

2006

ACADÉMIE DES SCIENCES

LES EAUX CONTINENTALES

Sous la direction de
GHISLAIN DE MARSILY



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Les eaux continentales

RAPPORT SUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE N° 25
Animateur : Ghislain de Marsily

ACADÉMIE DES SCIENCES



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Rapports sur la science et la technologie

- *Sciences et pays en développement. Afrique subsaharienne francophone*
RST n° 21, 2006.
- *La recherche spatiale française*
RST n° 22, 2006.
- *L'épidémiologie humaine. Conditions de son développement en France, et rôle des mathématiques*
RST n° 23, 2006.
- *La maîtrise des maladies infectieuses. Un défi de santé publique, une ambition médico-scientifique*
RST n° 24, 2006.

Imprimé en France

© 2006, EDP Sciences, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf,
91944 Les Ulis Cedex A

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

ISBN 2-86883-863-4

Académie des sciences

Rapport Science et Technologie

Le Comité interministériel du 15 juillet 1998, à l'initiative du ministre de l'Éducation nationale, de la Recherche et de la Technologie, a confié à l'Académie des sciences l'établissement du rapport biennal sur l'état de la science et de la technologie.

Pour répondre à cette demande, l'Académie des sciences a mis en place en son sein le Comité « *Rapport Science et Technologie* » (RST), chargé de choisir les sujets d'étude et de suivre les travaux.

Chaque thème retenu est conduit par un groupe de travail animé par un membre ou un correspondant de l'Académie, entouré d'experts.

Chaque rapport est soumis au Comité RST, à un Groupe de lecture critique, et à l'Académie des sciences.

Entre 1999 et 2006, vingt-quatre rapports ont ainsi été édités et remis au ministre délégué à la Recherche.

COMPOSITION DU COMITÉ RST

Alain ASPECT

Membre de l'Académie des sciences — Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique, professeur à l'École polytechnique

Jean-François BACH

Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences — Professeur à l'université René-Descartes

Jean-Michel BONY

Membre de l'Académie des sciences — Professeur à l'École polytechnique

Christian BORDÉ

Correspondant de l'Académie des sciences — Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique

Édouard BRÉZIN

Président de l'Académie des sciences — Professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie et à l'École polytechnique

Marie-Lise CHANIN

Correspondant de l'Académie des sciences — Directeur de recherche émérite au Centre national de la recherche scientifique

Geneviève COMTE-BELLOT

Correspondant de l'Académie des sciences — Professeur émérite de l'École centrale de Lyon

François CUZIN

Membre de l'Académie des sciences — Professeur à l'université de Nice-Sophia-Antipolis

Jean DERCOURT

Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences — Professeur émérite à l'université Pierre-et-Marie-Curie

Christian DUMAS

Membre de l'Académie des sciences — Professeur à l'École normale supérieure de Lyon

Michel FARDEAU

Correspondant de l'Académie des sciences — Professeur au Conservatoire national des arts et métiers, directeur médical et scientifique à l'Institut de myologie (Hôpital de la Pitié Salpêtrière)

Jules HOFFMANN

Vice-président de l'Académie des sciences — Directeur de l'Institut de biologie moléculaire et cellulaire de Strasbourg

Jean-Pierre KAHANE

Membre de l'Académie des sciences — Professeur émérite à l'université Paris-Sud Orsay

Daniel KAPLAN

Membre de l'Académie des sciences — Directeur de la société Fastlite

Henri KORN

Membre de l'Académie des sciences — Professeur honoraire à l'institut Pasteur et directeur de recherche honoraire à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale

Nicole LE DOUARIN

Secrétaire perpétuelle honoraire de l'Académie des sciences — Professeur honoraire au Collège de France

Jean-Louis LE MOUËL

Membre de l'Académie des sciences — Physicien à l'Institut de physique du globe de Paris

François MATHEY

Membre de l'Académie des sciences — Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique, professeur à l'École polytechnique

René MOREAU

Membre de l'Académie des sciences — Professeur à l'Institut national polytechnique de Grenoble

Olivier PIRONNEAU

Membre de l'Académie des sciences — Professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie

Jean-Pierre SAUVAGE

Membre de l'Académie des sciences — Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique

Moshe YANIV

Membre de l'Académie des sciences — Professeur à l'Institut Pasteur et directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique

Coordination éditoriale :

Jean-Yves CHAPRON

Directeur du service des Publications de l'Académie des sciences, assisté de
Joëlle FANON

AVANT-PROPOS

JEAN DERCOURT

Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences

L'Académie a procédé à l'étude des eaux continentales, en deux étapes qui se sont recouvertes :

- un bilan des travaux scientifiques les plus actuels (*Comptes Rendus Geoscience*, numéro thématique « Eaux continentales », janvier-février 2005, Tome 337 Fascicule 1-2, 296 pages) ;
- et le présent rapport, dans lequel le groupe de travail a retenu, dans le cadre général de la problématique des eaux continentales et des sociétés humaines, quatre domaines nécessitant des décisions de la part des autorités politiques, françaises et européennes, dans le cadre international :
 - les aménagements hydrauliques existants et les retours d'expériences à en tirer pour améliorer leur efficacité et réduire les nuisances associées,
 - l'impérieuse nécessité de développer une discipline émergente : l'écologie quantitative qui, à partir des écosystèmes existants, que ceux-ci soient en « bonne santé », en cours de dégradation ou totalement dégradés, peut conduire à prévoir les conséquences des indispensables modifications qui devront être apportées aux réseaux hydrographiques actuels pour répondre aux exigences imposées par la croissance démographique ; celle-ci conduira en un demi-siècle (moins d'une vie humaine) au doublement de la population du globe,
 - les aménagements hydrauliques nécessaires à la préservation de la santé humaine,
 - et les contraintes liées aux modifications climatiques, qui imposent de mieux connaître les évolutions des bassins versants où interviendront les aménagements.

Ce rapport comporte des présentations conduisant à des recommandations d'actions et à des exemples (sous formes d'encadrés) relatant des expériences ou explicitant certaines notions.

Les eaux sont très irrégulièrement réparties à la surface de la planète : 97 % du volume total s'accumule dans les océans, 2 % sur les continents, 0,6 % en phase solide dans les inlandsis polaires et les glaciers, enfin une part très modeste en phase gazeuse dans l'atmosphère (le volume des eaux atmosphériques ne dépasse pas 13 000 km³, soit 7 fois moins que le volume de la mer Caspienne !).

L'eau atmosphérique joue un rôle moteur dans le cycle de l'eau car, au-dessus des océans, l'évaporation est excédentaire par rapport aux précipitations ; le surplus est exporté par l'atmosphère au-dessus des continents où les précipitations sont plus abondantes que l'évaporation et alimentent l'océan en eau douce. En outre, l'eau atmosphérique intervient dans l'établissement du bilan radiatif de la planète.

La quantité d'énergie solaire reçue par la planète varie avec la mécanique du Système solaire et se traduit par des variations périodiques bien déterminées (400 000, 100 000, 40 000, 20 000 ans) et d'autres dont l'origine ne l'est pas encore (7 000, 1 500 ans).

La composition physicochimique de l'atmosphère varie aussi selon la position qu'occupent les continents à la surface de la planète – de la concentration aux pôles à de rares époques géologiques à l'équateur à d'autres – et selon l'abondance en différents gaz, dont ceux qui jouent, aux côtés de la vapeur d'eau, un rôle dans l'effet de serre (dioxyde de carbone et méthane).

Pendant que l'espèce humaine s'étendait sur la planète, l'intensité du cycle de l'eau a profondément varié et modifié surface, biodiversité et morphologie. Pour s'en tenir à deux époques de la préhistoire, alors que l'homme avait déjà atteint un niveau de développement culturel et social élevé – il avait déjà orné la grotte Chauvet (29 000 ans) et celle de Lascaux (17 000 ans) – une période glaciaire a concentré il y a 18 000 ans de grandes quantités de glace aux pôles ; elle s'étendait jusqu'aux emplacements actuels de Londres et de Bruxelles, alors que le niveau des océans était plus bas de 120 m par rapport à notre époque, qu'une large fraction de la plate-forme péricontinentale émergeait et que les côtes étaient repoussées très loin vers l'océan.

Il y a 8 000 ans, la température moyenne du globe s'étant significativement accrue, les inlandsis polaires et les glaciers ayant beaucoup fondu, le Groenland était couvert de prairies sur ses bordures et le Sahara recouvert d'une savane parsemée de lacs, habitée de chasseurs qui ornaient la grotte du Hoggar.

Ce rapport s'inscrit dans le temps historique et évoque les prochaines décennies. À cette échelle de temps, si les variations climatiques sont significatives, elles restent modestes. L'homme n'est plus seulement spectateur de l'évolution

du monde et de son climat, il en est aussi acteur. Si, sans lui, le climat varie beaucoup, parfois rapidement (quelques décennies), l'accroissement de l'activité humaine, liée à une démographie en croissance très rapide, deviennent deux paramètres majeurs du cycle de l'eau.

L'humanité s'est développée car les famines et les épidémies ont beaucoup diminué depuis quelques siècles et, avec elles, la mortalité, tout particulièrement la mortalité infantile. Depuis peu, la durée de la vie croît. Ces transformations interfèrent avec le cycle de l'eau par augmentation de l'effet de serre. Celle-ci est liée au développement industriel qui accroît les émissions de dioxyde de carbone par déstockage du carbone des combustibles fossiles, et à l'agriculture, qui accroît la quantité de méthane émise par les végétaux et les animaux. La température, donc, influe sur la vitesse du cycle de l'eau, sur la fonte des glaces, sur le régime des vents et des courants océaniques, amplifiant les processus naturels. Ceci devient désormais préoccupant puisque la population humaine est passée de environ un milliard à six milliards d'habitants en deux siècles. Mais l'état actuel n'est pas satisfaisant pour tous : un milliard d'hommes ne disposent pas d'assez d'eau potable, et ce chiffre atteint 2,5 milliards si l'on considère l'assainissement défaillant de l'eau. Il convient donc de répondre à deux défis :

- rattraper le retard à l'amélioration du cadre de vie de près de la moitié de l'humanité actuelle ;
- prévoir l'accroissement de la population qui, dans les cinquante prochaines années, pourrait presque doubler avant de se réduire beaucoup et vite, selon les prévisions démographiques.

1. Nourrir douze milliards d'hommes

Au cours des derniers siècles, les techniques agricoles et la généralisation du commerce ont permis de réduire des famines dans les pays développés. Les surfaces cultivées ont été accrues : elles couvrent 1 240 millions d'hectares en cultures pluviales et 260 millions d'hectares en cultures irriguées. L'accroissement de ces deux formes mérite réflexion car il n'est pas possible d'augmenter la productivité sans accroître fortement, dans les mêmes proportions, l'irrigation telles qu'elle est pratiquée de nos jours. Des recherches, tant technologiques que chimiques, s'imposent (engrais, pesticides, nouvelles espèces de blé, de riz et de maïs appropriées).

L'extension des aires cultivées et l'augmentation de la productivité sont indispensables, mais l'état actuel des connaissances ne le permet pas, d'autant plus que les modes de nutrition changent. Actuellement, une part importante

de l'humanité ne consomme de la viande que modestement ; sur plusieurs continents, le poulet est la principale source : il demande 4,1 tonnes de céréales pour une tonne de viande. Si les habitudes alimentaires de plusieurs pays venaient à suivre le modèle occidental, le problème s'aggraverait : en effet, une tonne de viande de bœuf nécessite trois fois plus de blé que le poulet, donc trois fois plus de surfaces cultivables ; dans l'état actuel des sols et de la productivité, ces surfaces ne sont pas disponibles.

Une spécialisation de production pourrait s'avérer nécessaire : l'Europe, l'Amérique du Nord, le Brésil, tous placés dans des zones géographiques où l'agriculture pluviale peut se développer, pourrait ainsi exporter des denrées agricoles, ce qui reviendrait à exporter de l'eau virtuelle.

Dans chaque pays existent de vastes bassins sédimentaires où sont piégées des nappes d'eaux souterraines permettant une irrigation, mais leur exploitation est limitée par leur réalimentation.

Pour nourrir l'humanité de demain, il convient donc d'accroître la production sans polluer, et pour cela des travaux de recherche sont nécessaires mais, quel que soit le succès de ces dernières, des échanges commerciaux mondiaux ne le sont pas moins.

2. Prévenir les maladies anciennes et émergentes

Les eaux stagnent et circulent. Dans les mégalo-poles, les villes et les villages, des réseaux d'eaux usées drainent et concentrent les eaux polluées par l'activité humaine ; ils véhiculent microbes et produits chimiques, ils sont mal séparés des eaux potables ou industrielles et développent des épidémies qui empêchent la résorption de la mortalité infantile.

L'assainissement des eaux est actuellement une nécessité technique et économique.

3. Veiller à permettre la résilience d'écosystèmes à quantifier et à créer

Les écosystèmes aquatiques continentaux constituent des milieux précieux pour le développement harmonieux du cycle de l'eau. Ils sont très fragiles : chacun d'eux peut subir des variations de ses différents constituants autour d'une position d'équilibre, mais une variation trop forte empêche la résilience, c'est-à-dire le retour à l'équilibre.

L'analyse des écosystèmes actuels grâce à des observations de longue durée, accumulées selon des protocoles rigoureux, progresse rapidement. Il en va ainsi des données historiques, comme par exemple celles mises en évidence depuis le haut Moyen Âge, où les climats étaient plus chauds que le climat actuel (le « beau Moyen Âge » de Leroy-Ladurie), suivi du petit Âge glaciaire débordant le XII^e siècle où les climats étaient plus rudes qu'actuellement, et ceci jusqu'aux écosystèmes contemporains. De telles séquences éclairent les possibles modalités de l'évolution des écosystèmes et le passage d'un système résilient à un autre.

Le pas suivant à accomplir doit permettre de prévoir les modalités d'installation des écosystèmes, conséquences des modifications du réseau hydraulique naturel actuel, afin de maintenir et même d'améliorer l'état sanitaire et nutritionnel d'une population mondiale dont il est certain que le taux de croissance sera considérable jusqu'aux années 2050 : la population doublera, rappelons-le dans les cinquante prochaines années.

Cette nécessité implique un très fort développement des sciences écologiques vers l'écologie théorique et quantitative d'une part, appliquée de l'autre.

Les retours d'expériences de grands travaux réalisés depuis les temps historiques (assèchement de marécage à des fins agricoles et sanitaires, implantations de barrage géants, récents et en cours : Nil, Danube, Mekong, Yang-Tsé, ...) sont l'objet d'études écologiques ; elles devront se développer pour accéder à une écologie prédictive quantifiée, laissant aux autorités politiques la charge de décider des travaux à entreprendre, et ne se bornant pas à lister des modifications du milieu originel.

Le réchauffement climatique, ses conséquences et son atténuation sont l'objet de nombreux travaux internationaux qui aboutissent à des décisions nationales, européennes et internationales. Il en est de même de la politique de santé publique ou de la nécessité d'accroître la production d'énergie sans accroître les émissions de gaz à effet de serre.

En revanche, la croissance démographique et ses conséquences sur les besoins alimentaires de dix à douze milliards d'humains, dans les cinquante prochaines années, en sont encore au stade de colloques internationaux de prise de conscience. Au terme de ce rapport, apparaîtra au lecteur la nécessité de développer de toute urgence les disciplines écologiques et, en particulier, une écologie capable de modéliser les conséquences du réchauffement climatique, ce qui permettrait de mieux tirer profit des eaux continentales, clef de voûte de la satisfaction des besoins alimentaires et de l'amélioration de la santé humaine sur la planète.

COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL

Animateur

Ghislain de MARSILY

Membre de l'Académie des sciences, de l'Académie d'agriculture et de l'Académie des technologies — Professeur émérite à l'université Pierre-et-Marie-Curie et à l'École nationale supérieure des mines de Paris

Membres du groupe

Christian AMATORE

Membre de l'Académie des sciences — Professeur à l'École normale supérieure et à l'université Pierre-et-Marie-Curie

Jean-Claude ANDRÉ

Correspondant de l'Académie des sciences — Directeur du Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique (Cerfacs)

Thierry CHAMBOLLE

Conseiller du Président de Suez pour le développement durable — Membre de l'Académie des technologies

Henri DÉCAMPS

Correspondant de l'Académie des sciences — Directeur de recherche émérite au Centre national de la recherche scientifique (CNRS)

Pierre DUBREUIL

Membre de l'Académie d'agriculture — Directeur de recherche honoraire de l'Institut de recherches pour le développement (IRD)

Philippe JAMET

Professeur à l'École des mines de Paris, Attaché pour la Science et la Technologie à l'ambassade de France à Washington

Jacques LABRE

Relations institutionnelles et stratégie — Suez Environnement

Georges PÉDRO	Correspondant de l'Académie des sciences — Secrétaire perpétuel honoraire de l'Académie d'agriculture de France
Pierre-Alain ROCHE	Directeur des transports maritimes, routiers et fluviaux au ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer
Daniel ZIMMER	Directeur exécutif du Conseil mondial de l'eau

Coordonnateur

Jean DERCOURT	Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences — Professeur émérite à l'université Pierre-et-Marie-Curie
---------------	---

Chargée de mission

Janine RIVELINE	Maître de conférences à l'université Pierre-et-Marie-Curie
-----------------	---

Ont également participé à la rédaction du rapport

Chapitre 3

Olivier SCHLOSSER	Médecin expert au Centre international de recherche sur l'eau et l'environnement (CIRSEE) — Suez Environnement
Jean-François LORET	Centre international de recherche sur l'eau et l'environnement (CIRSEE) — Suez Environnement
Isabelle BAUDIN	Suez Environnement
Pascal BEAUDEAU	Institut de veille sanitaire (InVS)
Cassilde BRENIÈRE	Lyonnaise des eaux — France
Auguste BRUCHET	Suez Environnement
Nadine DUMOUTIER	Suez Environnement

Jean-Jacques GRANDGUILLAUME	Suez Environnement
Valentina LAZAROVA	Suez Environnement
Yves LÉVI	Faculté de Pharmacie, université Paris-Sud
Philippe PIRIOU	Suez Environnement
Hugues VANDEN BOSSCHE	Suez Environnement
<i>Chapitre 4</i>	
Hervé DOUVILLE	Centre national de recherches météorologiques (CNRM) — Météo-France Toulouse
Katia LAVAL	Laboratoire de météorologie dynamique du CNRS (UMR 8539), université Paris VI
Daniel CARIOLLE	Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique (Cerfacs), Toulouse
Serge PLANTON	Centre national de recherches météorologiques (CNRM) — Météo-France Toulouse

Auteurs des encadrés

Jean-Claude ANDRÉ	Correspondant de l'Académie des sciences
Jean-François BACH	Membre de l'Académie des sciences
Pascal BEAUDEAU	Institut de veille sanitaire
Mustapha BESBES	École nationale d'ingénieurs de Tunis
Gilles BILLEN	CNRS, université Paris VI
Olivier BOMMELAER	Agence de l'eau Seine-Normandie
Mokhtar BZIOUI	Conseil mondial de l'eau
Henri DÉCAMPS	Correspondant de l'Académie des sciences
Hervé DOUVILLE	Centre national de recherches météorologiques (CNRM), Météo-France, Toulouse

Pierre DUBREUIL	Académie d'agriculture de France
Josette GARNIER	CNRS, université Paris VI
Daniel GERDEAUX	Inra, Thonon
Janine GIBERT	Université Claude Bernard Lyon 1
Philippe KEITH	Muséum national d'histoire naturelle
Jacques LABRE	Suez Environnement
Yann LAURANS	Agence de l'eau Seine-Normandie
Katia LAVAL	Laboratoire de météorologie dynamique du CNRS (UMR 8539), université Paris VI
Christian LÉVÊQUE	IRD et Muséum national d'histoire naturelle
Yves LÉVI	Faculté de pharmacie, université Paris-Sud
Grégoire MAILLET	Cerege, université Aix-Marseille III
Ghislain de MARSILY	Université Paris VI
Suzanne MÉRIAUX	Académie d'agriculture de France
Guy MEUBLAT	Université Paris XIII
Jean-Marc MOISSELIN	Météo-France – Toulouse
Nguyen Tien DUC	Agence de l'eau Seine-Normandie
Joël NOILHAN	Centre national de recherches météorologiques (CNRM), Météo-France, Toulouse
Alain PERRIER	INAPG et Académie d'agriculture de France
Xavier POUX	Engref et Asca
Mireille PROVANSAL	Université Aix-Marseille I – Cerege
Pierre RIBSTEIN	Université Paris VI
Pierre-Alain ROCHE	Ministère des transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer
François SABATIER	UMR CNRS
Omar M. SALEM	General Water Authority, Tripoli
Olivier SCHLOSSER	Suez Environnement
Daniel TERRASSON	Cemagref

Bernard THÉBÉ	IRD
Claude VELLA	Université Aix-Marseille I
Daniel ZIMME	Conseil mondial de l'eau

