq articles s'intéressent aux problèmes actuels de qualité des eaux, en sus des éléments déjà contenus dans Meybeck et Vörösmarty [19]. Roche et al. [25] s'adressent à la qualité des milieux et des écosystèmes, dans l'optique de la Directive cadre européenne sur l'eau, du « bon état des masses d'eau » aux équilibres dynamiques des systèmes fluviaux, aux hydroécorégions, aux emboîtements d'échelle des écosystèmes, aux substances dangereuses, aux modélisations globales et aux évaluations socio-économiques. Montiel [20] passe en revue les nouvelles contraintes que doivent respecter les eaux de consommation humaine. Bos [2], dans un résumé succinct, indique comment l'Organisation mondiale de la santé prend en compte les liens multiples entre eau et santé, en dépassant les problèmes de mortalité, pour définir la notion nouvelle de perte d'années de pleine activité. Bligny et Hartemann [4] s'intéressent à la qualité des eaux minérales, et montrent pourquoi et comment il faut d'une part retirer de ces eaux les éléments dits « indésirables », et de plus protéger activement les zones de captage, de

first answer to the question of the intensifying of extreme events. Finally, Givone [12] demonstrates how a flood discharge is transformed into an inundation and how the land use influences this transformation; he bases his reasoning on the nature of the plant cover and its variability, as well as on the agricultural practices and proposes alternative land-use strategies to minimize the risks of inundation.

Five articles address the problem of water quality in addition to what has already been discussed in Meybeck and Vörösmarty [19]. Roche et al. [25] deal with the quality of the environment and the ecosystems from the viewpoint of the European Framework Directive on Water, from 'the healthy state of water masses' to the dynamic equilibrium of river systems, 'hydroeco regions', scale adjustments between ecosystems, dangerous substances, holistic modelling, and socioeconomic assessments. Montiel [20] gives an overview of the new constraints put on human drinking water. Bos [2], in a brief summary, shows how the World Health Organization takes into consideration the multiple links between water and health, going beyond the notion of mortality and defining a new concept of loss of fully active years. Bligny and Hartemann [4] discuss the quality of mineral waters and show how and why it is necessary to, on the one hand, rid them of 'undesirable' elements and on the other, actively protect the areas surrounding the wells, the transit and the recharge zones. Finally, Harvey et al. [14] describe a dramatic case of groundwater contamination: the arsenic in the Ganges Valley, where agricultural development probably has caused the dissolution of arsenic naturally contained in the sediments at levels that are by no means abnormal, thus poisoning millions of people.

These discussions are far from having exhausted the questions concerning water, they only touch on some of their aspects. Countless studies and conference reports have however been produced on the subject of water. For instance, in 2000, the World Water Council published a 'world water vision' [8], which is probably the most thorough analysis of the problems and still relevant. It is based on the remarkable resource inventory carried out for UNESCO by the Soviet School of Hydrology [28]. See also a French summary of the 'vision' [30], a recent predictive study of water and wetlands by INRA-CEMAGREF [27], and a new book [7] on the access to drinking water and

transit et d'alimentation des sources. Harvey et al. [14] présentent enfin le cas dramatique de l'arsenic des eaux souterraines dans la vallée du Gange, où les actions de mise en valeur agricole sont probablement à l'origine de la mise en solution de l'arsenic contenu naturellement dans les sédiments, et à concentration nullement anormale, contaminant ainsi des millions de personnes.

Ces réflexions sont loin d'épuiser les questions touchant à l'eau ; elles ne font qu'en aborder quelques aspects. Les ouvrages ou comptes rendus de colloques sur l'eau sont cependant légion. Pour n'en citer que quelques-uns, on peut mentionner *Vision mondiale sur l'eau*, publié en 2000 par le Conseil mondial de l'eau [8], qui est l'analyse peut-être la plus complète des problèmes, qui reste toujours d'actualité, et est basée sur le remarquable travail d'inventaire des ressources, réalisé pour l'Unesco par l'école d'hydrologie soviétique [28]. Le lecteur francophone pourra également se reporter à [30], pour une synthèse sur la « vision », à [27], pour une récente prospective Inra–Cemagref sur l'eau et les milieux aquatiques et à [7] pour un ouvrage très récent portant sur l'accès à l'eau potable et à l'assainissement pour les un ou deux milliards et demi d'êtres humains qui en sont privés aujourd'hui. Buras [5] a rassemblé un ensemble d'opinions sur les sciences hydrologiques et leur mise en pratique. Rodda et Takeuchi [26] se sont interrogés sur la façon dont la science pourrait éviter que se produise une crise mondiale de l'eau. Enfin, Falkenmark et al. [10] fournissent la contribution la plus récente et globale sur les problèmes de l'eau. Peu de ces travaux, cependant, abordent les problèmes en leur donnant une perspective historique. C'est ce qui a été tenté ici, en s'efforçant de montrer combien sont imbriquées actions humaines et variations climatiques, comme elles l'étaient déjà au temps de Rome ; combien est imbriqué aussi le fonctionnement du système terrestre, des écosystèmes et des sociétés humaines ; combien sont donc imbriquées, enfin, les trois questions posées en introduction, relatives au manque d'eau, aux variations climatiques et à la qualité des eaux. À l'heure où l'on réfléchit aux actions que nos sociétés se devraient de mener pour tenter de résoudre les problèmes liés à l'eau, ces liens devraient être pris en compte.