Liste des personnes auditionnés

Pascal BEAUDEAU	Institut de veille sanitaire (InVS)
Gilles BILLEN	CNRS, UMR Sisyphe, université Paris VI
Daniel CARIOLLE	Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique (Cerfacs), Toulouse
Anny CAZENAVE	Membre de l'Académie des sciences — Centre national d'études spatiales (Cnes)
Hervé DOUVILLE	Centre national de recherches météorologiques (CNRM), Météo-France, Toulouse
Dominique DRON	Ministère de l'Écologie et du Développement durable
Agnès DUCHARNE	CNRS, UMR Sisyphe, université Paris VI
Jacques GAILLARD	SOGREAH Consultants
Marie-Odile GUTH	Ministère de l'Écologie et du Développement durable
Yann LAURANS	Agence de l'eau Seine-Normandie
Katia LAVAL	Laboratoire de météorologie dynamique du CNRS (UMR 8539), université Paris VI
Jean-Claude LEFEUVRE	Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) et université Rennes I
Antoine MONTIEL	Eau de Paris
Xavier POUX	Engref, Bureau ASCA
René SEU	École nationale de la santé publique de Rennes
Sébastien TREYER	Ministère de l'Écologie et du Développement durable
Daniel VIDAL-MADJAR	CNRS

TABLE DES MATIÈRES

Rapport Science et Technologie	iii
Composition du Comité RST	v
Avant-propos	ix
Composition du groupe de travail	xv
Introduction	1
CHAPITRE 1 Eau, aménagement et usages	9
1. Les disparités des bilans besoins-ressources à l'échelle mondiale : démographie et alimentation	12
1.1. L'état des lieux des consommations et de leurs évolutions	12
1.2. L'agriculture et les modes de consommation, facteurs clés des évolutions futures	20
1.3. Risques de pénuries d'eau et d'alimentation et tensions sur les marchés mondiaux ; conséquences sur l'agriculture mondiale . . .	23
1.4. Des ébauches de solutions	24
1.5. Conclusion	31
2. Une échelle intermédiaire de gestion des ressources, de préservation des milieux et d'aménagement intégré : grands bassins versants ou grands aquifères	32
2.1. Niveau d'équipement de régulation des ressources en eau et développement	33
2.2. Afrique, continent de tous les dangers	38
2.3. Chine et Asie du Sud-Est	58
2.4. Iles d'outre-mer	64

2.5. La mise en œuvre en France de la directive-cadre sur l'eau : développer des capacités d'évaluation et de prospective	66
2.6. Atouts et pistes de progrès concernant la gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle des bassins versants	73
3. Une échelle locale où les grandes métropoles constituent des nœuds de concentration tels qu'enjeux, difficulté et complexité y prennent une tournure particulière	76
3.1. Démographie	77
3.2. Une crise de l'urbanisme ?	79
3.3. Risques rares d'inondations et fragilité des grands systèmes urbains	87
3.4. Conclusion	93

CHAPITRE 2 Écosystèmes aquatiques 103

1. Les organismes vivants, témoins des états des eaux continentales	107
1.1. La santé des écosystèmes	108
1.2. Surveillance biologique des eaux	110
1.3. Perturbations naturelles et provoquées	112
1.4. Le « capital nature »	115
2. La résilience des socio-écosystèmes aquatiques	116
2.1. Alternances d'états	117
2.2. Cycles adaptatifs et emboîtements d'échelles	119
2.3. Notion de socio-écosystème	122
3. Gérer la résilience dans un environnement fluctuant	123
3.1. De l'importance des échelles d'espace et de temps	123
3.2. La biodiversité, condition de la résilience	124
3.3. La question des espèces envahissantes	128
3.4. Construire des scénarios d'avenir	129
4. Prescriptions pour la santé écologique des eaux continentales	130
4.1. Prendre en compte l'environnement terrestre des eaux continentales	130
4.2. Prendre en compte les besoins des organismes aquatiques et riverains	133
4.3. Préserver les lacs et les rivières de l'eutrophisation	135
4.4. Aménager les zones humides et les ripisylves	138
5. Un devoir de vision planétaire	141
5.1. Le système hydrologique global	141
5.2. Disparités régionales	143
5.3. Du bon usage de l'écologie	144

CHAPITRE 3	Eau et santé	151
1.	Risques émergents et nouvelles préoccupations	153
1.1.	Pathologies infectieuses hydriques émergentes	154
1.2.	Accroissement de la vulnérabilité de la population (Cloete <i>et al.</i> , 2004)	159
1.3.	Pollution des ressources en eau par des substances chimiques produites par l'activité humaine	160
1.4.	Pollution des ressources en eau par des substances chimiques d'origine naturelle	163
1.5.	Risques liés à la pratique des loisirs aquatiques	164
1.6.	Influence du climat et de ses variations	166
1.7.	Nécessité de hiérarchiser les dangers	168
2.	Enjeux spécifiques aux pays en développement	171
2.1.	Améliorer l'information statistique	171
2.2.	Évaluer les bénéfices de l'accès à l'eau potable et à l'assainissement	174
2.3.	Promouvoir une réutilisation contrôlée des eaux usées	176
2.4.	Systèmes alternatifs d'assainissement	177
3.	Évolution des outils méthodologiques et normatifs	177
3.1.	Analyse et gestion du risque sanitaire	177
3.2.	Indicateurs d'impact sanitaire	181
3.3.	Les normes de qualité de l'eau	182
4.	Prévenir les risques par une meilleure gestion de la ressource	183
4.1.	Contrôler les pollutions d'origine agricole	183
4.2.	Réduire l'impact des eaux résiduaires	185
4.3.	Recourir au génie écologique	186
4.4.	Utiliser les processus hydrogéochimiques naturels	186
5.	Améliorer le traitement des eaux de distribution	188
5.1.	Optimiser les procédés	188
5.2.	Principales innovations attendues	189
6.	Contrôler la qualité de l'eau : outils analytiques et de modélisation	190
6.1.	Transfert des micropolluants dans le sol et l'hydrosystème	190
6.2.	Contrôle de la qualité microbiologique de l'eau	191
6.3.	Contrôle des paramètres chimiques	192
6.4.	Évolution de l'eau dans les réseaux de distribution	192
7.	Anticiper et gérer les crises hydriques et sanitaires	194
7.1.	Sécurité des systèmes d'eau potable	194
7.2.	Secours d'urgence	195

8. Former et informer le public	195
---	-----

CHAPITRE 4 Eau et climat 201

1. Cycle énergétique et cycle de l'eau, de l'échelle globale vers l'échelle régionale	205
1.1. Le cycle énergétique global	205
1.2. Le cycle de l'eau	207
1.3. Quelques remarques sur les circulations atmosphériques, le recyclage local de l'eau, et le climat local	210
1.4. L'hétérogénéité spatiale des phénomènes	211
2. Eau, chimie et climat	211
2.1. Chimie en phase homogène	212
2.2. Chimie en phase hétérogène	213
3. Le changement climatique d'origine anthropique	214
3.1. Augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (GES)	214
3.2. L'eau, principal GES	215
3.3. Les nuages, leurs rôles vis-à-vis de l'effet de serre	216
4. Le cycle hydrologique en climat perturbé	218
4.1. Les précipitations	218
4.2. L'eau du sol	221
4.3. Le manteau neigeux	225
4.4. Les débits des fleuves	226
5. Les événements extrêmes et les possibles surprises climatiques	228
6. Sur quelques autres impacts des changements climatiques et hydrologiques	232

Conclusion 239

1. Effet de la croissance démographique	240
2. Effets des changements climatiques	241
2.1. Climats moyens	241
2.2. Climat, variabilité et événements extrêmes	244
2.3. Les crues	246
2.4. Les sécheresses	247
3. La question agricole et l'alimentation humaine	248
4. La qualité des eaux	254
4.1. La résilience des écosystèmes aquatiques face à la pression anthropique	254
4.2. La qualité de l'eau potable	255

5. Les conséquences des changements en Europe	257
5.1. Disponibilité de l'eau	257
5.2. Qualité des eaux	258
Recommandations	259
Recommandations	271
Table des sigles	283
Groupe de lecture critique	289
Composition du Groupe de lecture critique	291
Commentaire de EDF	295
Commentaire de l'Institut de recherche pour le développement	301
Commentaires de la Société hydrotechnique de France	305
Commentaire de Veolia	311
Commentaire du WWF-France	315
Présentation à l'Académie des sciences, par Paul Caro	319

INTRODUCTION

L'eau dans une perspective de changements

GHISLAIN DE MARSILY

Objectif

Ce rapport sur les eaux continentales, établi par le Comité RST de l'Académie des sciences à la demande du ministre chargé de la Recherche, s'est donné pour objectif d'apporter un éclairage sur les difficultés que nos sociétés sont susceptibles de rencontrer dans le domaine de l'eau, à court, moyen et long terme, principalement en France, mais aussi dans le reste du monde, et en particulier dans les pays en développement. L'analyse de ces difficultés potentielles, dont tout le monde pressent qu'elles pourraient être dramatiques, l'analyse de leur probabilité d'occurrence, l'analyse de leur échelonnement dans le temps, ont pour objet de tenter, par l'action, de les prévenir, ou, si elles survenaient, d'en amoindrir les effets.

Par action, nous entendons l'action publique. L'objectif du rapport est donc de tenter d'anticiper l'arrivée de situations de crises, tant brutales que progressives ou pernicieuses, en préconisant des mesures pour tenter de s'opposer à l'arrivée de ces situations. Les actions retenues dans ce rapport se limitent à deux types :

- soit le lancement de programmes d'acquisition de données ou de recherche, dans ces domaines ou disciplines où aura été identifié un déficit de connaissance, dont les conséquences pourraient être importantes dans un objectif de précaution ;
- soit aussi l'action préventive, réglementaire ou économique, quand les connaissances actuelles sont jugées déjà suffisantes pour pouvoir préconiser cette action, avec de faibles risques de se tromper.

L'action publique concerne au premier chef le territoire national ; cependant, les problèmes de l'eau sont globaux, régionaux ou planétaires, et ont une dimension géopolitique reconnue. L'occurrence d'une crise majeure, quel que soit le pays où elle se produirait, ne saurait manquer de concerner la France, ne serait-ce que par l'aide humanitaire qu'elle souhaiterait y consacrer. De plus, le rôle de la France dans les débats internationaux sur les problèmes de l'eau et de la faim dans le monde, qui se succèdent environ tous les deux ans, sans grands résultats jusqu'ici d'ailleurs, est considérable ; elle peut donc, si elle le souhaite, y proposer des actions en partenariat, réfléchies, raisonnables. Enfin, la France conduit, par exemple par le biais de l'Institut de recherche pour le développement (IRD), ou du Centre de coopération internationale en recherche agronomique (Cirad), des recherches où sont abordés directement les problèmes de l'eau, en partenariat avec les pays du Sud : la France est donc en mesure, par ce biais, d'agir sur la recherche et, partant, sur l'action dans ces pays. Pour cette raison, ce rapport s'appuie également sur un autre rapport RST de l'Académie, *Sciences et pays en développement (Afrique subsaharienne francophone)* (RST n° 21).

La crise

Les difficultés envisagées portent sur les insécurités ou crises liées à la sécheresse, au manque d'eau, aux crues, aux excès d'eau, et à la détérioration de la qualité de l'eau et des écosystèmes. Si aucune de ces perturbations, qui sont pourtant sûres de se produire, n'ont des conséquences inéluctables, à condition de savoir en anticiper et contrecarrer le cours, les ingrédients qui en préparent l'avènement sont connus. Trois d'entre eux sont patents :

1. **Les changements démographiques.** Ayant dépassé depuis peu le chiffre de six milliards d'êtres humains, la planète croît encore aujourd'hui au rythme de soixante-dix millions d'individus par an environ. De plus, les zones à forte croissance démographique sont souvent celles où les ressources en eau sont déjà sous tension, ou également les plus menacées par les changements climatiques annoncés. Si les démographes prévoient aujourd'hui une baisse du taux de croissance, ils s'accordent cependant à penser que les effectifs maxima de la planète pourraient se situer dans une cinquantaine d'années entre huit et douze milliards d'individus, sous forme d'un palier ou d'une pointe avant de redescendre. Il ne faut pas perdre de vue, de plus, qu'il existe une rétroaction très significative entre la croissance démographique et le climat, par le biais par exemple de la déforestation (pression anthropique croissante sur les espaces naturels, qui modifie localement le cycle de l'eau et peut avoir une influence globale) et de la consommation des énergies fossiles (globalement croissante) qui sont les principaux moteurs du renforcement actuel de l'effet de serre.

Associée à la croissance de la population, l'augmentation du taux d'urbanisation de 50 % aujourd'hui à 80 % dans cinquante ans va voir doubler la population urbaine, essentiellement dans les mégalo-poles du tiers monde : c'est un enjeu mondial considérable, du point de vue de la santé, de l'alimentation, de l'énergie ou de la sécurité que de réussir sans dommage cette croissance urbaine. La question de l'eau, en quantité et en qualité, y est centrale.

2. **Les changements technologiques et socio-économiques.** Le développement technologique peut rendre nos sociétés plus efficaces, plus robustes, mais parfois aussi plus fragiles, plus vulnérables aux conséquences de crises qui, autrefois, n'auraient pas eu d'effets désastreux. Les changements technologiques peuvent avoir en retour des conséquences sur le cycle ou l'utilisation des eaux, comme par exemple les changements intervenus en irrigation, le développement des mégalo-poles et les besoins en eau et assainissement qu'il engendre. Enfin, le développement technologique s'accompagne de la fabrication de constituants nouveaux, produits principaux ou sous-produits de l'activité économique, dont le devenir est

le plus souvent le rejet (direct ou différé) dans l'environnement. La qualité des eaux continentales en est au premier chef affectée.

Ce nouveau potentiel technologique pose une question de société dans le domaine de l'eau : la capacité de réparation des pollutions s'accroît, mais ne faut-il pas lui préférer des mesures de prévention ?

3. **Les changements climatiques** liés aux émissions anthropiques dans l'atmosphère de gaz à effets de serre. Le renforcement de l'effet de serre est aujourd'hui tenu pour certain, la nature et l'amplitude de ses effets font seuls l'objet de recherches, et tout particulièrement, les effets sur le cycle de l'eau. Ces changements doivent être vus aussi bien sur les évolutions progressives, que sur les événements climatiques extrêmes, dont les fréquences d'occurrence sont susceptibles de varier fortement, et éventuellement sur les courants marins et les phénomènes océaniques, pouvant affecter en retour les températures et le cycle de l'eau.

Actions

Le rapport abordera ces questions en s'attachant tout d'abord à ce que pourrait être l'évolution lente de l'état ou du cycle des eaux continentales, sous l'effet conjugué de tous ces facteurs. Il s'agira donc des comportements moyens, qui peuvent requérir une action publique, mais dont la mise en œuvre peut être programmée sereinement, sachant pourtant que l'inertie des systèmes étudiés (population mondiale et climat) fait que les décisions prises aujourd'hui n'auront d'effets globaux significatifs que dans quelques dizaines d'années.

Il distinguera ensuite les évolutions subites, de caractère extrême, liées à des aléas climatiques, qui demandent la mise en œuvre immédiate d'une action publique curative. Celle-ci sera d'autant plus efficace que les événements incertains auront été anticipés, les moyens d'en traiter les effets prévus, et que des mesures préventives auront déjà été prises pour en minimiser les conséquences.

Après avoir cherché à inventorier les problèmes, à faire le point sur l'état des connaissances, à tenter de quantifier les incertitudes résiduelles ou les probabilités d'occurrence des événements délétères redoutés, quand elles existent, le rapport formulera des recommandations, tant sur les actions à entreprendre, dans un calendrier de court, moyen et long terme, que dans les recherches ou acquisitions de connaissances à programmer. L'ensemble de ces recommandations doit être vu dans une perspective européenne, ou même internationale, en particulier pour les partenariats sur les effets des changements climatiques, sur le domaine de l'observation de la Terre, sur la santé, ou sur la collaboration avec les pays du Sud.

Le rapport est essentiellement orienté sur les problèmes de ressources en eau, de production alimentaire, d'écosystèmes et de qualité de l'eau, en particulier pour l'eau potable, et de risques d'inondation. Il est clair que de multiples autres sujets auraient pu (ou dû) être traités, mais que, **devant l'ampleur de la tâche, des choix ont dû être faits**. Nous donnons ici une brève énumération des questions principales qui ne seront pas traitées.

Nous n'aborderons pas ici les changements de nature sociopolitique, tels que les conflits éventuels liés à l'eau, qui sont déjà une cause importante et sans doute amenés à le devenir davantage, d'insécurité dans le monde. De même, les questions touchant aux causes de la croissance démographique ne seront pas abordées, considérant que les prévisions démographiques sont une des données d'entrée du problème.

Les problèmes de l'alimentation en eau potable du milliard au moins d'êtres humains qui n'y ont pas accès aujourd'hui et des deux milliards et demi d'être humains qui n'ont pas accès à un assainissement satisfaisant, problèmes immenses mais de nature principalement économique, et sur lesquels beaucoup a déjà été dit (voir par exemple la *Vision mondiale de l'eau*¹, les actes des congrès mondiaux de l'eau des dix dernières années, le Rapport Camdessus², etc.), ne seront qu'indirectement mentionnés.

Le lien entre eau et énergie, qui conditionne pourtant par exemple l'apport d'eau en irrigation, l'énergie hydroélectrique, le refroidissement des centrales thermiques, le dessalement de l'eau de mer, etc., ne sera qu'indirectement mentionné.

Les eaux continentales sont bien évidemment en contact avec les eaux marines le long des zones côtières et estuariennes. Ces deux milieux ont donc des liens importants, et agissent l'un sur l'autre. Les changements climatiques vont entraîner une variation du niveau des mers et une modification du trait de côte. De plus, une part importante de l'humanité s'est installée le long des côtes, ou sur des îles, renforçant ainsi l'intérêt de ces zones d'interface. Mais ces interactions, fort complexes, ne seront pas développées ici. De même, les spécificités hydrologiques des Territoires français d'outre-mer (Dom-Tom) ne seront pas, faute de temps et de place, développées, à quelques rares exceptions près. Mais bon nombre de recommandations générales valables pour le territoire métropolitain sont également pertinentes pour ces régions.

¹ Cosgrove WJ., Rijsberman FR. (2000). *World Water Vision, Making water everybody's business*. World Water Council Report.

² Camdessus M., Winpey J. et al. (2003). *Financer l'eau pour tous*. Rapport du Panel mondial sur le financement des infrastructures de l'eau. Conseil Mondial de l'Eau.

La question de l'eau est si fondamentale pour les sociétés humaines que l'organisation de ces sociétés face à l'eau et à son usage est l'une des facettes incontournables du problème. Pourtant, le rapport se concentre principalement sur les questions techniques, et n'aborde pas directement les questions relevant des sciences humaines, sociales et économiques. Il constitue donc une contribution à la réflexion sur la prise de décision, apportant au débat les éléments de nature scientifique et technique (climat, systèmes de production alimentaire ou d'eau potable, fonctionnement des écosystèmes, etc.) autour desquels pourra s'organiser ensuite la réflexion pouvant conduire à l'action, et prenant en compte les contraintes économiques, les organisations sociales, les considérations éthiques. Notons cependant que l'Académie des sciences a déjà publié un premier rapport³ sur cette question de la gestion environnementale, à partir de la notion de territoire.

Signalons enfin que le rapport s'appuie et fait amplement référence au colloque organisé du 15 au 17 septembre 2003 par l'Académie à l'Institut de France sur le thème des eaux continentales, et dont les Comptes Rendus sont parus en janvier 2005⁴.

Plan du rapport

Nous aborderons successivement les points suivants :

Chapitre 1 : Eau, aménagements et usages

1. Bilan besoins-ressources à l'échelle mondiale et alimentation
2. La gestion des eaux à l'échelle régionale des bassins versants
3. L'eau à l'échelle locale des grandes mégalopoles

Chapitre 2 : Écosystèmes aquatiques

Chapitre 3 : Eau et santé

Chapitre 4 : Eau et climat

Conclusions

Recommandations (en français et en anglais).

³ *Études sur l'environnement. De l'échelle du territoire à celle du continent* (2003). Rapport RST no 15, animé par Paul Caseau. Éditions Tec & Doc, Paris.

⁴ C. R. *Geoscience* (2005). Tome 37, fascicule 1-2, numéro thématique « Les eaux continentales » Gh. de Marsily, rédacteur invité, 206 p.

CHAPITRE 1

Eau, aménagement et usages

PIERRE-ALAIN ROCHE ET DANIEL ZIMMER

Introduction

Il n'est plus guère, à la surface du globe, de système hydrologique continental, qu'il soit superficiel ou souterrain, qui ne soit, à un certain degré, aménagé ou anthropisé. L'ingénierie des hydrosystèmes (aménagement et gestion) a pour objet d'agir de façon pertinente sur les ressources en eau, dans l'espace et dans le temps, pour satisfaire les besoins et les attentes (usages et mesures de protection) liés au développement des sociétés humaines et au maintien de la qualité des écosystèmes. Une telle ingénierie requiert une compréhension globale couvrant à la fois les systèmes hydrologiques, les écosystèmes (chapitre 2), les dimensions sociales et économiques de la relation des sociétés humaines à l'eau, notamment les questions de santé humaine (chapitre 3) et nécessite enfin de s'interroger sur la variabilité des contrôles climatiques (chapitre 4).

L'immensité et la complexité des problèmes d'aménagements et d'usages des eaux continentales nous a amené à faire des choix, et à ne considérer qu'une très petite partie des questions qu'il aurait été souhaitable d'aborder : nous nous limiterons dans le présent chapitre à la confrontation des besoins et des ressources, et à la gestion à trois échelles principales de territoire : l'échelle mondiale, puis celle de grands bassins, et enfin celle des grandes mégapoles.

Ce chapitre sera ainsi divisé en trois parties :

1. L'échelle mondiale : celle des échanges, des grands marchés, notamment agricoles, et des grands flux migratoires ; on regardera en particulier si les ressources en eau de la planète sont suffisantes pour nourrir ses habitants, à l'échéance de 2050.
2. L'échelle des grands bassins ou aquifères : celle de la gestion et de l'aménagement, de la confrontation entre besoins et ressources, du lien usage-qualité.
3. L'échelle métropolitaine : celle de la concentration urbaine, de la satisfaction des besoins en eau et des problèmes de sécurité liés aux crues.

Les problèmes de l'énergie liée à l'eau (hydroélectricité, refroidissement) ne seront abordés qu'indirectement, par le biais des aménagements et de leur gestion, sur quelques exemples, et également au chapitre 2 sur leurs effets sur les écosystèmes. De même, les problèmes d'adduction et de distribution d'eau potable, d'assainissement, déjà très discutés par ailleurs, ne seront abordés qu'indirectement à la faveur d'exemples. Les zones d'interface entre eaux continentales et marines, malgré leur importance puisque c'est le long des côtes que se rassemble une très large fraction de la population, ne seront également citées qu'à travers quelques exemples.

1 | Les disparités des bilans besoins-ressources à l'échelle mondiale : démographie et alimentation

Les disparités de distribution des ressources en eau d'une part, et d'évolutions démographiques d'autre part, sont patentées ; l'agriculture est par ailleurs et de loin le plus gros usager de l'eau. L'échelle mondiale des marchés de denrées alimentaires est donc le facteur de couplage plus immédiat entre les questions d'eau et de démographie des divers continents. Sont ainsi en question la capacité collective mondiale à faire face aux besoins en eau à venir et à la distribution future de l'agriculture mondiale. La possibilité de fournir des aliments à la population mondiale, quelle que soit son évolution, est en effet la première question à examiner quand on réfléchit aux problèmes de l'eau.

1.1 L'état des lieux des consommations et de leurs évolutions

1.1.1 Quelles sont les ressources disponibles¹ ?

Les continents de notre planète reçoivent en moyenne 119×10^{12} m³/an de précipitations (près de 800 mm/an) parmi lesquelles :

- 44×10^{12} m³/an proviennent de l'excès de l'évaporation sur les précipitations au-dessus des océans : la même quantité retourne aux océans principalement *via* les fleuves et dans une moindre mesure *via* les nappes souterraines et la fusion des glaces polaires ;
- 75×10^{12} m³/an proviennent de l'évapotranspiration à partir des continents eux-mêmes.

Ainsi, 63 % des précipitations sur les continents sont utilisées par les écosystèmes terrestres ou directement réévaluées par les sols² dans un « recyclage » permanent dont la maille est de l'ordre de quelques centaines de kilomètres³, et 37 % suivent un cycle plus long impliquant les océans.

¹ Les chiffres ci-dessous proviennent de Shiklomanov, 1999. On se reportera au chapitre 4 pour une présentation plus complète du cycle de l'eau à l'échelle planétaire. On pourra constater que les mêmes grandeurs y sont données avec des valeurs un peu différentes, provenant d'une autre source : ceci indique clairement que ces estimations sont entachées de fortes incertitudes, que l'on peut grossièrement chiffrer à 20 %, au minimum, peut-être bien plus.

² On parle classiquement d'*eaux bleues* lorsqu'on parle des eaux liquides qui peuvent constituer des ressources et d'*eaux vertes* pour les autres utilisées par les écosystèmes terrestres. Les eaux vertes incluent les précipitations utilisées directement par l'agriculture.

³ C'est-à-dire que l'évaporation en un lieu donné retombe en moyenne en pluie quelques centaines de km plus loin.

La notion de « ressource en eau » se réfère classiquement aux eaux liquides en écoulement, accessibles aux usages humains. Elle néglige donc l'eau de pluie utilisée directement par l'agriculture non irriguée, qui fait partie de ce qu'on appelle « l'eau verte », celle qu'utilise aussi l'ensemble des écosystèmes naturels. Les ressources en eau se constituent à partir des 44×10^{12} m³/an d'eau douce qui rejoignent les nappes souterraines ou s'écoulent dans les cours d'eau. Toutefois une part importante des débits de ces cours d'eau s'écoule lors de crues ou dans des endroits peu habités. Il faut de plus que l'utilisation de cette eau ne mette pas en péril les équilibres et dynamiques naturels, tant en ce qui concerne les écosystèmes de surface que les nappes souterraines : les ressources renouvelables utilisables sont estimées à seulement 10 à 12×10^{12} m³/an.

Les stocks d'eau salée des océans sont considérables : $1,35 \times 10^{18}$ m³ (plus de 100 000 fois les flux annuels accessibles d'eau douce). L'usage d'eau dessalée, bien que les technologies aient beaucoup progressé, reste toutefois et restera toujours marginal à l'échelle de ces grands équilibres, même s'il est susceptible d'apporter des réponses pertinentes dans certains cas⁴.

Les stocks d'eau douce non comptabilisés dans les ressources car n'entrant pas dans le cycle annuel sont également très élevés. Les glaces représentent $2,4 \times 10^{16}$ m³, les nappes souterraines représentent 10^{16} m³ et les lacs 9×10^{14} m³ (Shiklomanov, 1999). Ces stocks représentent donc plus de 30 000 fois les ressources renouvelables annuelles utilisables d'eau douce.

1.1.2 Combien d'eau utilisons-nous ?

À l'échelle mondiale, la pression exercée aujourd'hui sur les ressources en eau par prélèvements anthropiques paraît relativement modeste. Elle représente en 2000 environ 30 % des ressources renouvelables utilisables, et les consommations (part de l'eau prélevée non restituée au milieu de prélèvement sous forme liquide) environ 15 %.

Les pénuries éventuelles d'eau sont à rechercher principalement dans la très grande hétérogénéité spatiale et temporelle des ressources disponibles, qui induisent des pressions locales beaucoup plus fortes que la moyenne. La notion de pénurie est elle-même difficile à définir. Elle doit en toute rigueur tenir compte,

⁴Essentiellement en zones côtières pour des usages d'alimentation en eau potable dans les pays disposant de ressources énergétiques peu coûteuses ; mais le rejet du sel en mer peut poser des problèmes de qualité (récifs coralliens, biodiversité...). Noter que Riyad, à 600 km de la côte, est alimenté par de l'eau dessalée, et que le Maroc parle de produire de l'eau dessalée avec de l'énergie nucléaire...

d'une part, de la pression sur les ressources (rapport entre les ressources disponibles et les prélèvements ou consommations) et d'autre part d'éléments statistiques de type « intensité-durée-fréquence » pour caractériser la variabilité temporelle. En l'absence de tels éléments statistiques, l'approche plus simple généralement retenue consiste à utiliser un seuil de 40 %⁵ des ressources renouvelables comme seuil d'apparition de pénuries pour une région ou un pays donnés. En 1995, ce seuil de 40 % était atteint ou dépassé sur 36 millions de km² de notre planète et affectait 2,1 milliards d'êtres humains, soit 35 % de la population mondiale. Les zones touchées se situent principalement dans des PED, sur un territoire allant de l'Afrique du Nord au Nord de la Chine (Alcamo *et al.*, 1999).

L'encadré 1.1 et les tableaux 1.1 et 1.2 récapitulent l'évolution des prélèvements et des consommations d'eau hors agriculture pluviale depuis le début du XX^e siècle.

Encadré 1.1

L'évolution des prélèvements et des consommations d'eau hors agriculture pluviale depuis le début du XX^e siècle

Daniel Zimmer, Conseil mondial de l'eau

Les prélèvements et consommations totaux ont été multipliés par 7 et 6 respectivement en un siècle (la population a été multipliée par 3 dans le même temps).

Le principal utilisateur d'eau est l'agriculture irriguée (66 % des prélèvements et 93 % des consommations). Le ratio consommation/prélèvement qui représente l'efficacité globale de l'irrigation a été en augmentation lente de 63 à 70 % en un siècle. Ce chiffre est cependant l'objet de débats, on trouve des valeurs allant de 33 à 50 % dans d'autres rapports. L'utilisation d'eau agricole a été multipliée par près de 6 en un siècle, croissance plus faible que les autres secteurs. Ces prélèvements sont peu importants dans les pays tempérés (13 % du total en France). Mais plus le climat est sec, plus l'agriculture doit avoir recours à l'irrigation et plus sa part dans les prélèvements augmente. Des valeurs de l'ordre de 90 % sont fréquentes dans les pays arides.

⁵À titre de comparaison, en France, les prélèvements sont de l'ordre de $32 \text{ à } 40 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{an}$, soit moins de 20 % des ressources renouvelables disponibles, suivant différentes sources.

L'eau prélevée et consommée à des fins industrielles a augmenté en un siècle d'un facteur 18 ; la part des prélèvements industriels dans les prélèvements totaux est passée de 8 à 20 % et les consommations correspondantes de 1 à 4 %. Le ratio consommation/prélèvement est resté relativement constant à 11 % tout au long du siècle.

L'eau prélevée pour des usages municipaux (sanitaires, arrosages municipaux, ...) a évolué de manière proche de celle des usages industriels. En 2000, elle représentait 10 % des prélèvements totaux et 3 % des consommations. Le ratio consommation/prélèvement a décliné régulièrement de 21 à 14 %.

L'évaporation par les barrages et réservoirs a également augmenté fortement, surtout après les années 1970 ; en 2000 elle représentait 10 % des consommations totales.

Les superficies irriguées, les prélèvements et les consommations agricoles semblent avoir suivi une relation plutôt logarithmique avec la population au cours du XX^e siècle (figure 1.1). L'augmentation des prélèvements et consommations industriels avec la population a marqué une nette rupture dans les années 1980 (figure 1.2), sans doute due à la mise en place de mécanismes de contrôle des pollutions industrielles ainsi qu'au ralentissement du rythme d'équipement en centrales électriques. Les prélèvements et consommations municipales ont suivi linéairement l'évolution de la population au cours du XX^e siècle (figure 1.3).

Au total, les prélèvements par habitant qui étaient passés de 300 m³/an en 1900 à 720 m³/an en 1980 se sont depuis stabilisés et ont entamé une lente et régulière décroissance : 640 m³/an en l'an 2000. La même évolution est constatée pour les consommations. Ces chiffres n'incluent pas l'agriculture pluviale (cf. 1.2).

1.1.3 Tensions actuelles

D'ores et déjà, des tensions se manifestent dans de nombreux pays (Tien Duc, 1999).

Au niveau local, ces tensions affectent les transferts entre secteurs. L'agriculture a toutes les chances d'y être perdante : d'une part les besoins municipaux sont toujours prioritaires (même s'ils représentent peu par rapport à l'agriculture) ; d'autre part la productivité économique de l'eau industrielle est nettement

	1900	1950	1980	1990	2000	2025	2050
Population (million)	2 000	2 542	4 410	5 285	6 181	8 000	9 200
Superficies irriguées (M ha)	47,3	101	198	243	264	307	331
Prélèvements agricoles (km ³ /an)	513	1 080	2 112	2 425	2 605	3 053	3 283
Consommation agricole (km ³ /an)	321	722	1 445	1 991	1 834	2 143	2 309
Ratio consommation/ prélèvement	63 %	67 %	68 %	70 %	70 %	70 %	70 %
Prélèvement municipaux (km ³ /an)	21,5	86,7	219	305	384	522	618
Consommation municipale (km ³ /an)	4,6	16,7	38,3	45	52,8	73,6	86,4
Ratio consommation/ prélèvement	21 %	19 %	17 %	15 %	14 %	14 %	14 %
Prélèvement industriels (km ³ /an)	44	204	713	735	776	834	875
Consommation industrielle (km ³ /an)	5	19	71	79	88	104	116
Ration consommation/ prélèvement (%)	11 %	9 %	10 %	11 %	11 %	13 %	13 %
Évaporation des réservoirs	0,3	11,1	131	167	208	302	362
Prélèvements totaux annuels (km ³ /an)	579	1382	3175	3632	3973	4710	5138
Consommation totale (km ³ /an)	330	758	1 554	1 815	1 975	2 321	2 511

Tableau 1.1

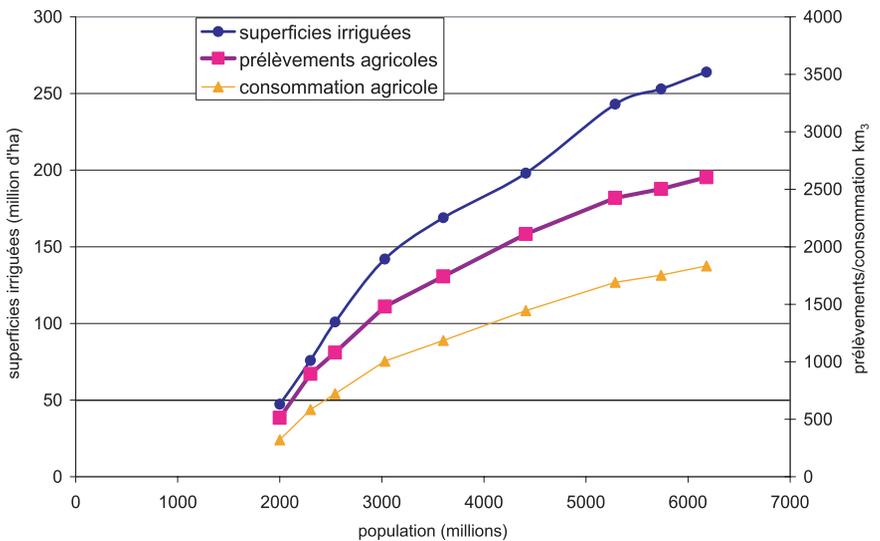
Évolution de la population, des prélèvements et des consommations d'eau des principaux secteurs au cours du XX^e siècle (d'après Shiklomanov, 1999). Prévisions pour 2025 et 2050 basées sur la poursuite des tendances observées au XX^e siècle (km³ = 10⁹ m³).

plus grande que celle de l'eau agricole. La production agricole semble augmenter moins vite depuis le début des années 2000 (l'augmentation de production agricole par habitant a été pour la première fois négative en 2000 et 2001 et la FAO a observé depuis une réaugmentation du nombre de personnes souffrant de malnutrition). Les pays d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient connaissent ces tensions depuis plusieurs décennies et y font face en important des quantités grandissantes de produits alimentaires, comme on le verra.

	Facteur multiplicatif 2000/1900	Augmentation 2000-2050 (%)
Population	3,1	49 %
Prélèvements agricoles	5,1	26 %
Consommation agricole	5,7	26 %
Prélèvements municipaux	17,9	61 %
Consommation municipale	11,5	64 %
Prélèvements industriels	17,8	13 %
Consommation industrielle	18,3	31 %
Prélèvements totaux annuels	6,9	29 %
Consommation totale	6,0	27 %

Tableau 1.2

Facteurs d'évolution de la population, des prélèvements et des consommations d'eau mondiales au cours du xx^e siècle et prévisions pour le début du xxi^e siècle (Shiklomanov, 1999).

**Figure 1.1**

Évolution des prélèvements et consommations agricoles et des superficies irriguées en fonction de la population mondiale de 1900 à 2000.

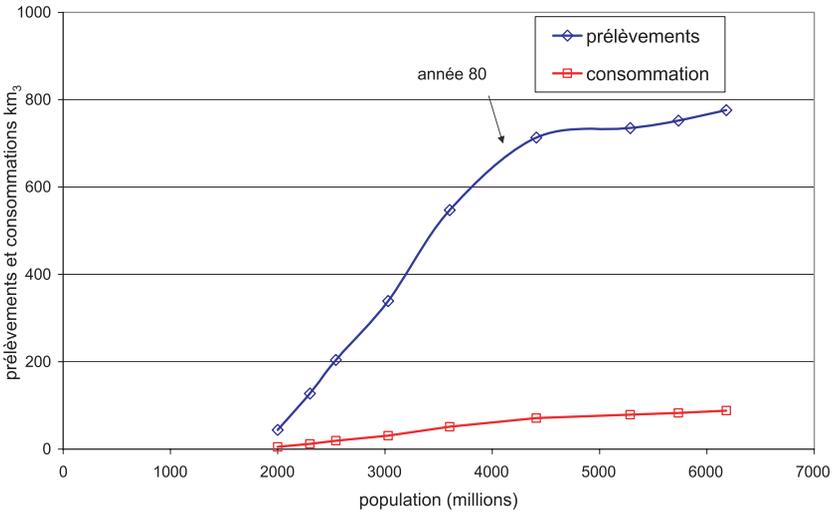


Figure 1.2

Évolution des prélèvements et consommations en eau industrielle en fonction de la population mondiale de 1900 à 2000.

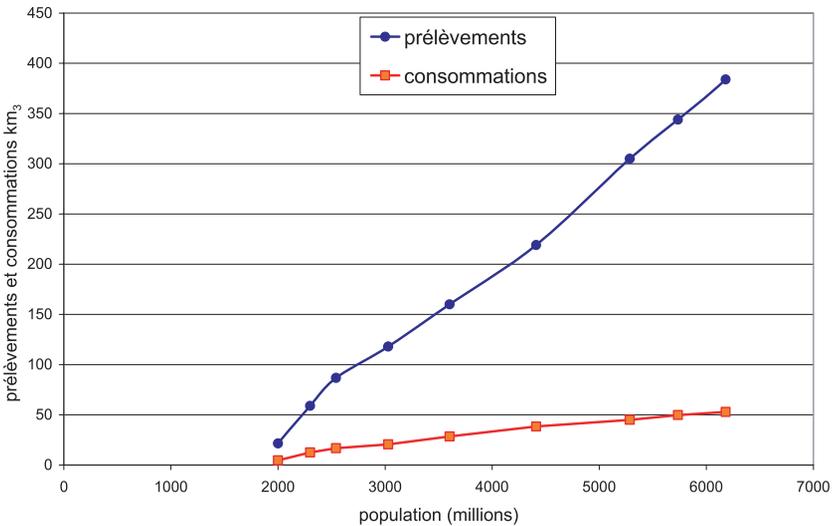


Figure 1.3

Évolution des prélèvements et consommations en eau municipale en fonction de la population mondiale de 1900 à 2000.

Il est probable que les tensions futures proviendront surtout de la grande densité de population de l'Asie, phénomène qui pourrait être aggravé si des facteurs climatiques venaient s'ajouter à des tensions déjà fortes sur les ressources

en eau. Quelques soubresauts de ces crises potentielles ont déjà été ressentis ces dernières années, notamment en 1998 lors du dernier épisode sévère d'El Niño. Bien des pays d'Asie n'ont pu jusqu'ici faire face aux difficultés que grâce à la révolution silencieuse d'une utilisation intensive des nappes souterraines. Depuis la fin des années 1970 ont ainsi « fleuri » des millions de pompes, particulièrement en Inde. L'excédent de pompage annuel dans les nappes sur les ressources renouvelables était estimé en 2000 à environ $200 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{an}$ (Cosgrove et Rijsberman, 2000) mais l'état des connaissances des aquifères souterrains est insuffisant pour permettre une véritable évaluation des risques de surexploitation et surtout de la date où cette surexploitation engendrera une nécessaire diminution des prélèvements. Des essais de recharge artificielle des nappes pendant la mousson sont en cours, notamment en Inde, pour prévenir ces risques.

Dans ce contexte, les échanges de produits alimentaires augmentent et avec eux les échanges d'eau « virtuelle » qui représentent déjà de l'ordre de $1,2 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{an}$ (Zimmer et Renault, 2003), soit près du cinquième de l'eau agricole totale (incluant l'eau de l'agriculture pluviale). On appelle en effet « eau virtuelle » la quantité d'eau qu'il a fallu utiliser pour produire les aliments échangés. La situation en Asie et en particulier en Chine constitue une grosse incertitude liée à la fois à la démographie et aux évolutions des habitudes alimentaires, pour l'instant jamais prises en compte dans les projections. Les tensions affectent d'abord les PED mais aussi l'ensemble du commerce mondial. La petite paysannerie susceptible d'alimenter les marchés locaux face à cette demande n'a jusqu'à présent que très peu bénéficié des mécanismes de gain de productivité favorables aux agricultures productives du Nord.