**Ghislain de Marsily**

*Adresse e-mail* : gdm@ccr.jussieu.fr (G. de Marsily)

sewage collection for the one or two and a half billion people lacking it today. Buras [5] has compiled a number of opinions on hydrological sciences and how to put them into practice. Rodda and Takeuchi [26] discuss how science can avert a worldwide water crisis. Finally, Falkenmark et al. [10] propose the most recent and comprehensive contribution to the subject. Few of these studies, however, place the problems in a historical perspective. Providing such a perspective was the main objective here, with the aim of demonstrating how intimately linked are human actions and climate variations, as they were already in Roman times; how intimately the functioning of the Earth system, the ecosystems and human societies are related; and thus how intimately the three questions raised in the introduction, i.e. water shortages, climate variations, and water quality, are linked. When one tries to define what actions should be taken by society in order to solve our water problems, these links should be taken into account.

**Ghislain de Marsily**

*E-mail address*: gdm@ccr.jussieu.fr (G. de Marsily)

## Références

- [1] Académie des sciences, Pollution des nappes d'eau souterraine en France, rapport n° 29, préparé sous la direction de C. Guillemin, 1991.
- [2] R. Bos, A global picture of the diverse links between water and health, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [3] M.-C. Bellissent-Funel, Hydrophilic–hydrophobic interplay: from model systems to living systems, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [4] J.-C. Bligny, P. Hartemann, Les eaux minérales naturelles et les eaux de source : cadre réglementaire et technique, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [5] N. Buras (Ed.), Reflections on Hydrology: Science and Practice, Am. Geophys. Union, 1997, p. 314.
- [6] B. Cabane, R. Vuilleumier, The physics of liquid water, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [7] M. Camdessus, B. Badré, I. Cheret, P.-F. Ténière-Buchot, Eau, Robert Laffont, Paris, 2004, 290 p.
- [8] W.J. Cosgrove, F.R. Rijsberman, World Water Vision, Making Water Everybody's Business, Conseil mondial de l'Eau Earthscan, London, 2000, 108 p.
- [9] J.-C. Duplessy, E. Cortijo, N. Kallel, Enregistrements marins des variations climatiques de l'Holocène, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [10] M. Falkenmark, J. Rockstrom, H. Savenije, Balancing Water for Humans and Nature: The New Approach in Ecohydrology, Earthscan, 2004.
- [11] F. Gasse, Continental palaeohydrology and palaeoclimate during the Holocene, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [12] P. Givone, Détermination des risques d'inondation, effets de l'aménagement de l'espace, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [13] F. Habets, V. Ducrocq, J. Noilhan, Prévisions hydrologiques et échelles spatiales : l'exemple des modèles opérationnels de Météo-France, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [14] C.F. Harvey, C.H. Swartz, A.B.M. Badruzzaman, N. Keon-Blute, W. Yu, M. Ashraf Ali, J. Jay, R. Beckie, V. Niedan, D. Brabander, P.M. Oates, K.N. Ashfaq, S. Islam, H.F. Hemond, M.F. Ahmed, Groundwater arsenic contamination on the Ganges Delta: biogeochemistry, hydrology, human perturbations, and human suffering on a large scale, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [15] P. Hubert, La prédétermination des crues, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [16] M. Javoy, D'où viennent les océans ?, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [17] T. Lebel, T. Vischel, Climat et cycle de l'eau en zone tropicale : un problème d'échelle, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [18] M.-F. Loutre, A. Berger, Insolation, CO<sub>2</sub> et précipitations en période interglaciaire, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [19] M. Meybeck, C. Vörösmarty, Fluvial filtering of land-to-ocean fluxes, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [20] A. Montiel, Une législation nouvelle pour les eaux destinées à la consommation humaine, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [21] R.J. Moore, V.A. Bell, D.A. Jones, Forecasting for flood warning, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [22] A. Perrier, A. Tuzet, Le cycle de l'eau et les activités au sein de l'espace rural. Enjeux globaux, solutions locales et régionales, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [23] S. Planton, M. Déqué, H. Douville, B. Spagnoli, Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [24] G. Ramstein, M. Khodri, Y. Donnadieu, F. Fluteau, Y. Goddérès, Impact of the hydrological cycle on past climate changes: three illustrations at different time scales, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [25] P.A. Roche, G. Billen, J.-P. Bravard, H. Décamps, D. Pennequin, E. Vindimian, J.-G. Wasson, Les enjeux de recherche liés à la directive-cadre européenne sur l'eau, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [26] J.C. Rodda, K. Takeuchi (Eds.) Can science and society avert the world water crisis in the 21st century, Hydrol. Sci. J. 46 (6) (2001) (special issue).
- [27] M. Sébillotte, P. Hoflack, L.A. Leclerc, C. Sébillotte, Prospective : l'eau et les milieux aquatiques. Enjeux de société et défis pour la recherche, Coll. Bilan et Prospective, Éditions INRA, Paris, 2004.
- [28] I. Shiklomanov, World water resources – a new appraisal and assessment for the 21st century, Unesco, International Hydrology Programme, 1998. <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/shiklomanov/>.
- [29] F. Tardieu, Plant tolerance to water deficit: physical limits and possibilities for progress, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [30] P.F. Teinières-Buchot (Ed.), L'eau au XXI<sup>e</sup> siècle, Éditions Futuribles, 2000.
- [31] S.E. van der Leeuw, The ARCHAEMEDES research team, Climate, hydrology, land use and environmental degradation in the lower Rhone Valley during the Roman period, C. R. Geoscience 337 (2005).
- [32] C. Vincent, P. Ribstein, V. Favier, P. Wagnon, B. Francou, E. Le Meur, D. Six, Glacier fluctuations in the Alps and in the tropical Andes, C. R. Geoscience 337 (2005).