1.1.4 Perspectives d'évolution

Si l'on prolonge les tendances observées et en tenant compte des prévisions de population (tableau 1.2), les prélèvements d'eau totaux devraient atteindre environ $5,1 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{an}$ en 2050, soit une augmentation d'environ 30 % par rapport à l'an 2000, pour une augmentation totale de population prévue de 50 % (fourchette intermédiaire). Par habitant, les prélèvements chutent encore d'ici 2050 de 13 % par rapport à l'année 2000, c'est-à-dire de 640 à 558 $\text{m}^3/\text{hab.an}$. L'examen détaillé montre en valeur absolue une augmentation principale des prélèvements d'eau agricole pour l'irrigation de près de $0,7 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{an}$, et une forte augmentation relative (60 %) des prélèvements d'eau industrielle. Les facteurs multiplicatifs élevés observés au cours du XX^e siècle sont loin d'être atteints, ce qui s'explique tout d'abord par le faible niveau des valeurs de départ en 1900, puis par le facteur agricole. La tendance logarithmique observée tout au long du XX^e siècle conduit à une augmentation relative de 26 % seulement des prélèvements pour l'irrigation, ce qui pose de nombreuses questions examinées ci-après. Le facteur agricole porte à l'évidence l'essentiel de l'incertitude sur les évolutions futures.

1.2 L'agriculture et les modes de consommation, facteurs clés des évolutions futures

Plutôt que de simplement raisonner comme ci-dessus sur la seule composante irriguée de l'agriculture, il est important de prendre en compte globalement l'agriculture irriguée (qui apparaît dans les bilans de prélèvements et de consommation) et l'agriculture pluviale (qui est masquée dans le cycle naturel de l'eau dite « verte ») dans un même bilan des besoins agricoles.

1.2.1 Nature des besoins agricoles

Si l'agriculture représente une telle proportion de nos usages de l'eau, ce n'est pas parce que les plantes et les produits végétaux contiennent de grandes quantités d'eau, c'est parce que les plantes perdent beaucoup d'eau pour absorber du CO₂. Tout se passe au niveau des stomates, de minuscules pores situés sur les feuilles que ferment deux cellules régulatrices, grâce auxquels les plantes absorbent le CO₂ et perdent de l'eau. Les stomates constituent un niveau essentiel de couplage des cycles globaux du carbone et de l'eau et de régulation du fonctionnement des végétaux : dès que la plante manque d'eau, les stomates se ferment mécaniquement, ce qui réduit à la fois les pertes d'eau⁶ et les entrées de CO₂.

Encadré 1.2

Photosynthèse, production végétale et consommation d'eau

Daniel Zimmer, Conseil mondial de l'eau

La photosynthèse comporte deux suites de réactions, une phase photochimique où l'énergie lumineuse est convertie en énergie chimique dans une molécule relais, l'ATP, et une phase non photochimique (dite « cycle de Calvin ») où l'énergie convertie sert à transformer le CO₂ en sucres. Les plantes se limitant au cycle de Calvin sont appelées « plantes en C3 » car la première molécule qu'elles forment est un acide organique à trois carbones, l'acide phosphoglycérique.

D'autres plantes, dites « en C4 », effectuent une « préfixation » du CO₂ sur un acide organique à trois carbones et le transforment en un acide à quatre

⁶Voir Tardieu (2005) pour une discussion sur les possibilités, relativement réduites, de diminuer génétiquement la consommation en eau des plantes, à production constante.

carbones qui est transféré depuis les parties externes des feuilles vers des parties internes où il est retransformé en l'acide organique (de départ, libérant un CO_2 qui est utilisé par le cycle de Calvin). Les plantes en C4 se rencontrent principalement dans les régions tropicales et subtropicales.

Les enzymes des plantes en C4 travaillent avec des pressions partielles en dioxyde de carbone plus faibles que celles nécessaires aux plantes en C3. La plante ouvre moins ses stomates, mais fixe quand même du CO_2 , concentré vers les zones internes. Pour assimiler 1 g de CO_2 , les plantes en C3 perdent par transpiration plus de 600 g d'eau, et celles en C4 environ 300 g.

Il existe un troisième type de métabolisme, celui des « plantes CAM » (pour *Crassulacean Acid Metabolism*) proche de celui des plantes en C4, mais différencié dans le temps. La nuit, les stomates ouverts permettent l'entrée de CO_2 . Le jour, les stomates demeurent fermés (plus d'alimentation en CO_2 , plus de perte en eau), mais les plantes utilisent l'énergie photochimique pour mettre en œuvre le cycle de Calvin.

Pour produire de la matière sèche végétale, les plantes transpirent donc des quantités d'eau importantes (tableau 1.3). L'ordre de grandeur à retenir est celui de 1 000 l d'eau transpirée par kg de matière brute végétale produite. En pratique, les quantités d'eau requises varient beaucoup selon les produits. Les plantes dites « en C4 » requièrent moins d'eau que les plantes dites « en C3 » (voir encadré 1.2), les pommes de terre battent les records de sobriété, les produits maraîchers sont également bien placés. Les produits transformés et animaux requièrent des quantités d'eau encore supérieures, du fait du rendement de la transformation ou de la consommation intermédiaire de produits végétaux. Le bœuf bat tous les records avec plus de 13 000 l d'eau nécessaires à la production d'un kg de viande !

1.2.2 Impact des modes de consommation alimentaire

Notre régime alimentaire a donc un impact majeur sur les quantités d'eau requises par l'agriculture. L'estimation des consommations totales d'eau évaporée par la production alimentaire mondiale a été tentée par plusieurs auteurs ; elle requiert certaines hypothèses notamment pour la prise en compte des fourrages animaux non cultivés. L'encadré 1.3 en présente deux estimations réalisées par Rockström (2003 et 2004) et Zimmer et Renault (2003).

Produits végétaux		Produits animaux transformés	
Blé et autres céréales C3	1 000	Huiles	5 000
Mais et autres céréales C4	700	Volaille	4 100
Pommes de terre	100	Bœuf	13 000
Maraîchage	200-400	Oeufs	2 700
Agrumes	400	Lait	800

Tableau 1.3

Ordres de grandeur des quantités d'eau requises en m^3/T (ou l/kg) pour produire quelques-unes des denrées de base de notre alimentation. Ces chiffres correspondent à la partie consommée (non exprimée en matière sèche) des différents produits (Zimmer et Renault, 2003).

Encadré 1.3

Combien d'eau est évaporée pour la production alimentaire ?

Daniel Zimmer, Conseil mondial de l'eau

Rockström (2003, 2004) constate que la relation entre évapotranspiration et rendement n'est pas linéaire. De fait, cette linéarité ne peut s'observer que pour des rendements moyens et élevés ; dès que les rendements sont inférieurs à 3 t/ha, l'évapotranspiration est proportionnellement plus élevée, notamment parce que les plantes couvrent mal le sol. Il estime qu'en 2000 l'agriculture pluviale consomme $5 \times 10^{12} m^3$ /an d'eau « verte » et l'agriculture irriguée $1,8 \times 10^{12} m^3$ /an d'eau « bleue » soit un total de $6,8 \times 10^{12} m^3$ /an. Il estime aussi que la non-linéarité de la relation induit une perte par surconsommation de $1,5 \times 10^{12} m^3$ /an (soit 22 % du total) principalement en agriculture pluviale, où l'on observe les rendements les plus faibles, ce qui constitue une source de gain potentiel.

À partir de la base de données FAO et d'une relation linéaire entre productivité et rendement, Zimmer et Renault (2003) estiment eux à $5,2 \times 10^{12} m^3$ /an la consommation totale d'eau minimale nécessaire à la production alimentaire mondiale, dont $3,7 \times 10^{12} m^3$ /an pour les cultures pluviales uniquement. Bien que basées sur des méthodes différentes, les deux estimations sont très proches, la différence entre $6,8 \times 10^{12} m^3$ /an et $5,2 \times 10^{12} m^3$ /an correspondant environ aux $1,5 \times 10^{12} m^3$ /an de perte par surconsommation telle qu'évaluée par Rockström. Selon ces chiffres, il faut aujourd'hui

1 100 m³/hab.an pour nourrir la planète. Cette valeur moyenne de 1 100 m³/hab.an dissimule une grande disparité entre continents allant de 700 (Afrique) à 2 000 m³/hab.an (Amérique du Nord et Europe) suivant les habitudes ou la disponibilité alimentaire. Les asiatiques avec des régimes alimentaires très végétariens n'utilisent que 1 000 m³/hab.an. Ces valeurs ne prennent en compte que la consommation par évapotranspiration et négligent d'une part les pertes hydrauliques dans les périmètres irrigués (à $0,8 \times 10^{12}$ m³/an) et d'autre part l'évaporation des barrages construits pour l'irrigation ($0,2 \times 10^{12}$ m³/an).

Pour l'avenir, outre l'augmentation de population, l'évolution des régimes alimentaires jouera donc un rôle primordial. Rockström (2003) évalue par exemple à $2,2 \times 10^{12}$ m³/an la quantité d'eau nécessaire pour vaincre aujourd'hui la malnutrition. Si chaque être humain consommait comme un Nord-Américain ou un Européen, il faudrait aujourd'hui $5,2 \times 10^{12}$ m³/an d'eau en plus pour produire nos aliments. L'eau agricole bien sûr ne doit pas être obligatoirement prélevée sur les ressources en eau « bleue » disponibles, puisqu'une partie importante provient de l'agriculture pluviale (« eau verte »).

1.3 Risques de pénuries d'eau et d'alimentation et tensions sur les marchés mondiaux ; conséquences sur l'agriculture mondiale

Sans prendre en compte les gains de productivité en eau de l'agriculture pluviale, Rockström (2004) estime qu'en 2050 il faudra $12,6 \times 10^{12}$ m³/an d'eau pour nourrir la planète⁷, ce qui représente une augmentation de $5,8 \times 10^{12}$ m³/an par rapport à l'année 2000.

Comment parvenir à une telle augmentation et quelles peuvent être les contributions respectives de l'agriculture irriguée et de l'agriculture pluviale ?

Les tendances de développement de l'irrigation (tableau 2.1) conduisent à prévoir une augmentation de $0,6 \times 10^{12}$ m³/an des prélèvements et de $0,5 \times 10^{12}$ m³/an des consommations qui devraient donc atteindre $2,3 \times 10^{12}$ m³/an en 2050. Pour l'eau pluviale agricole, la fourchette d'augmentation

⁷On peut recouper ce chiffre par un raisonnement simple. En ajoutant aux $6,8 \times 10^{12}$ m³/an utilisés aujourd'hui les $2,2 \times 10^{12}$ m³/an requis pour parvenir à une alimentation correcte pour tous, il faudrait actuellement 9×10^{12} m³/an d'eau pour nourrir la planète. Avec ce dernier chiffre, en supposant une population mondiale de 9,2 milliards en 2050, il faudrait à cette date consommer $13,8 \times 10^{12}$ m³/an d'eau.

de la consommation mondiale, hors modification des habitudes alimentaires, se situe entre $4 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{an}$ et $6,5 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{an}$ pour les cinquante prochaines années, selon les hypothèses faites sur ses gains de productivité hydrique⁸.

Ces chiffres suggèrent donc que le rythme actuel et prévisible du développement de l'irrigation n'est susceptible d'apporter qu'une réponse très partielle à la diminution de la malnutrition dans le monde et que le développement de l'agriculture pluviale détient la clé de l'alimentation mondiale future.

Ce développement est-il possible, à quel coût, notamment pour les écosystèmes terrestres, et dans quelles régions de la planète ?

La fourchette ci-dessus correspond à une augmentation de production annuelle d'aliments entre 1,2 et 1,7 %. Ces augmentations ne sont pas irréalistes si l'on considère les tendances globales des trente dernières années, de l'ordre de 2 % par an, et si les ressources en eau et en terre ne deviennent pas limitantes (problème, non traité ici, de l'épuisement potentiel des sols). Mais une bonne part de l'augmentation des besoins serait censée se produire dans des zones où les pénuries d'eau sont déjà monnaie courante. Observons également que la valeur minimale d'augmentation d'utilisation de l'eau « verte », de $4 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{an}$, semble requérir une vraie prouesse puisque la production cultivée mondiale aujourd'hui requiert à elle seule $3,7 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{an}$. De plus, ces valeurs ne tiennent pas compte de l'évolution des habitudes alimentaires.

1.4 Des ébauches de solutions

1.4.1 Les solutions agricoles et hydro-agricoles

Pour augmenter l'efficacité de l'eau agricole, deux solutions sont possibles : soit on mise sur une augmentation du rendement à apport d'eau donné, soit on réduit la consommation d'eau. Qu'on s'adresse à l'agriculture pluviale ou à l'agriculture irriguée, la seule solution est aujourd'hui d'augmenter les rendements suivant le slogan « *more crop per drop* » ressassé par les experts depuis plusieurs années⁹. Un exemple d'augmentation des rendements pour le riz est donné dans l'encadré 1.4.

⁸En l'absence d'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau, il faudrait que l'agriculture pluviale mobilise $13,8 - 2,3 = 11,5 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{an}$ d'eau soit donc $6,5 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{an}$ (ou 130 % !) supplémentaires par rapport à aujourd'hui. En supposant les gains théoriques de productivité de l'eau proportionnels, on peut espérer réduire ce total de 22 % au maximum. Il faudrait dans ce cas mobiliser $9 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{an}$ soit $4 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{an}$ d'eau pluviale supplémentaires.

⁹Voir par exemple la technique de l'irrigation alternée « *partial root drying* » qui semble présenter un potentiel d'économie d'eau important (Davies, 2005).

Encadré 1.4

Économiser l'eau d'irrigation dans les rizières d'Asie

Pierre Dubreuil, Académie d'agriculture de France

Plus de 200 millions de petits exploitants asiatiques produisent 75 % de la récolte mondiale de riz sur environ 80 millions d'hectares, dont la moitié fournissent déjà deux ou trois récoltes par an. Mais les rendements plafonnent au niveau du potentiel des meilleurs variétés et l'environnement s'est détérioré (salinisation, excès d'engrais et de pesticides, dégradation du statut organique et déficiences minérales des sols). L'eau à usage agricole représente 75 % des ressources de l'Asie et la riziculture en consomme la moitié, avec une faible productivité : il faut ainsi 3 à 5 m³ d'eau pour produire un kg de paddy, en Chine par exemple.

Avec la croissance démographique et la réduction des superficies par la croissance urbaine, un lourd défi technologique devient inéluctable : produire plus de riz sur moins de terres avec moins d'eau. Outre le rôle que vont jouer l'amélioration variétale et les procédures agricoles raisonnées, le défi ne sera vraiment relevé que par une économie considérable de l'eau dédiée à la riziculture. Or, les pertes d'eau sont dues à la percolation et à l'infiltration sous les diguettes ainsi qu'à l'évaporation du plan d'eau. On peut mentionner en premier lieu les règles et pratiques nouvelles suivantes pour réduire ces pertes au niveau du casier rizicole :

- la réduction de la quantité d'eau employée par un planage guidé au rayon laser ;
- la diminution des pertes en eau dans les fentes de rétraction du sol d'un tiers environ par un travail approprié du sol entre deux cycles culturaux ;
- le maintien de la surface du sol à environ 80 % de la saturation en eau après le tallage du riz au lieu d'une submersion permanente (déjà pratiqué en Chine) ;
- le semis direct de graines prégermées sur boue, à la place du repiquage, permettant un gain de 25 % d'eau (déjà pratiqué en Thaïlande, Vietnam et Philippines).

On envisage aussi des modifications des itinéraires techniques agricoles tels que le travail minimum du sol ou l'insertion d'une culture aérobie intercalaire entre deux cycles de riz irrigué (soja, patate douce. . .).

Tout cela pourrait ne pas suffire. L'augmentation de la riziculture pluviale avec irrigation de complément est un autre objectif prometteur : doubler le poids de grain par volume d'eau consommé, atteindre des rendements de 6 tonnes par hectare. L'économie d'eau par rapport à l'irrigation classique en casiers pourrait aller jusqu'à 60 % (exemples en Chine et Philippines). Qui plus est, ces nouvelles pratiques pourraient aussi limiter les émissions de méthane, qui représentent 10 à 20 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

Dans le cas de l'agriculture pluviale, comme indiqué dans l'encadré 1.3, l'efficacité de l'eau décroît nettement dès que les rendements chutent en deçà de 3 t/ha. Augmenter les rendements en levant les facteurs limitants liés à la fertilité des sols ou au contrôle phytosanitaire aurait un effet bénéfique en augmentant la transpiration des plantes au détriment de l'évaporation par le sol nu. Comme indiqué dans cet encadré, les gains totaux maximaux, estimés en 2000, seraient de l'ordre de $1,5 \times 10^{12}$ m³/an d'eau « verte ». Mais l'augmentation des rendements nécessite l'apport de nutriments avec des conséquences potentielles sur l'environnement.

Dans le cas de l'agriculture irriguée, une solution quelquefois évoquée consisterait à augmenter significativement l'efficacité hydraulique dans les périmètres irrigués en jouant sur le rapport entre prélèvements et consommation d'eau (tableau 2.1). L'évolution historique de ce rapport laisse toutefois espérer assez peu de progrès et, de plus, la réutilisation massive par pompage de l'eau des nappes réalimentées par les pertes d'eau par infiltration a vraisemblablement significativement augmenté l'efficacité hydraulique globale des périmètres irrigués. L'augmentation de cette efficacité permettrait sans doute de gagner quelques milliards de m³ par an, mais semble sans commune mesure avec le problème à résoudre. En revanche, tout comme dans l'agriculture pluviale, des gains de rendement restent possibles. Ces gains ne produiront d'augmentation de l'efficacité de l'eau que dans les situations où les rendements initiaux étaient faibles : au-delà de 3 t/ha, la relation évapotranspiration-rendement devient linéaire et toute augmentation de production entraîne une augmentation de consommation en eau proportionnelle.

C'est donc bien essentiellement en augmentant la production qu'on augmentera l'efficacité de l'eau et qu'on résoudra le problème de l'alimentation mondiale. Pour augmenter la production, les solutions consistent soit à augmenter les superficies cultivées ou le nombre de récoltes annuelles sur une superficie donnée, soit à augmenter les rendements.

Selon la FAO (2003), depuis les années 1960, le tiers des augmentations de production a été imputable à l'accroissement des superficies ou du nombre de récoltes, contre deux tiers à l'augmentation des rendements. Les prévisions faites pour la période 2000-2030 n'envisagent pas de changement notable dans ces proportions. Il faut toutefois noter que la situation dans les différents continents varie considérablement. Alors que l'Afrique et l'Amérique latine n'utilisent qu'environ 20 % de leurs terres potentiellement cultivables, le reste étant occupé essentiellement par la forêt ou la prairie, les autres continents et tout particulièrement l'Asie du Sud et le Moyen-Orient sont d'ores et déjà dans une situation de pression très forte avec plus de 85 % de leurs ressources en sols cultivables utilisées pour l'agriculture.

Les augmentations de superficies cultivées peuvent donc fournir une partie de la solution, particulièrement pour l'Afrique et l'Amérique latine où les ressources en terre restent abondantes, mais néanmoins aux dépens des écosystèmes naturels. Dans les autres continents, l'extension des superficies agricoles se fera nécessairement aux dépens d'écosystèmes « naturels » terrestres déjà beaucoup plus contraints. Les augmentations de superficies cultivées devraient toutefois rester partout minoritaires par rapport aux gains de rendement qui devraient être le premier facteur d'augmentation de la production, poursuivant les tendances des cinquante dernières années. Mais ces augmentations sont-elles encore possibles ? Dans quelle mesure l'eau risque-t-elle de devenir un facteur limitant ? Faut-il pour cela faire porter l'effort plutôt sur l'agriculture irriguée ou l'agriculture pluviale ? L'eau est-elle le premier facteur limitant ou est-ce davantage la fertilité des sols et son maintien ? Enfin dans quelle mesure les coûts des intrants nécessaires pour augmenter cette fertilité seront-ils abordables pour les petites paysanneries ? Toutes ces questions restent aujourd'hui ouvertes.

Une autre voie consisterait à augmenter les superficies irriguées et donc les investissements correspondants de manière beaucoup plus forte. La FAO prédit des augmentations d'environ 0,5 % par an en moyenne, en parfaite concordance avec la poursuite des tendances actuelles. En 2000, les superficies irriguées occupaient 21 % des superficies cultivées (265×10^6 ha) et représentaient 40 % de la production. Entre 2000 et 2030, les prélèvements d'eau pour l'agriculture irriguée devraient croître de $0,3 \times 10^{12}$ m³, et les superficies irriguées de 40 à 50×10^6 ha, en assez bonne concordance avec les prévisions mentionnées ci-dessus.

Les différentes régions du monde ne sont pas, ici non plus, dans la même situation concernant ces augmentations : l'Asie et tout particulièrement l'Asie du Sud, le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord ont déjà mobilisé près de 70 % de leurs superficies potentiellement irrigables, alors que l'Afrique subsaharienne et l'Amérique latine n'en ont mobilisé qu'environ 20 %. Augmenter

significativement les superficies irriguées semble donc difficile à mettre en œuvre, notamment en Asie et au Proche et Moyen-Orient.

Cette analyse relativement rapide semble avoir deux conclusions :

- l'Asie et le Proche et Moyen-Orient constituent les régions risquant de faire face aux problèmes les plus aigus ;
- une grande partie de l'eau à mobiliser doit l'être par l'agriculture pluviale qui fait face à un formidable défi d'augmentation des surfaces cultivées et de ses rendements qui, s'il était relevé, devrait avoir pour effet d'augmenter de manière significative l'efficacité de l'eau utilisée (pour peu que les rendements parviennent à franchir le seuil de 3 t/ha). Ces augmentations requièrent probablement une approche conjointe portant sur la gestion de l'eau (par des techniques permettant de valoriser mieux l'eau de pluie, ou de la collecter et la stocker temporairement), sur la gestion et le maintien de la fertilité et sur un développement de variétés adaptées.

1.4.2 Les biotechnologies

La question de l'apport des biotechnologies (OGM ou autres) à la réduction de la consommation d'eau agricole¹⁰ mérite également d'être examinée ici. Les biotechnologies sont en effet fréquemment évoquées comme solution des problèmes d'alimentation du monde de demain. Que pourraient-elles apporter dans le problème qui nous intéresse ?

Deux aspects sont ici à distinguer :

- la question de la résistance à la sécheresse des cultures ;
- la question de l'efficacité physiologique de l'échange eau-carbone au niveau des stomates (encadré 1.2).

Concernant la résistance à la sécheresse, le principal intérêt serait de garantir un rendement minimum en conditions de stress hydrique. Ceci pourrait permettre d'augmenter les rendements les plus faibles et donc d'augmenter l'efficacité de l'eau en augmentant la part de la transpiration dans l'évapotranspiration. En revanche, il ne semble pas que l'efficacité de l'échange eau-carbone soit significativement meilleure chez les plantes résistant à la sécheresse (Tardieu, 2005).

¹⁰Nous n'examinons pas ici les apports possibles des biotechnologies à la production agricole dans son ensemble. Cette question nécessiterait en effet des développements importants qui dépasseraient le cadre de ce rapport.

L'augmentation de la résistance à la sécheresse serait donc intéressante principalement pour la petite agriculture pluviale qui a traditionnellement développé des stratégies de rendement minimum en semant des variétés de tolérance variée à la sécheresse.

Quant à l'efficacité de l'échange eau-CO₂, l'analyse des plantes en C3 et C4 (encadré 1.2) révèle que toute une part de la physiologie des plantes est impliquée et que des changements importants de cette efficacité se paient de changements importants du génome. Il est donc vraisemblable que peu de progrès seront obtenus sur ce plan dans les prochaines années.

On peut donc conclure de cette analyse rapide que les gains à attendre des biotechnologies pour la productivité de l'eau resteront marginaux. La petite agriculture pluviale pourrait toutefois bénéficier de recherches sur les variétés traditionnelles sélectionnées pour leur rusticité et leur résistance à la sécheresse.

1.4.3 L'eau virtuelle

Un autre type de solution (au moins partielle) peut venir de l'augmentation des importations de produits agricoles alimentaires telle qu'on l'observe depuis plusieurs décennies. Les pays en développement ont été longtemps exportateurs nets de produits alimentaires : dans les années 1960, leur surplus d'exportations par rapport aux importations représentait une valeur marchande de 6 milliards de dollars. Ce surplus a fondu régulièrement depuis lors pour s'annuler à la fin des années 1980 et se transformer en déficit qui n'a cessé de se creuser depuis. En 2030, la FAO prévoit que ce déficit en produits alimentaires sera de 35 milliards de dollars par an !

Ces transferts conduisent implicitement à des transferts massifs de l'eau qui a été nécessaire à cette production et qu'on appelle « eau virtuelle ». Les tenants des solutions passant par l'eau virtuelle considèrent qu'il faut tenir compte au mieux des avantages comparatifs des différentes régions et raisonner les productions de manière à ne maximiser non pas la production de biomasse mais la production de richesse. Le déficit de produits vivriers pourrait par exemple être financé par l'exportation de produits maraîchers à forte valeur ajoutée (comme la tomate, les légumes verts, mais aussi l'olive, les agrumes, le latex, etc.). Ce type de solution ne peut être une panacée, ne serait-ce que parce que les pays ont besoin d'une souveraineté alimentaire minimale, mais il peut conduire à la réduction des tensions dans les pays disposant de moyens de paiement, comme cela s'est produit dans les dernières décennies aux Proche, Moyen et Extrême-Orient (Allan, 1998), dans la mesure où les marchés mondiaux sont en état de fournir.

Au cours de la période 1960-2000, alors que l'agriculture irriguée voyait sa mobilisation d'eau augmentée de 75 %, les flux internationaux d'eau virtuelle étaient multipliés par 3 (figure 1.4). En 2000, ils représentaient environ $1,3 \times 10^{12}$ m³/an (Zimmer et Renault, 2003), soit près de 20 % de l'eau agricole totale. À eux seuls, les États-Unis exportent environ $0,15 \times 10^{12}$ m³/an, soit trois fois la quantité d'eau dont dispose l'Égypte pour nourrir sa population. Cette augmentation régulière va se poursuivre, si l'on en croit la FAO, qui envisage une multiplication des importations de céréales par 2,6 entre 1995 et 2030, principalement par les pays de l'Asie, de l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient (figure 1.5). À ce rythme d'augmentation, les transferts d'eau virtuelle relatifs aux céréales seraient multipliés par plus de 4 en 50 ans. En extrapolant à l'ensemble des produits alimentaires, ces transferts atteindraient un volume total de près de l'équivalent de 5×10^{12} m³/an : ils combleraient quasiment les besoins estimés plus haut, mais requièrent que les pays capables d'augmenter leur production le fassent.

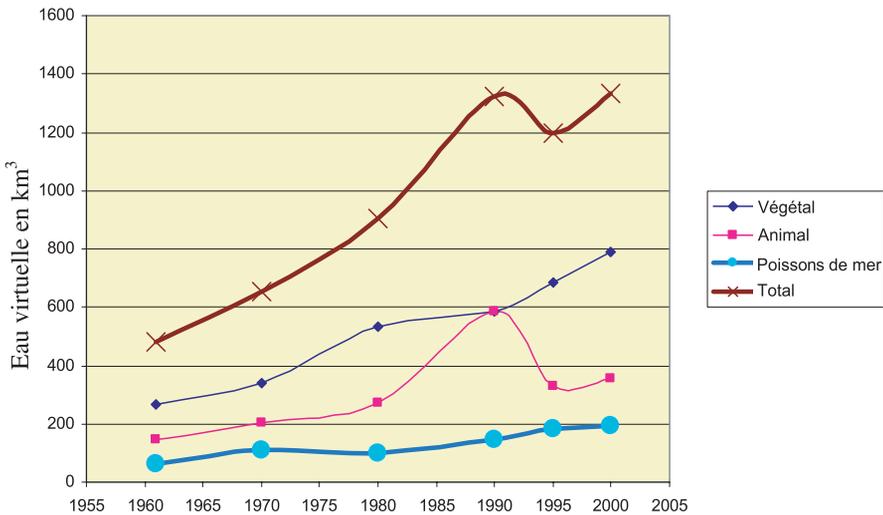


Figure 1.4

Évolution des flux internationaux d'eau virtuelle (Zimmer et Renault, 2003). La montée puis la chute observée en 1990 des flux liés aux produits animaux est due, selon toute vraisemblance, à la crise de la vache folle.

Les conséquences d'un tel scénario seraient énormes à la fois pour les agricultures du Nord et du Sud, pour le commerce mondial, pour le bilan environnemental (coût énergétique des transports) et *in fine* pour les équilibres géostratégiques. Ce scénario signifierait en effet qu'une part importante de la nourriture des PED serait importée, que selon toute vraisemblance les paysannes du Sud s'enfonceraient dans la misère et dans des logiques de survie, qu'une part importante des ressources en devises des PED serait mobilisée pour ces importations et donc que, privés de leur souveraineté alimentaire, et des ressources

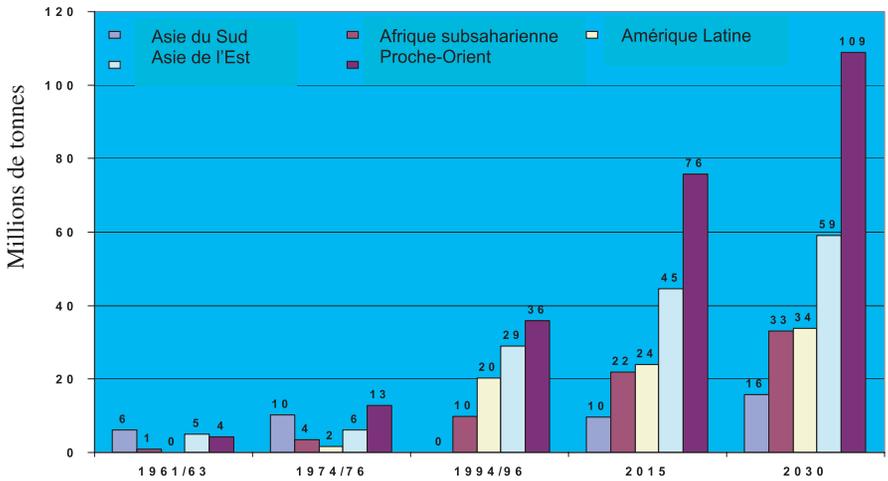


Figure 1.5

Évolution des importations de céréales par les pays en voie de développement de 1970 à 2030 (source FAO).

financières consacrées à l'importation de nourriture, le développement de ces pays serait à la merci des fluctuations du marché mondial.

Pour des raisons sociales, démographiques et politiques, cette solution ne paraît pas acceptable, et une alternative qui défendrait et développerait l'efficacité de la petite paysannerie du sud en augmentant en particulier l'efficacité de l'eau et les revenus des paysans est à proposer.

1.5 Conclusion

À la question posée en début de chapitre sur la capacité de la planète à faire face aux besoins alimentaires d'environ 9 milliards d'habitants en 2050, au vu de ses ressources en eau, la réponse est globalement oui. L'essentiel de l'augmentation de la production agricole doit venir des cultures pluviales, avec une augmentation des rendements par amélioration des pratiques culturales, économie d'eau, et croissance des superficies cultivées, qui devraient passer de l'ordre de 1 250 millions d'ha à plus de 1 500. Ceci se fera cependant aux dépens des écosystèmes naturels qui occupent aujourd'hui ces surfaces non cultivées (forêts, prairies, zones humides...) et de la qualité des milieux (pollution diffuse d'origine agricole). Les surfaces irriguées vont continuer à croître, mais ne constituent pas l'élément majeur de résolution du problème. Cependant, les différents continents ne sont pas équivalents, et cette production nécessitera des échanges très importants, l'Amérique du Sud et du Nord pouvant exporter et l'Asie et le

Moyen-Orient importer, avec des conséquences sociopolitiques importantes. La place occupée par les cultures énergétiques dans l'utilisation des terres arables n'a cependant pas été prise en compte, et pourrait rendre la situation encore plus tendue. Enfin, la variabilité du climat, soit telle que nous la connaissons, soit renforcée par les changements climatiques, rendra cet équilibre entre besoins et ressources très fragile, avec un risque accru de déficit locaux ou globaux de nourriture en cas de sécheresse persistante.

2 | Une échelle intermédiaire de gestion des ressources, de préservation des milieux et d'aménagement intégré : grands bassins versants ou grands aquifères

La confrontation des besoins et des ressources et la gestion des conflits d'usages que cette confrontation rend nécessaire s'établissent à des échelles de territoires plus locales que mondiales, les bassins versants ou les grands aquifères. Ces questions sont caractérisées par une grande diversité de situations en termes de régimes hydrologiques, de pressions anthropiques et de moyens d'action. Il ne relève pas du présent ouvrage d'en dresser un tableau exhaustif : nous avons donc choisi d'illustrer par quelques exemples cette grande diversité¹¹.

Nous avons fait le choix de commencer par des situations particulièrement difficiles en Afrique du Nord et de l'Ouest, puis de parler de quelques enjeux très importants de bassins asiatiques, pour terminer au plus facile (Europe).

Les territoires au sein desquels l'eau doit se partager ne sont généralement pas ceux des États, mais ce n'est pas pour autant que la dimension nationale de ces enjeux, qui touchent à la souveraineté des peuples (bassins ou aquifères transfrontaliers) et à l'organisation des circuits de solidarité et de l'économie sociale, doit être sous-estimée.

Ceci implique d'aborder les méthodes et difficultés de la prospective concernant le bilan des demandes et des ressources. Cela suppose aussi une réflexion sur la gouvernance et la participation des acteurs, question également présente au plan européen pour la directive-cadre européenne (DCE) sur l'eau (Commission européenne, 2000). Cela suppose enfin une réflexion sur les politiques d'aménagement des bassins versants aujourd'hui peu équipés et où les demandes (usages et protection) sont en forte croissance. En appui à l'implication française comme leader de l'initiative européenne sur l'eau dans ce domaine et à l'engagement international à développer des plans nationaux de gestion

¹¹ On se reportera au chapitre « Eau » du rapport RST N° 15 — *Études sur l'environnement. De l'échelle du territoire à celle du continent* — pour une analyse détaillée des questions d'échelle.

intégrée des ressources en eau, l'investissement de connaissance et de méthodologie mérite d'être revisité. À ce titre, les outils développés pour la mise en œuvre de la DCE sur l'eau seront discutés.

2.1 Niveau d'équipement de régulation des ressources en eau et développement

L'eau est au cœur des questions de développement durable. La dimension régionale du partage de l'eau en fait de plus un enjeu diplomatique important et s'inscrit elle-même dans une situation plus générale de très fortes inégalités comme le montre la figure 1.6.

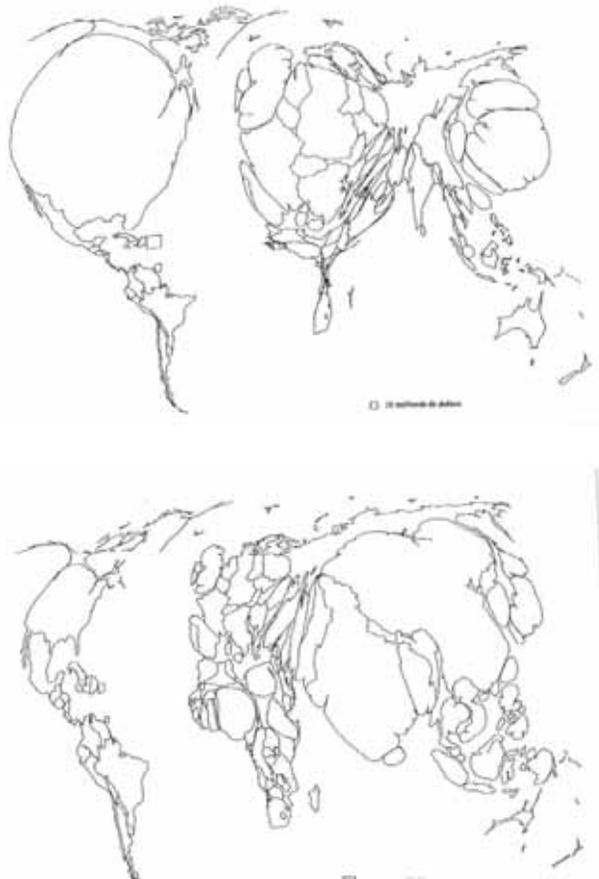


Figure 1.6
Le monde selon la richesse et selon la population illustré par des anamorphoses.

Le débat sur la relation entre richesse et utilisation de l'eau est aujourd'hui contradictoire. Certains auteurs font remarquer que les pays riches n'utilisent globalement pas plus d'eau que les pays pauvres et qu'il n'y a pas de corrélation établie entre le PNB et cette consommation d'eau. L'Inde et la Chine, par exemple, deux pays à forte irrigation, utilisent ensemble plus d'eau que les États-Unis, l'Union européenne, la Russie et le Japon réunis. Bien entendu, des disparités majeures existent dans les consommations domestiques, ce qui explique d'ailleurs que, dans les prévisions, la part relative de celles-ci augmente sensiblement dans les pays à revenus faibles et intermédiaires. À l'opposé de ces considérations générales, la Banque mondiale et le FMI ont repris récemment les études sur la régulation des ressources en eau (figures 1.7 et 1.8) et tendent plutôt à rechercher sur des exemples précis la mise en évidence d'un lien entre le fait de disposer d'une ressource en eau régulière et pérenne et le développement. En effet chacun peut comprendre que sécheresses et inondations constituent des aléas déstabilisants pour l'économie.

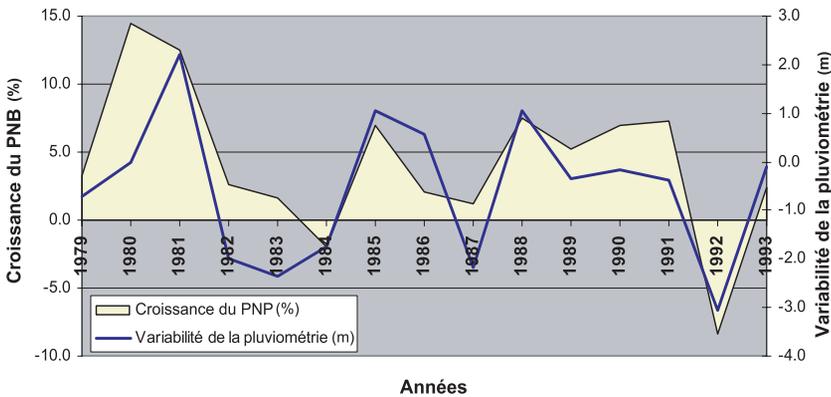


Figure 1.7

Relation entre la croissance du PNB et la pluviosité dans un pays peu équipé en ouvrages de régulation des ressources — cas du Zaïre (Grey, 2003).

L'hydroélectricité, qui parfaitement renouvelable, fait partie des sources privilégiées d'énergie. Cet usage de l'eau n'est pas consommateur de l'eau, qui est restituée au milieu. Ses interférences avec les autres usages proviennent généralement de la saisonnalité des besoins ; ainsi, dans les pays tempérés, la demande d'énergie est souvent plus forte en saison froide, alors que les demandes d'eau à usage agricole ou domestique croissent en saison chaude. Les conflits d'usage, et les arbitrages y mettant éventuellement fin, porteront donc prioritairement sur les consignes de gestion d'équipements régulateurs. À l'aval d'un barrage hydroélectrique important au fil de l'eau, on construit en général une seconde retenue tampon, qui sert à limiter l'impact hydraulique des lâchures sur le reste du fleuve. La figure 1.9 illustre les potentialités de production hydroélectrique disponibles dans le monde. Le débat sur le développement de

Capacité de stockage par personne et piège de la pauvreté

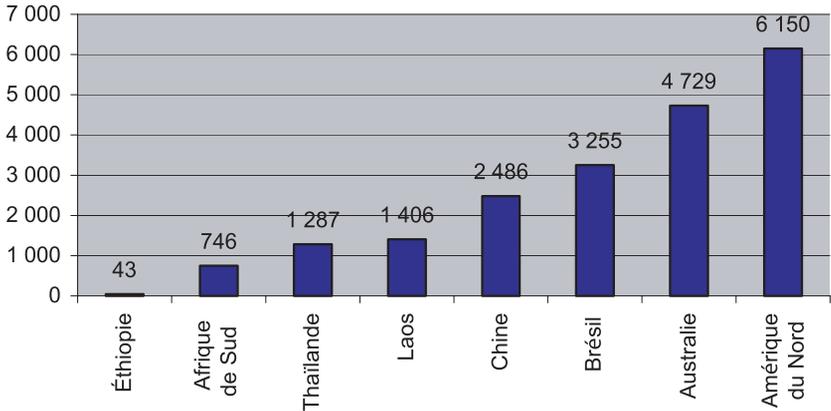


Figure 1.8

La capacité de régulation des ressources en eau est déficiente dans les PED (Grey, 2003).

Potentiel hydroélectrique exploité

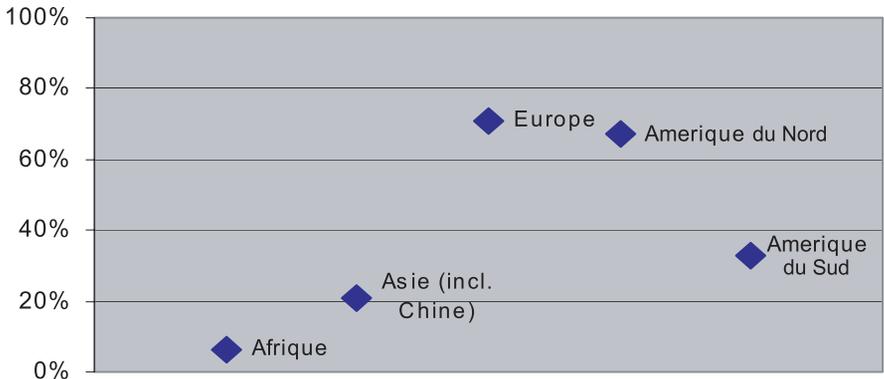


Figure 1.9

Potentiel hydroélectrique exploité (Grey, 2003).

l'hydroélectricité est très actif : quelle part de cette énergie doit être encouragée et comptabilisée par les institutions internationales comme technologie favorable au développement durable ?

Ces études sont contestées par les grandes ONG internationales (UICN, WWF) défavorables au développement de nouveaux grands aménagements, considérant que leurs impacts écologiques et sociaux mal maîtrisés n'en font

pas des projets « durables ». Les gouvernements de certains PED font alors valoir ce discours comme « néocolonialiste », accusant ces ONG soutenues par les gouvernements des pays du Nord de les priver des outils indispensables au développement dont disposent déjà, de fait, les pays du Nord. La Banque mondiale a été soumise ces dernières années à des pressions très fortes sur l'établissement de ses règles d'intervention et opère une nouvelle évolution de sa stratégie : après avoir financé activement les grands projets hydrauliques jusque dans les années 1980, puis y avoir presque entièrement renoncé de 1980 à 2000, elle affiche désormais une volonté nouvelle de financement de grandes infrastructures, assortie de nombreuses conditions destinées à la maîtrise de leurs impacts.

Les évolutions démographiques majeures et les risques de changements climatiques conduisent ainsi à renouveler les difficiles débats concernant de nouveaux aménagements. Il semble irréaliste de nier les besoins d'équipement des pays en voie de développement ou, de façon plus générale, des pays à forte croissance démographique. Il convient au contraire d'aider tant qu'il est possible à des politiques d'aménagement intelligentes (pluridisciplinaires, valorisant les meilleures connaissances et compréhensions des écohydrosystèmes — cf. chapitre 3) et à l'échelle des enjeux en favorisant bien sûr autant que possible la régulation de la demande et l'optimisation de l'existant. L'encadré 1.5 donne un exemple des enjeux concernant les petites retenues collinaires. Nous allons évoquer à titre d'exemples, sans prétention à l'exhaustivité, certains des enjeux particulièrement cruciaux en Afrique et en Asie avant de venir à l'expérience récente des réflexions européennes.

Encadré 1.5

Les retenues collinaires ou « petits barrages » en régions chaudes

Christian Lévêque, IRD et MNHN

Les lacs ou barrages collinaires sont des retenues créées par des digues, en terre ou en béton, dans les dépressions et zones de bas fonds. Leur superficie varie de quelques hectares à quelques kilomètres carrés. Cette technique ancestrale a connu un engouement croissant au cours des deux dernières décennies dans les zones tropicales et méditerranéennes marquées par des sécheresses persistantes.

Dans la zone sahélienne d'Afrique de l'Ouest (Nord Côte-d'Ivoire, Burkina-Faso, Sud Mali) les petits barrages collectent l'eau de ruissellement en saison humide, constituant ainsi des réserves qui servent aux usages domestiques, à abreuver le bétail, et à la culture irriguée en saison sèche. Ce sont des

aménagements propres à assurer les besoins en eau de petites communautés en croissance démographique, en réponse à la sécheresse qui sévit depuis quelques décennies dans le Sahel. Ils ont contribué de manière significative au développement d'activités agricoles (cultures maraîchères, élevage, vergers, riziculture) et à la création d'activités économiques nouvelles telles que la pêche. Des objectifs similaires ont conduit à une politique d'implantation de nombreux petits barrages en terres « açudes » dans le polygone de la sécheresse au nord-est du Brésil. En Tunisie, la construction de centaines de petits barrages dans les années 1990 visait à contrôler les eaux de ruissellement pour éviter l'envasement des grands barrages hydrauliques et à fixer les populations rurales autour de ces points d'eau.

Sur le plan écologique, ces petits barrages, destinés à sécuriser des ressources en eau dans les espaces ruraux, sont autant de zones humides disséminées dans des paysages de savanes, facteur éminemment favorable à l'installation d'une faune et d'une flore plus diversifiées. Leur extension participe à la lutte contre l'érosion des sols et au reboisement. De fait, les petits barrages ont contribué à une modification sensible du paysage rural, par un développement de la végétation arborée mais aussi par l'extension des zones de culture.

Aux « bénéfiques » potentiels ou bien réels dans l'immédiat sont associés des « risques » plus ou moins bien évalués. Ainsi, si certaines recherches viennent conforter l'hypothèse que les lacs collinaires participent à la recharge des nappes, on sait peu de chose en ce qui concerne leur impact sur le débit des fleuves en aval. La multiplication de lacs collinaires à l'amont des grands barrages risque de réduire les écoulements nécessaires à leur remplissage. Ceci a été vérifié au nord-est du Brésil où l'irrégularité accrue des apports annuels a aussi été démontrée. De même, ces retenues subissent des pertes importantes dues à l'évaporation qui pourraient contribuer de manière plus générale à modifier le cycle de l'eau dans les zones concernées, sans que l'on en connaisse l'importance.

Sur le plan sanitaire, ces aménagements, généralement eutrophisés, sont également des lieux d'élection de maladies liées à l'eau et de maladies parasitaires invalidantes, notamment les bilharzioses, le paludisme et les arboviroses. En l'absence de mesures préventives, l'impact sur les populations peut s'avérer important.

La recherche de l'optimum entre petits réservoirs et grandes retenues dans une région donnée reste un objectif complexe mais d'importance quant à la durabilité des systèmes locaux de production et des niveaux de vie des populations.

2.2 Afrique, continent de tous les dangers

La crise mondiale de l'eau trouve une dimension particulière dans le contexte africain.

2.2.1 Démographie

L'Afrique est supposée accueillir dans les vingt ans qui viennent une population supplémentaire égale à celle de l'Europe aujourd'hui¹². Avec la plus forte augmentation démographique prévue (+50 % dans les quinze années qui viennent) et un puissant mouvement de concentration urbaine, le continent africain est confronté à une mutation majeure, alors que la situation actuelle est d'ores et déjà plus que précaire¹³. 40 % de la population de l'Afrique subsaharienne vit en dessous du seuil de pauvreté de 1 dollar/jour. Parmi les 45 pays ayant les plus faibles indicateurs de développement humains, 35 sont en Afrique. La dette globale des pays représente 67,5 % de leur PIB, avec de grandes variations nationales. La Banque africaine de développement (Kabbaj, 2001) considère que, pour réduire la pauvreté de moitié d'ici 2015, soit 4 millions de personnes passant chaque année au-dessus du seuil de pauvreté, il serait nécessaire que les pays à plus faibles revenus connaissent une croissance continue du PIB de 8 % par an.

2.2.2 Ressources en eau

Il coule deux fois moins d'eau en Afrique que sur la moyenne des autres continents. Mais l'Afrique elle-même connaît des disparités internes majeures : le tiers de cet écoulement se produit dans le seul bassin du Congo (Zaïre¹⁴, qui couvre 12 % de la surface du continent. 40 % de la surface du continent ne connaît pas d'écoulement permanent et 13 % de la surface est endoréique¹⁵. La variabilité interannuelle des ressources est considérable : les écoulements de la période 1970-1990 ont ainsi été plus de deux fois inférieurs à ceux des vingt années précédentes dans le bassin du Sénégal et le Fouta-Djallon (Mahé

¹²L'Afrique, qui comptait deux fois moins d'habitants que l'Europe au début du XX^e siècle, en compte deux fois plus au début du XXI^e : 7,4 % de la population mondiale en 1900, 13 % maintenant, elle en représentera 18 % en 2025.

¹³Le PIB par habitant, quatre fois inférieur à celui de l'Europe occidentale en 1950, a stagné, voire décliné de 1980 à 1995, pour être aujourd'hui treize fois plus faible qu'en Europe. Sa remontée de 3,5 % par an depuis 1995 est un signe encourageant.

¹⁴Le Zaïre a un débit à l'embouchure qui varie de 20 000 à 70 000 m³/s, seulement dépassé par l'Amazone.

¹⁵Sans débouché à la mer (notamment le bassin du Tchad où le Logone et le Chari terminent leur cours, et le désert du Kalahari où aboutit l'Okavango).

et Olivry, 1995). Ceci rend la planification des aménagements et la rentabilisation des infrastructures particulièrement difficiles. La variabilité saisonnière est puissamment marquée dans les régions de climat méditerranéen¹⁶ mais aussi dans les bassins versants subsahariens (Sénégal ou Niger).

2.2.3 Alimentation, agriculture et peuplement

Trente des cinquante pays comptant plus de 20 % de mal nourris sont africains¹⁷. Le nombre de ceux-ci y est passé de 100 à 200 millions dans les quarante dernières années. Aujourd'hui, les images de famine et d'exode de l'Éthiopie ou du Niger, liées à la sécheresse, nous rappellent les catastrophes antérieures gravées dans nos mémoires. Près de 38 millions de personnes y sont atteints par la famine en 2002, chiffre en augmentation forte. La production vivrière est le moyen essentiel de subsistance en milieu rural et conditionne le maintien du peuplement. Ces deux enjeux majeurs, alimentation et ruralité, sont évidemment liés.

L'agriculture irriguée représente aujourd'hui 85 % des prélèvements en eau en Afrique (les collectivités 9 % et l'industrie 6 %). Ce taux est d'autant plus fort que le pays est plus aride, l'irrigation étant alors indispensable à la culture. La gestion intégrée des ressources en eau est donc très étroitement liée à l'avenir de l'agriculture africaine. 40 % du PIB (60 % en Éthiopie et en Somalie) est produit par le secteur agricole, qui emploie 60 % de la main d'œuvre. L'Afrique était exportatrice de produits alimentaires avant 1960, et son alimentation dépend maintenant pour 17 % de ses importations et de l'aide alimentaire. Ce taux pourrait au moins doubler d'ici 2010¹⁸. La dégradation des sols (qui a affecté 500 millions d'hectares depuis 1950, soit 65 % de la surface cultivée) et la forte variabilité climatique menacent dramatiquement les capacités de production agricole : les récoltes pourraient de ce simple fait être divisées par deux dans les quarante prochaines années (PNUE, 2000).

La disponibilité de l'eau est un facteur indispensable au peuplement : on associe spontanément la faible densité historique de population de l'Afrique à la rareté de son eau et on ne peut ignorer le rôle de la sécheresse dans les grandes migrations internes au continent. Quantitativement, l'enjeu n'est pas celui de l'eau potable, mais de l'agriculture. C'est l'usage agricole de l'eau qui domine

¹⁶Au Nord au Maghreb, avec les crues dévastatrices des oueds non permanents, ainsi que le remplissage rapide des retenues par le transport des sédiments, et au Sud dans les bassins du Limpopo.

¹⁷Dont 18 des 23 pays comptant plus de 34 % de mal nourris (Banque mondiale, 1999).

¹⁸Les importations en Afrique subsaharienne ont été multipliées par trois et l'aide alimentaire par quatre de 1974 à 1990. Les importations de nourriture représentent plus de 30 % en valeur des importations en Afrique de l'Ouest et centrale.

les besoins. Neuf des vingt pays ne disposant pas de 1 000 m³/hab.an dans le monde sont en Afrique (Afrique du Nord et Afrique sahélienne, Tien Duc, 1999). Même si cet indicateur est sujet à débat (Fritsch, 1998), il marque cependant la disproportion de l'activité agricole avec les ressources en eau disponibles.

2.2.4 Enjeux sanitaires

Dans ce contexte de pauvreté, les conditions sanitaires sont particulièrement dégradées, en milieu urbain comme en milieu rural. Depuis les années 1970, on constate une reprise spectaculaire des maladies endémiques, notamment celles liées à l'eau comme la malaria (1,5 millions de morts par an par défaut d'assainissement, au moins un enfant sur cinq mort avant l'âge de 5 ans le serait de paludisme¹⁹), le choléra et la dysenterie.

Une meilleure gestion des ressources en eau et le développement des services publics d'eau et d'assainissement sont reconnus par la communauté internationale comme l'un des facteurs prioritaires du développement durable de régions entières (CME, 2000 ; PME, 1999a). Le continent africain figure au premier rang des priorités : sécurité, santé, production agricole et énergie y sont en cause (PME, 1998 et 1999b).

Ces éléments globaux ne doivent pas masquer la diversité interne des régions de ce grand continent. Nous développons ici quelques aspects spécifiques au Maghreb d'une part et aux grands bassins d'Afrique de l'Ouest d'autre part.

2.2.5 Maghreb

Aux portes de l'Europe, les pays du Maghreb sont des partenaires historiques majeurs. On peut en souligner quelques traits.

Réseaux de mesures et connaissances

Malgré des années d'efforts, la connaissance de base des ressources en eau et le suivi des réseaux de mesure hydrologique et surtout hydrogéologique sont encore dramatiquement insuffisants. M. Besbes rappelle dans l'encadré 1.6 les évolutions qu'ont connues les estimations des ressources en eau de Tunisie entre 1967 et 1996. Cela montre à quel point cette connaissance est stratégique pour des pays dont les bilans besoins-ressources sont particulièrement tendus.

¹⁹85 % des paludéens vivent en Afrique. Les statistiques disponibles sous-estiment cependant encore le rôle du paludisme dans la mortalité infantile (l'anémie résultant de la malaria est très répandue, mais n'est pas toujours identifiée comme source de mortalité).

Encadré 1.6**Évolutions de la connaissance des ressources en eau de Tunisie**

Mustapha Besbes, École nationale d'ingénieurs de Tunis

Il est très instructif de suivre l'évolution des estimations successives de la ressource en eau réalisées au cours des trente dernières années : si pour les eaux de surface, dont les flux sont visibles et mesurables, on connaissait les ordres de grandeur dès l'indépendance, il n'en est rien pour ce qui concerne les eaux souterraines et notamment les nappes phréatiques, dont la valeur actuelle des ressources représente six fois l'estimation originale. À partir de là, il n'est pas interdit de s'attendre à de nouvelles réévaluations des ressources à l'avenir, que ce soit du reste à la hausse ou à la baisse, qui peuvent résulter de l'accumulation et de l'analyse de données nouvelles.

Année de l'estimation	1967	1972	1980	1985	1990	1996
Eaux de surface	2 000	2 000	2 580	2 630	2 700	2 700
Nappes phréatiques	120	230	490	590	670	720
Nappes profondes	500	900	1 030	1 100	1 170	1 250
Total	2 620	3 130	4 100	4 320	4 540	4 670

Estimations successives des ressources en eau de Tunisie (millions m³/an) Besbes *et al.*, 2002.

Eau potable

L'amélioration des services publics d'eau potable suppose encore d'importants efforts tant en secteur urbain qu'en zones rurales.

L'encadré 1.7 montre les progrès enregistrés et ceux qui restent à accomplir pour l'alimentation en eau des douars marocains (M. Bzioui).

Encadré 1.7

Le PAGER au Maroc : un exemple de programme rural d'accès à l'eau

Mokhtar Bzioui, Conseil mondial de l'eau

Le retard de l'AEP en secteur rural est à imputer aux difficultés liées à la dispersion de l'habitat, à l'insuffisance des investissements publics dans le secteur et à la faiblesse du cadre institutionnel. En 1992, la population rurale desservie en eau potable par un système public conçu de manière adéquate, contrôlé et géré convenablement, était estimée à près de 14 %, et seulement 6 % de cette population disposait de branchements particuliers. Un programme d'alimentation groupé en eau potable des populations rurales, intitulé Pager, a été mis en œuvre à partir de 1995. Ce programme a été conçu pour généraliser l'accès à l'eau potable dans le monde rural dans un délai de dix à quinze ans. Basé sur une approche participative consistant à impliquer les populations dans toutes les phases des projets, c'est-à-dire la programmation, la conception, la réalisation et la gestion, le Pager s'inscrit dans une réelle dynamique de développement durable. En effet, le fait d'associer les populations au développement de leurs projets a contribué à créer parmi cette population un esprit d'appropriation favorable à la pérennisation du fonctionnement des équipements. L'évolution du taux d'accès à l'eau potable dans le milieu rural s'est faite, depuis le lancement de ce programme en 1995, avec un rythme de l'ordre de 3 % par an, et a atteint 55 % en 2005. À ce rythme, le taux d'accès de 92 %, considéré comme correspondant à la généralisation de l'accès à l'eau potable en milieu rural, devrait être atteint en 2015. Cependant les pouvoirs publics ont pris les dispositions, notamment financières, pour atteindre le taux d'accès de 92 % dès 2007.

Là où les efforts de gestion et d'économie d'eau n'ont pas encore abouti, ils restent une priorité absolue, notamment pour assurer une desserte en eau potable et un assainissement répondant aux normes sanitaires assurant la salubrité publique. C'est le cas par exemple des efforts entrepris à Alger pour réduire les fuites et améliorer le système de facturation de l'eau, ce qui permettra de réduire les périodes de coupures d'eau (qui engendrent des stockages inutiles qui sont ensuite perdus) sans sollicitation supplémentaire de la ressource.

La question de l'approvisionnement en eau des grandes villes ne peut cependant pas être toujours résolue par ces programmes d'économies. Des transferts d'eau importants sont alors nécessaires. Au Maroc, l'approvisionnement en eau

de la majorité des villes est sécurisé en cas d'une sécheresse d'une durée de retour de 3 à 4 ans. La capacité de production d'eau potable pour les agglomérations urbaines a été multipliée par cinq entre 1972 et 2003, pour atteindre 55 m³/s. La population urbaine branchée au réseau de distribution d'eau est passée de 2,8 à 13,5 millions d'habitants durant la même période. Le taux de branchement aux réseaux de distribution de l'eau est passé de 53 % en 1972 à 88 % en 2003. La rareté de l'eau douce sur le littoral atlantique du Maroc, combinée avec la poussée démographique se focalisant dans plusieurs grandes villes entre Kenitra, au nord et Casablanca au sud, a nécessité la mobilisation des ressources en eau par des barrages à partir du Sebou, au nord, du Bou Regreg et du Fouarat au centre, et de l'Oum Er Rbia au sud. La zone côtière entre Rabat et Casablanca (près de 45 % de la population nationale) nécessitera dès 2015 la réalisation d'un ouvrage de transfert d'eau d'un volume de 200 Mm³/an sur une distance de 200 km, la reconstruction de nouveaux barrages sur le Sebou et la surélévation de certains. De la même façon la Tunisie a, très tôt, mis en œuvre de grands ouvrages de transferts (canal Medjerda-Cap Bon et Axe Nord-Sud) pour compenser les déficits en eau des zones peuplées et industrialisées des régions côtières du Grand Tunis, de Sousse, Sfax et du Sud-Est.

La dimension sociale et les questions de paiement de l'eau sont cruciales. La population des zones périphériques des villes est le plus souvent desservie par bornes-fontaines. Au Maroc, des efforts sont consentis par la pratique de branchements sociaux, consistant à faire bénéficier la population pauvre de facilités de paiement pour être branchée au réseau de distribution d'eau potable. Cette volonté politique fait exception : dans bien d'autres pays, il y a loin des chiffres théoriques des populations desservies publiées par les États à la réalité du service pour les usagers. Ceci ne peut que renforcer la volonté du gouvernement français de faire valoir au niveau international un système d'observation permettant d'évaluer la satisfaction des « Objectifs du Millénaire » de l'ONU de 2001, qui visent à réduire de moitié la proportion de personnes sans accès durable à l'eau saine, abordable et en quantité suffisante, d'ici 2015.

Qualité des eaux et assainissement

Les enjeux qualitatifs deviennent, à l'instar de la situation européenne, des préoccupations majeures. Ces enjeux ont émergé du fait de la salinisation des sols ou des ressources en eau par surexploitation des nappes ou conduite hasardeuse de l'irrigation sans drainage adéquat (par exemple la surexploitation des aquifères de la riche plaine agricole de la Mitidja, proche d'Alger, ayant occasionné des invasions salines d'eau de mer par inversion des gradients piézométriques), ainsi que par les questions de salubrité de l'alimentation en eau potable. Les problèmes qui occupent aujourd'hui les autorités européennes

(produits phytosanitaires, eutrophisation, écotoxicologie, . . .) se posent d'ores et déjà pour la compétitivité future de l'agriculture et de l'industrie maghrébines, tout comme pour la sauvegarde des milieux naturels.

Mais la première priorité des autorités reste de surmonter les difficultés institutionnelles et techniques pour maîtriser la pollution urbaine et industrielle. La décentralisation et la prise de responsabilité locale, facteurs majeurs de réussite pour une gestion intégrée des ressources en eau²⁰ sont loin d'être acquis. Sur quarante-cinq stations d'épuration réalisées en Algérie, seulement quatorze sont raccordées et fonctionnent. Au Maroc, si pour les équipements en réseaux d'eaux usées, les performances sont relativement bonnes, seules quelques stations de traitement des eaux usées ont été construites pendant les vingt dernières années, et la plupart d'entre elles ne fonctionnent pas correctement. Dans ce pays, ce retard est expliqué par l'incapacité des collectivités locales, chargées institutionnellement de l'assainissement, à supporter les lourds investissements qui sont nécessaires, et à assurer convenablement l'exploitation des stations de traitement des eaux usées. L'amélioration du service de l'assainissement est cependant attendue à moyen terme car, d'une part l'Office national de l'eau potable a, depuis peu, la possibilité d'intervenir dans ce secteur, et, d'autre part, quatre grandes villes, représentant 50 % de la population urbaine, ont concédé ce service, avec celui de l'eau potable et de l'électricité, à des sociétés privées qui se sont engagées à assurer le traitement des eaux usées à l'horizon 2010 pour les villes concernées.

Agriculture et alimentation

Le développement agricole et rural se trouve progressivement confronté à la saturation des capacités de régulation des ressources.

La « solution de facilité » de l'aménagement (barrages, transferts), si elle peut se poursuivre pour répondre aux besoins de l'alimentation en eau potable, fait place aujourd'hui pour les besoins agricoles quantitativement beaucoup plus importants à d'autres solutions (gestion par la demande, internalisation des coûts, améliorations de la productivité hydrique, . . .) dont la mise en œuvre pose des difficultés sociales et culturelles majeures. L'encadré 1.8 montre les difficultés aujourd'hui rencontrées pour le développement des modèles classiques d'agriculture et d'élevage.

La couverture des besoins alimentaires recourt de plus en plus aux importations comme le souligne M. Bzioui (communication personnelle) pour le Maroc :

²⁰Le quatrième forum mondial de l'eau qui s'est tenu à Mexico en mars 2006 à l'initiative du Conseil mondial de l'eau a mis justement l'accent sur le thème de ces actions et responsabilités locales.

« En 1992, les taux de couverture des trois productions pour l'alimentation de base (céréales, huile, sucre) se situaient au Maroc respectivement autour de 60, 20, et 50 %. Actuellement ces taux s'élèvent respectivement à 50, 35, et 35 %. Dans sa stratégie à long terme du développement agricole, le ministère de l'Agriculture a fait des prévisions des besoins en céréales pour l'horizon 2020. À cette date, la demande prévisionnelle en céréales s'élèvera à 130 millions de quintaux dont 85 millions seraient consacrés à la consommation humaine, faisant régresser le taux de couverture des besoins en céréales à moins de 40 %. Par ailleurs les taux de couverture des besoins en huile et en sucre sont estimés respectivement, pour le même horizon, à 52 % et à 25 %.²¹ »

Encadré 1.8

Difficultés de l'extrapolation des modèles antérieurs de l'agriculture et de l'élevage au Maghreb

Pierre-Alain Roche, ministère de l'Équipement

La situation de l'Algérie est illustrative des difficultés de la région à poursuivre les modèles antérieurs de développement de l'agriculture et de l'élevage. La superficie irriguée en Algérie est de l'ordre de 454 000 ha, soit 5,2 % de la surface agricole utile. Dans les grands périmètres irrigués (100 000 ha), seulement 30 000 à 40 000 ha ont été irrigués en moyenne au cours des vingt dernières années. Ce décalage important est lié à :

- la réduction tendancielle des ressources en eau affectées à l'irrigation, conséquence à la fois de la priorité accordée à l'alimentation en eau potable et industrielle et de la sécheresse ;
- l'état vétuste des infrastructures des anciens périmètres équipés en réseaux gravitaires il y a plus d'un demi-siècle (Habra, Sig, Cheliff, Hamiz).

²¹ Le même constat de l'évolution des priorités d'allocation de l'eau est fait en Tunisie : le groupe des experts du ministère de l'Agriculture chargé de l'étude EAU-21 mise sur : « une diminution des volumes alloués au secteur irrigué, du fait de la concurrence des autres secteurs et d'une tarification rationnelle incitant les agriculteurs à utiliser les techniques d'économie d'eau et des variétés culturales moins consommatrices. En moyenne nationale, l'allocation passerait de 6 320 m³/ha.an en 1996 à 4 335 m³/ha.an à l'horizon 2030 ; les superficies irriguées passant pour la même période de 335 000 ha à 467 000 ha ; l'allocation totale au secteur passerait ainsi de 2 100 Mm³/an à 2 030 Mm³/an au cours des trente années à venir » (Kanfir *et al.*, 1998).

Pour les périmètres de petite et moyenne hydraulique, irrigués principalement par des eaux souterraines, les besoins en eau sont estimés à 2,1 milliards de m³/an et sont actuellement couverts à 70 %.

Sur les 900 retenues collinaires réalisées durant les années 1980, 400 sont actuellement en exploitation (capacité de stockage de 72 millions de m³) et permettent d'irriguer une superficie totale de 18 000 ha. Les 500 autres retenues ont été détruites par les crues ou envasées. Un programme en cours porte sur la réalisation d'une centaine de retenues collinaires d'une capacité totale de 30 millions de m³ pour l'irrigation d'une superficie de 12 500 ha.

L'Algérie prévoit, à long terme, d'étendre l'irrigation à un million d'hectares, dont 400 000 ha en grands périmètres, et 600 000 ha en petite et moyenne hydraulique.

Le plan national de l'eau algérien prévoit de nombreux ouvrages et transferts, ainsi que plus de 1 000 nouvelles retenues collinaires. L'analyse des conditions de remplissage, la prise en compte des aléas et des possibilités de modification des statistiques d'apports²² en liaison avec des changements climatiques à l'échelle des durées de vie de ces ouvrages, méritent être particulièrement étudiées (voir encadré 1.5).

La désertification est partout présente ; 20 millions d'hectares sont soumis à :

- un surpâturage entraînant la régression de la productivité des parcours de 120-150 unités fourragères/ha en 1978 à moins de 60 actuellement ;
- une céréaliculture aléatoire et mécanisée induisant la dégradation des sols fragiles à l'érosion éolienne. Par cette voie, on assiste à une perte de superficies de parcours estimée entre 300 000 et 350 000 ha/an.

Ce problème n'est pas spécifique à l'Algérie : La Tunisie, par exemple, est également caractérisée par un fort taux d'érosion, les ressources en sol sont très fragiles, 3 millions d'hectares de terres du Nord et du Centre subissent une forte érosion et plus de 7 millions d'hectares des terres du Sud sont affectés par les processus d'ensablement, de déflation éolienne et de salinisation secondaire.

²²Depuis la sécheresse de 1976, les taux de remplissage envisagés sur la base des statistiques s'appuyant sur des données antérieures (qui ont l'avantage d'être fiables) de fréquence de retour décennale semblent n'avoir guère de chance d'être assurés dans un contexte où l'on estime aujourd'hui un déficit global de précipitations de l'ordre de 20 % et un déficit d'écoulement de 45 % par rapport aux données utilisées pour les études de dimensionnement (communication personnelle de P. Ribstein avec Y. Reumaux).

Un problème d'ampleur internationale : la gestion du SASS

La Libye (encadré 1.9) est engagée dans une surexploitation des ressources souterraines par une exploitation « minière » de certains grands aquifères sahariens, la Grande Rivière artificielle (Margat et Vallée, 1999), exemple-type de stratégie de développement non durable, même si les réserves estimées sont très importantes et capables en théorie de tenir plusieurs centaines d'années.

En Algérie, Tunisie et Libye, l'exploitation internationale du SASS — système aquifère du Sahara septentrional, qui captent d'autres ressources fossiles du Sahara, conduit à rechercher le chemin pour parvenir à une exploitation plus durable, stratégie heureusement aujourd'hui réclamée par la Banque mondiale pour assurer de nouveaux financements (encadré 1.10).

Encadré 1.9

Enjeux de l'eau en Libye

Omar M. Salem, General Water Authority, Tripoli, extraits d'un entretien avec Martine Le Bec, 2004

85 % des Libyens vivent aujourd'hui en ville avec un niveau de vie quasiment équivalent à celui des Occidentaux. La manne pétrolière et la découverte d'importants gisements d'eau fossile dans le Sahara permettent de répondre à une demande sans cesse grandissante. La préoccupation de l'eau reste néanmoins entière, avec aussi la volonté d'aligner le pays sur les standards occidentaux en matière d'assainissement. La Libye dépend à 98 % des eaux souterraines, non renouvelables pour une large part. Seuls quelques aquifères du Nord, où les précipitations annuelles dépassent les 300 mm, reçoivent une recharge. Afin de répondre aux besoins d'une population en forte croissance (6 millions d'habitants dont 80 % concentrés sur la bande côtière), ces aquifères côtiers ont été surexploités ; leur qualité s'en trouve de fait sérieusement détériorée. Cette situation justifie les importants transferts interbassins qui ont été mis à l'œuvre depuis 1983. Le programme GMR (Great Man-made River, la Grande Rivière artificielle) couvre aujourd'hui plus de 50 % de nos besoins domestiques.

Il constitue le programme d'exploitation d'eaux fossiles le plus gigantesque jamais réalisé, avec le transfert de l'eau des régions désertes du Sahara vers les régions peuplées du littoral. Le projet a été défini sur 50 ans, et devra à terme permettre le transfert de plus 2,5 milliards de m³/an. Lors de la première phase, près de 2 000 km de canalisations ont été posées, reliant les puits des champs de Sarir et de Tazerbo au réservoir d'Ajdabiya sur la côte ; ils approvisionnent la région de Benghazi et la région côtière jusqu'à Sirte.

De nouveaux puits ont été mis en service dans la région de Sebha (Jabal Hasawna) ; ils alimentent une conduite en direction de Tripoli, approvisionnée depuis 1997. Aujourd'hui près de 1 million de m³/j d'eau sont ainsi transférés. La troisième phase vient de raccorder les deux branches principales le long de la côte. Les autres phases seront de développer les captages plus au Sud (Koufra) et aussi aux points extrêmes Est (Jaghoub) et Ouest (Ghadamès) du pays.

Le dessalement fournit un peu plus de 20 millions de m³/an d'eau potable. Mais d'importants investissements vont être réalisés dans ce domaine afin de fournir, d'ici à 2010, un million de m³/j. Parallèlement, des efforts devront être faits en matière de recyclage des eaux usées.

Le Comité populaire général a aussi adopté un programme national pour l'eau et l'assainissement qui est entré en application en août 2004. Le programme, qui est assorti de 3,2 milliards d'euros, couvre la sécurité des approvisionnements, l'assainissement (avec la mise en œuvre de nouvelles stations et l'extension des réseaux) ainsi que l'implantation d'unités de dessalement tout le long du littoral. Il s'agit aussi d'homogénéiser les services au niveau des différentes provinces. Les besoins en eau sont directement fonction du niveau de vie. En dépit des privations successives, la Libye dispose aujourd'hui du plus haut revenu par habitants de toute l'Afrique. Avec 7 000 dollars par an, le Libyen est deux fois plus riche qu'un Marocain ou un Tunisien, trois fois plus qu'un Égyptien ; et seulement deux fois moins qu'un habitant du Bahreïn. Cette « aisance » se traduit par une consommation en eau excessive. . . 280 l/j.hab, ce qui dépasse la consommation moyenne européenne. À Koufra, en plein désert mais où la nappe affleure à la surface du sol, la consommation s'établit même entre 700 et 800 l/j.hab : c'est deux fois plus qu'aux États-Unis ! Nous avons encore de sérieux efforts à fournir en matière d'éducation.

Encadré 1.10

Les aquifères du SASS

Mustapha Besbes, École nationale d'ingénieurs de Tunis
Ghislain de Marsily, université Paris VI

Le système aquifère du Sahara septentrional constitue l'une des plus grandes réserves en eau souterraine d'eau douce du monde. Elle s'étend sur plus d'un million de km², dont 60 % en Algérie, 10 % en Tunisie, et 30 % en

Libye, et possède deux nappes principales, celle du Continental Intercalaire en profondeur, celle du Complexe Terminal moins profonde. S'étendant jusqu'à plus de 2000 m de profondeur, les réserves aquifères sont énormes, estimées à $3 \times 10^{13} \text{ m}^3$, cependant seule une faible fraction peut être exploitée par pompage, en raison des coûts élevés d'exhaure si la profondeur du niveau d'eau devient supérieure à 200 m. Les eaux sont en partie anciennes, rechargées par les précipitations sous les climats plus humides qui régnaient au Sahara jusqu'il y a moins de 5 000 ans, mais une alimentation non négligeable se produit actuellement, estimée à $30 \text{ m}^3/\text{s}$, notamment sur le flanc sud de l'Atlas en Algérie. L'aquifère est fortement exploité dans les trois pays, soit par pompage, soit par sortie naturelle dans les oasis. On estimait en 2000 les pompages à $70 \text{ m}^3/\text{s}$, auquel il faut ajouter les écoulements aux exutoires naturels et des pertes par évaporation dans les Chotts, estimés à $15 \text{ m}^3/\text{s}$. Observant que les niveaux piézométriques sont en baisse continue depuis plusieurs dizaines d'années, que la majorité des sources alimentant les oasis tarissent et doivent être remplacées par des pompages, les trois pays se sont entendus pour réaliser conjointement une étude, menée sous l'égide de l'Observatoire du Sahara et du Sahel à Tunis, pour évaluer la ressource, recenser les prélèvements, et construire un modèle numérique permettant de prévoir l'impact des politiques de prélèvement envisagées par chaque pays. Cette étude, achevée en 2003 (Besbes *et al.*, 2003 ; OSS, 2003), a permis de conclure que la poursuite des prélèvements actuels et *a fortiori* l'augmentation des prélèvements dans chaque pays conduiraient dans un avenir proche à :

- l'inversion du sens des circulations de la nappe du Complexe terminal vers les Chotts Algériens et Tunisiens : au lieu de constituer un exutoire de la nappe, l'eau salée des Chotts s'infiltrerait vers la nappe et conduirait rapidement à sa salinisation ;
- les sources et autres exutoires naturels vont également tarir ;
- les prélèvements effectués par chaque pays affectent la nappe dans les pays voisins ;
- le niveau d'artésianisme va considérablement diminuer dans les régions où la nappe est jaillissante ; — les profondeurs de pompage de l'eau vont dans certaines régions devenir trop importantes, engendrant des coûts d'exhaure trop élevés pour une utilisation agricole de l'eau, comme c'est le cas actuellement.

En revanche, l'étude a montré qu'il était possible de faire passer les exploitations par pompage des $70 \text{ m}^3/\text{s}$ actuels à $250 \text{ m}^3/\text{s}$, à condition de déplacer les points de prélèvement dans des zones où la nappe est libre, mais où n'existe actuellement aucune implantation humaine. Au terme de

cette étude, les trois pays, qui ont mis en commun leurs connaissances et leur expertise pour la mener à bien, sont convenus de mettre en place un organisme de concertation afin de décider de façon conjointe des politiques ultérieures d'exploitation de la nappe.

Il faut noter que cette exploitation de type minier (les prélèvements prévus excèdent d'un facteur huit environ la recharge annuelle estimée) pourrait se poursuivre pendant des siècles, tant est importante la réserve. C'est le même raisonnement que font les Libyens dans l'exploitation d'un autre système aquifère du Sahara, la Grande Rivière artificielle (encadré 1.9), au vu de l'immensité des réserves. Ces deux cas distinguent les réserves du Sahara de celles des aquifères de l'Inde, par exemple, qui sont également surexploités depuis une vingtaine d'années, mais dont les réserves sont bien plus petites et devraient s'épuiser en une ou deux décennies, si les prélèvements ne sont pas diminués, ou une alimentation artificielle mise en place en utilisant par exemple une partie des ruissellements perdus pendant la mousson.

2.2.6 Grands fleuves d'Afrique de l'Ouest : une indispensable gestion de grande échelle internationale

Le rôle des grands fleuves est particulièrement essentiel en Afrique : en transférant naturellement des ressources en eau des zones à climat humide aux zones plus arides, ils atténuent les contrastes climatiques (Banque mondiale, 1996). Des pays comme le Niger, la Gambie, le Botswana, la Mauritanie, le Soudan, le Tchad, l'Égypte ont une part très prépondérante (dépassant 75 % et atteignant 98 %) de leurs ressources provenant, grâce à ces fleuves, d'autres pays. Des fleuves comme le Congo, le Nil, le Zambèze, le Niger, la Volta et des lacs comme le lac Tchad concernent chacun entre six et dix pays. Les fleuves Gambie, Sénégal, Limpopo, Orange, Okavango en concernent trois ou quatre chacun. La question de la gestion et du partage des eaux internationales est ainsi une clé essentielle de la stabilité du continent. Par ce lien physique, les politiques agricoles (irrigation, pêche) et énergétiques (hydroélectricité), de transport (navigation), voire touristiques (qualité des écosystèmes, réserves, zones humides) de nombreux pays sont interdépendantes, d'autant plus fortement que la ressource est rare et bien souvent majoritairement importée.

Les institutions internationales de bassin prennent donc une dimension stratégique particulière. Que peut-on en attendre ? Guy Meublât (2001) interprète ces outils de coopération selon deux approches : en tant qu'outils de travail entre États « propriétaires » des ressources, mais aussi comme institutions créatrices d'une dynamique évolutive (encadré 1.11).

Encadré 1.11

Les institutions de coopération internationale

d'après Guy Meublat, 2001

Au regard de la « nouvelle économie des institutions » (Tocqueville, Coase, North), on considère en effet les États riverains comme des « propriétaires » de droits créant une structure d'ordre commun contribuant à gérer rationnellement les conflits liés à leurs intérêts propres. Le Lesotho obtient ainsi des royalties de l'Afrique du Sud pour la récupération d'une partie du débit du fleuve Orange. Ceci aboutit à un équilibre des stratégies individuelles qui peuvent être au final coopératives ou non coopératives : le dilemme du prisonnier montre bien que la coopération n'est pas un résultat acquis de ce type de jeux. La stabilité du choix coopératif est extrêmement dépendante de la confiance et de la bonne réputation réciproque des acteurs.

Guy Meublat insiste dans sa deuxième approche sur le caractère « institutionnalisant » de l'institution elle-même, un processus de coopération dont la vertu principale réside dans sa capacité à faire évoluer les comportements, finalement à renforcer la coopération en la constituant comme système de valeur, voire comme tradition commune (« *renforcement loop* » de Hodgson). Il y distingue plusieurs niveaux d'engagement : la concertation (comme sur le Nil jusqu'à une date récente), la coopération (avec développement d'outils communs) et, cas plus rare, l'intégration. La concertation relève presque d'une logique diplomatique : trouver les voies des arrangements. La coopération, souvent avec un fort appui international, consiste à dépasser la question du partage plus ou moins équitable des ressources pour constituer ensemble des équipements permettant de « partager les bénéfices du développement ». Les grands aménagements hydrauliques, notamment les barrages hydroélectriques²³, sont logiquement au cœur de ces dispositifs, finalement assez nombreux, car fondés sur une réelle et concrète communauté d'intérêts. L'intégration, enfin, traduit le choix collectif de renoncer à des attributs de souveraineté nationale au profit d'une entité plus légitime pour en assurer la responsabilité.

On est naturellement tenté de voir un enchaînement de progrès continus entre concertation, coopération et intégration, comme le propose l'Académie de l'eau (2002). Le cas du fleuve Sénégal (encadré 1.12) montre que l'histoire est en réalité faite d'une succession de phases de renforcement et d'affaiblissement qui traduisent bien le temps nécessaire à la maturation d'une construction

²³Les localisations peu nombreuses des sites équipables, les économies d'échelle des équipements et la possibilité de transporter l'énergie électrique à longue distance l'expliquent.

institutionnelle post-coloniale. Cet exemple met également en lumière les conséquences sur la production alimentaire locale et le niveau de vie des populations d'une politique d'importation et de mise sur le marché aux prix internationaux de denrées alimentaires. Si l'Union européenne et la France en particulier s'engagent dans un appui décisif à ce type de structures de coopération, comme pour le bassin du Niger, cela ne peut être que pour accompagner celles-ci dans les étapes qui se présentent maintenant comme autant d'opportunités de progrès à saisir, et non pas en fonction d'un schéma prédéterminé des actions à y mener. L'appui apporté de longue date par la France au développement des réseaux de mesures hydrométéorologiques à l'échelle de ces bassins (encadré 1.13) constitue une base solide pour cela, en même temps qu'une base de référence plus générale pour la mise en place du Whycos (système mondial d'observation du cycle hydrologique) de l'Organisation météorologique mondiale.

Encadré 1.12

Le fleuve Sénégal

Olivier Bommelaer, agence de l'eau Seine-Normandie

Le Sénégal (bassin de 289 000 km²) est largement alimenté par le massif du Fouta Djallon (2 200 mm/an de pluie aux sources du Bafing, contre 80 mm/an sur la côte). Son régime est très irrégulier (écoulement de 6 à 40 milliards de m³/an selon les années, débit moyen à Bakel de 867 m³/s durant 1951-1971 et de 411 m³/s de 1972 à 1999, mais avec le barrage de Manantali en fonction depuis 1986) et ses écoulements concentrés en 1 à 3 mois de saison des pluies (débits moyens mensuels de 3 500 m³/s en septembre et de 10 m³/s en mai). Ses eaux sont partagées par quatre États.

Les crues annuelles permettent la mise en culture traditionnelle (culture de wallos) de 10 000 ha à 60 000 ha, assurant l'alimentation de 60 000 à 360 000 personnes environ. La population du bassin est aujourd'hui de 2,5 millions d'habitants, malgré un fort flux migratoire vers la France notamment. Ces quatre pays sont consommateurs de 1,2 Mt/an de riz et importent plus de la moitié de leurs besoins.

L'OEERS (Organisation des États riverains du Sénégal) est née en 1968 d'une volonté d'intégration politique pan-africaine forte, mais s'est immédiatement heurtée à un conflit d'intérêts important sur les eaux du Sénégal entre la Guinée et les autres États riverains, ainsi qu'aux rivalités entre MM. Sekou-Touré et Senghor. La Guinée pratiquant la politique de la chaise vide, les trois autres pays mirent en place en 1972 un Haut-commissariat et l'OMVS (Office de mise en valeur du fleuve Sénégal). Le partage est négocié en fonction des disponibilités hydriques. Une règle de répartition des charges en fonction des bénéfices attendus est établie en 1978 et amendée en 1986.

Les barrages de Manantali (sur le Bafing au Mali, volume de 11,5 milliards de m³) et de Diama (porte à la mer à l'amont de Saint-Louis dans le delta pour permettre l'irrigation et éviter la remontée du biseau salé, avec des effets majeurs prévisibles sur la mangrove), prévus dans un schéma directeur de 1974, sont commencés en 1981-1982, achevés en 1986 et 1988, et opérationnels depuis 1990. L'OMVS, endetté auprès des bailleurs de fonds sur 45 ans avec 9 ans de différé, devait assurer son équilibre par l'énergie hydroélectrique, le temps que les périmètres irrigués se développent, dans une gestion particulièrement fine (tant que les périmètres irrigués ne se développaient pas, l'agriculture restait dépendante de la submersion en période de crue). De 10 000 t/an de paddy sur 10 000 ha en 1974, la production passe au Sénégal (rive gauche du fleuve) à 75 000 t/an en 1985 sur 16 000 ha irrigués. Mais le coût est élevé (5 700 dollars/ha en 1980) et l'exploitation coûteuse car l'eau doit être pompée.

Le programme, représentant un quart du PIB des trois États impliqués, ne pouvait vivre qu'avec les aides des bailleurs de fonds. La Banque mondiale était particulièrement sollicitée sur l'équipement hydroélectrique. Elle émet de nombreuses critiques et la controverse sur les impacts écologiques du projet se développe, sous trame de privatisation générale, rendant suspecte la gestion publique des deux opérateurs hydroagricoles mis en place, la SAED et la SONADER. Dans le même temps, alors que les barrages sont construits, mais non équipés pour l'hydroélectricité, les États-Unis proposent des centrales thermiques au Sénégal et à la Mauritanie. Fin 1995, au vu des expertises environnementales, mais aussi pour conserver et sécuriser la culture de décrue du sorgho importante pour toute la zone, l'OMVS ramène son objectif de régularisation des débits de 300 à 100 m³/s. La production agricole a entre temps connu des fortunes diverses. Atteignant 180 000 t en 1991 en rive sénégalaise, elle connaît une grave crise financière liée à la libéralisation des importations de brisures de riz et à la faillite du Crédit agricole sénégalais. En 1994, sur la pression des bailleurs, les opérateurs déposent le bilan et la production chute à 70 000 t/an.

En 1995, le gouvernement sénégalais remet au goût du jour un ancien projet de revitalisation des vallées fossiles du Sahel sénégalais. La diversion de cette eau est en contradiction totale avec les objectifs de riziculture du delta. Les bailleurs s'y opposent. Cette confrontation relance les études et l'IRD est chargé de rechercher une optimisation de la gestion des ouvrages en maintenant le principe d'une crue permettant la culture de décrue des walos (60 000 ha), l'alimentation de 50 000 ha de cuvettes par une crue artificielle, au détriment du turbinage (productible ramené à 690 MWh) et de l'irrigation. Le Pasie, Programme d'atténuation et de suivi des impacts sur l'environnement, voit le jour en même temps que les sociétés d'exploitation, créées dans une logique de délégation de service public transparente (SOGED et SOGEM). Le programme énergétique est lancé et la production

commence, alimentant la rentabilité du projet, mais avec plus de 10 ans de retard.

Les grands bailleurs de la vallée du Sénégal affichaient ces dernières années leur déception face au maigre développement constaté et à l'absence de rentabilité de la riziculture irriguée développée à grand frais : de fait, à peine la moitié des quelque 130 000 ha aménagés étaient mis en valeur en riz au moins une fois par an, bien loin des hypothèses de rentabilisation qui se basaient sur la riziculture de 375 000 ha 1,6 fois par an. Pourtant, la vallée ne produisait en moyenne annuelle pas plus de 40 000 t de céréales (décruée) avant la réalisation des ouvrages de l'OMVS, et elle n'en produit aujourd'hui pas moins de 350 000 t, auxquelles s'ajoutent le maraîchage, les fourrages pastoraux, les cultures industrielles (sucre, tomates), et le bois d'œuvre, qui n'intéressent pas les mêmes bailleurs.

En terme de sécurité alimentaire, les trois pays de l'OMVS demeuraient en 2000 largement importateurs de céréales vivrières (600 000 t de riz importé sur une consommation annuelle de 1,2 millions), et dépendants de l'aide alimentaire. Avec la grave sécheresse des années 2001/2002, cette situation s'aggrave, et rend l'outil de production de la vallée encore plus stratégique : sur la base des productions de l'an 2000, c'est 1,9 millions d'habitants de la vallée qui viendraient grossir les rangs des quelques 500 000 mal nourris actuels de la Mauritanie et du Sénégal, si l'investissement hydroagricole n'avait pas été réalisé.

L'OMVS se reconcentre maintenant sur ses fonctions de gestion intégrée du fleuve, avec une dynamique forte avec les ONG et de nouveaux principes de gouvernance. Ayant connu et surmonté cette histoire, partie pour une politique intégrée mais où en fait la coopération forte a parfois cédé le pas à une coopération plus faible, où les objectifs ont été rediscutés, remis en cause, réévalués, où de nouveaux compromis sont apparus, l'OMVS aborde désormais une phase de maturité que beaucoup d'autres institutions peuvent lui envier : une histoire commune post-coloniale est maintenant construite, sur laquelle l'avenir peut être bâti.

Encadré 1.13

Hydromet, le Whycos et l'appui technique de l'IRD aux autorités de bassin

d'après Bernard Thébé, IRD

Le logiciel de stockage, traitement et diffusion des données hydrométéorologiques Hydromet, développé par des chercheurs de l'IRD en partenariat avec la Compagnie nationale du Rhône, devient la référence de l'Organisation météorologique mondiale pour les observatoires hydrologiques. Des projets

d'observatoires nouveaux, centrés majoritairement sur des bassins versants internationaux, se mettent en place avec les experts de l'IRD.

Le Système mondial d'observation du cycle hydrologique (Whycos) a été lancé en 1993 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) en association avec la Banque mondiale sous forme de composantes régionales, les « Hycos ». Dans la première phase, qui s'achève, des composantes régionales très vastes ont été mises en place, en particulier avec les pays du pourtour méditerranéen (Med-Hycos), en Afrique de l'Ouest et centrale (AOC-Hycos) et en Afrique australe (SADC-Hycos). Aujourd'hui, les projets Hycos labellisés par l'OMM répondent avant tout à des priorités définies par un ensemble de pays partageant un même bassin versant, les deux premiers ont démarré en 2005 et concernent les bassins du Niger et de la Volta.

Les hydrologues de l'IRD ont été des pionniers de l'hydrométrie en Afrique. L'Observatoire hydrologique régional de l'Afrique de l'Ouest et centrale (OHRAOC) qu'ils ont créé à Ouagadougou en 1995 a ainsi servi de base au projet AOC-Hycos et ses prolongements Niger-Hycos et Volta-Hycos. L'IRD assure l'assistance technique du projet Niger-Hycos auprès de l'Autorité du bassin du Niger à Niamey. Il mènera également la coordination de cet observatoire avec les autres composantes régionales Hycos. Pour Volta-Hycos, en l'absence d'une Autorité de bassin, les chercheurs de l'IRD en conduiront la coordination technique auprès de l'École inter-États d'ingénieurs de l'équipement rural (EIER) à Ouagadougou. L'IRD a été également coordinateur de la première phase du projet Med-Hycos et des développements de ce projet, notamment le programme Balwois. L'observatoire du bassin du Niger, Niger-Hycos qui commence son activité en janvier 2005, implique les neuf pays riverains du fleuve et de ses affluents. Ses objectifs consistent à équiper ou rééquiper une soixantaine de stations d'observation (hauteur d'eau, débit, température, et dans certains cas à implanter un système de gestion de base de données hydrométéorologiques avec transmission des données par satellite ou par téléphone depuis les stations et à implanter une base de données nationale dans chaque pays et une base de données régionale au sein de l'Autorité du bassin du Niger.

2.2.7 Une mobilisation pour l'Afrique

Les responsables africains l'ont aujourd'hui, et pour la première fois, mis au centre de leurs préoccupations : résoudre la crise de l'eau que connaît l'Afrique nécessite un effort continu et puissant de construction institutionnelle. S'il y a insuffisance globale des capacités financières et des ressources en eau, il y a tout autant besoin de gouvernance et d'une amélioration significative en matière d'organisation institutionnelle et de gestion du secteur (Banque mondiale,

1999). Le progrès affiché et voulu par le Nepad (New Partnership for African Development) en ce sens se fera par la conjonction de la volonté africaine et d'une assistance internationale soutenue. Les changements significatifs doivent s'opérer dans la durée nécessaire à la pérennité des actions entreprises et privilégiant le progrès continu et les étapes successives nécessaires à la construction des institutions adéquates (encadré 1.14).

Encadré 1.14

Chronique d'une mobilisation régionale en Afrique

Pierre-Alain Roche, ministère de l'Équipement

Les dernières années ont vu un repositionnement spectaculaire des priorités liées à l'eau dans les objectifs et demandes des leaders africains. « L'eau : l'affaire de tous » était le message clé du second Forum Mondial de l'Eau de la Haye en mars 2000, au cours duquel la Vision africaine de l'eau pour XXI^e siècle a été présentée et débattue (African Caucus, 1999). En septembre 2001, sous l'égide de la Banque africaine de développement, est créé le Haut Comité africain de pilotage pour l'eau (AWTF : African Water Task Force) qui adopte à Bonn en décembre 2001, au cours de la Conférence sur les eaux douces, une position commune en ce qui concerne l'eau. Progressivement la mobilisation s'est étendue à toute l'Afrique, par le biais de conférences thématiques entre opérateurs, décideurs, scientifiques (Accra, avril 2002). Les dirigeants participant à la Conférence des ministres africains de l'eau (AMCOW : African Ministerial Conference on Water), soit 43 ministres africains, représentent désormais la première mobilisation continentale de niveau politique aussi élevé.

Le New Partnership for African Development (Nepad) cherchait des voies nouvelles pour vaincre la pauvreté et se libérer des « trappes de sous-développement » qui confinent l'Afrique dans les cercles vicieux de la pauvreté et des conflits. Dans son document d'octobre 2001, était proposé d'accélérer le travail sur les projets multiobjectifs d'aménagement de la ressource (l'aménagement du fleuve Congo, et l'initiative du bassin du Nil), d'établir une *task-force* pour planifier la lutte contre les effets négatifs du changement climatique en Afrique, de collaborer avec l'Initiative mondiale d'assainissement environnemental (GESI) et d'appliquer le programme UN Habitat sur les économies d'eau dans les villes africaines. Le Nepad projette aussi de créer des centres africains d'excellence sur les sciences et techniques de l'eau en Afrique (conférence de Nairobi 2005).

Parallèlement, l'AWTF constituait la « Water facility », plate-forme de coopération bailleurs/bénéficiaires améliorant les synergies sur l'existant et permettant de dégager des moyens de partage des risques pour attirer des financements supplémentaires.

Les propositions du plan d'action du G8 pour l'Afrique issues du sommet de Kananaskis, largement en phase avec les propositions du Nepad, peuvent être résumées sous trois rubriques :

- exploitation durable des ressources en eau ;
- appui pour l'accès à l'eau potable et à l'assainissement ;
- appui à la gouvernance du secteur de l'eau : décentralisation, recouvrement des coûts, plus grande participation des consommateurs.

L'Union européenne, sous l'impulsion de plusieurs États membres, a lancé à Johannesburg une initiative au titre des partenariats de type II, intitulée « L'eau pour la vie : santé, niveau de vie, développement économique, paix et sécurité ». Ce cadre vise à faciliter une coopération renforcée, concertée et cohérente entre bailleurs de fonds européens (sans exclure d'autres bailleurs). Cette initiative comporte cinq composantes, dont les deux premières sont dédiées à l'Afrique. La composante « gestion intégrée des ressources en eau en Afrique », avec un accent sur les bassins fluviaux transfrontaliers, est portée par la France. Les trois priorités de l'Union sont :

- l'accès pour les plus pauvres à une eau potable de qualité et à un assainissement adéquat ;
- une gestion durable et équitable des eaux transfrontalières ;
- une bonne coordination entre les usages concurrents de l'eau pour l'agriculture, l'environnement, l'énergie, l'industrie. . .

Les deux principaux instruments affichés sont le financement (par mobilisation des contributions bilatérales supplémentaires de l'Union européenne annoncées à Monterrey) et la recherche (315 M€ sur le prochain programme communautaire).

Des énergies africaines se mobilisent donc et affichent une volonté nouvelle de progrès vers une meilleure gouvernance, adaptée à chaque situation, et non imposée selon un modèle universel. Les acteurs internationaux reconnaissent le caractère crucial de ces enjeux, mais s'inquiètent de la faiblesse institutionnelle de leurs interlocuteurs. La société civile, les collectivités locales débordent de bonne volonté²⁴, mais ne parviennent pas à sortir de l'expérimentation, parfois aventureuse. Trois composantes qui peuvent et doivent s'allier pour enrayer les cercles

²⁴Le vote en France en février 2005 de la loi « Oudin », ouvrant la possibilité aux services d'eau et d'assainissement français et aux agences de l'eau de consacrer 1 % de leur budget à des actions de coopération internationale, est révélateur de cette volonté politique.

vieux établis dans les vingt dernières années. Les moyens manquent, il faudrait accélérer les projets mais l'argent ne viendra pas tout seul dans le contexte actuel : les dernières décennies l'ont cruellement montré. Comment organiser le développement d'institutions solides et assurer la nécessaire confiance, ce qui demande des générations, et dans le même temps trouver dans l'urgence une dynamique suffisante pour multiplier les moyens mobilisés, pour éviter une aggravation dramatique de la situation et si possible l'améliorer ?

Il n'y a raisonnablement pas d'autre choix que de faire ensemble confiance au processus en cours, aussi imparfait soit-il : l'abandon, la désertion, l'inaction, le doute et l'indifférence seraient à l'évidence suicidaires dans ce genre de circonstances. Accepter les risques, amplifier les moyens mobilisés, travailler ensemble au succès, même partiel, serait aujourd'hui la plus sage des décisions. La conclusion de cette partie reviendra sur les propositions de contribution française à la résolution de ces difficultés.

2.3 Chine et Asie du Sud-Est

Il est banal de constater aujourd'hui l'ampleur des mutations des pays asiatiques, de leur développement non seulement dans une économie de production primaire, mais au plus haut niveau scientifique et technique, avec une capacité d'investissement et de réalisation à l'échelle des enjeux phénoménaux rencontrés du fait de la croissance démographique et des changements de modes de vie. Les cas des projets de grands transferts d'eau en Chine et de l'aménagement du Mékong illustrent ci-dessous quelques-unes des multiples facettes de ces mutations.

2.3.1 Chine

Une illustration impressionnante est donnée par le projet de grand transfert d'eau du Sud au Nord de la Chine. Ce grand projet comprend trois dérivations entre le Yang Tsé et le Nord, toutes de plus de 1 000 km de long : l'une à l'ouest, une autre au centre et la troisième à l'est du fleuve Yang Tsé. Le projet a pour but d'alimenter en eau le Nord du pays, qui souffre régulièrement de sécheresse, alors que le Sud a d'importantes ressources en eau (le Fleuve Jaune au nord de la Chine est asséché une grande partie de l'année). Ce projet, à l'étude depuis près de cinquante ans, a reçu une approbation de principe par le Conseil des Affaires d'État (le gouvernement chinois) le 23 août 2002. Le projet dans son ensemble est estimé à environ 45 milliards d'euros, soit deux fois plus que le barrage des Trois Gorges. Il prévoit le transfert de $44,8 \times 10^9$ m³/an d'eau du Sud au Nord, soit environ l'équivalent du débit du Fleuve Jaune²⁵.

²⁵La dérivation la plus à l'est, longue de 1 156 km, longera le Grand Canal, et sera équipée de 51 stations de pompage, entre Yangzhou (province du Jiangsu) et les provinces du Shandong

2.3.2 Bassin du Mékong

À une échelle plus modeste de population, le Mékong constitue un exemple où les enjeux de plusieurs États sont indéfectiblement liés. L'encadré 1.15 rappelle les principales caractéristiques de ce fleuve et de son bassin et la très grande dépendance des pays aval à son égard, tant pour les apports en protéines grâce à la pêche que pour la riziculture, ainsi que le potentiel de développement que constituerait son aménagement hydroélectrique.

Encadré 1.15

Le bassin du Mékong

Nguyen Tien Duc, agence de l'eau Seine-Normandie

Long de 4 800 km, dixième grand fleuve du monde pour son potentiel hydraulique, le Mékong prend sa source dans les montagnes neigeuses du Tibet, à près de 5 000 m d'altitude. Il traverse ou borde six pays : Chine, Myanmar, Thaïlande, Laos, Kampuchea et Vietnam. Sur 1 600 km de son cours supérieur (drainant un bassin versant étroit de 190 000 km²), il dévale les gorges étroites des montagnes de la province chinoise de Yunnan. Il entame ensuite, 4 500 m plus bas, son cours inférieur, drainant un large bassin versant de 605 000 km² en parcourant le Triangle Vert à la frontière entre la Chine, le Myanmar et la Thaïlande, à travers des passes étroites parsemées de rapides, puis sur un millier de kilomètres, à moins de 200 m d'altitude, la large vallée de la plaine de Vientiane, avant de traverser la grande plaine du Kampuchea, puis le Vietnam où il se divise en deux bras, le bras du Mékong et celui du Bassac. La pente du fleuve devient alors très faible : quelques mètres de dénivellation sur quelque 500 km de long. Le fleuve se jette ensuite dans la Mer de Chine méridionale par neuf embouchures (six du bras du Mékong et trois du bras de Bassac) formant un delta de 4 500 km², aux innombrables canaux qui s'entrecroisent sur une longueur totale de près de 5 000 km.

Nourri pour 1/7^e par la fonte des neiges du Tibet et pour 6/7^e, dans son cours inférieur, par la mousson, le Mékong a un débit moyen de 15 000 m³/s. Les crues de mousson provoquent dans la plaine de spectaculaires inondations, souvent catastrophiques, détruisant les récoltes sur plus d'un million d'hectares, comme celle de 1978, ou plus récemment, celle de septembre 2000. Au centre du Kampuchea, l'amplitude entre les basses

et du Hebei. La dérivation centrale alimentera en eau les villes de Pékin et Tianjin et comportera un tunnel passant sous le Fleuve Jaune. Les travaux des premières phases de la dérivation Est et de la dérivation centrale ont commencé et seront terminés en 2012, pour un coût total d'au moins 18 milliards d'euros, et un débit de $19,5 \times 10^9$ m³/an. La construction de la dérivation Ouest, la plus chère des trois (30 milliards d'euros), débutera au plus tôt en 2010.

eaux de mai et les plus hautes eaux d'août est en moyenne de 8 m. Le lac de Tonlé Sap du centre du Kampuchea y joue un rôle régulateur essentiel. C'est le plus grand lac d'eau douce du Sud-Est asiatique, peu profond (moins de 7 m) mais long de 170 km. Il est drainé par la rivière de même nom. De juin à octobre, les eaux du Mékong inversent le cours de la rivière et le lac passe ainsi de 2 600 km² à plus de 10 000 km² et stocke jusqu'à 80×10^9 m³ d'eau, qui est ensuite restituée pendant la saison sèche débutant habituellement à partir d'octobre. Pendant la période des crues, les forêts et les plaines inondées servent d'habitat et de frayères à une multitude de poissons dont certains retournent au fleuve à la décrue, d'autres encore parviennent jusqu'à l'estuaire, à plusieurs centaines de kilomètres, l'ensemble constituant une importante source de protéines pour la population riveraine²⁶.

Comparativement aux autres bassins fluviaux de l'Asie, le bassin du Mékong n'est pas très peuplé : un peu plus de 60 millions d'habitants seulement, dont 55 millions sur son cours inférieur (un quart environ de la population totale des quatre pays aval). Cette population est complètement dépendante de l'eau du fleuve et de ses ressources aquatiques pour se nourrir. Au Kampuchea, la majeure partie de ses 10 millions d'habitants vivent des produits de la pêche dans le Mékong qui leur fournit jusqu'à 90 % de leur alimentation. Pour le Laos, le Mékong constitue la seule source de protéines et la principale voie de communication pour le commerce extérieur. Dans le delta, 20 millions de Vietnamiens vivent des rizières qui produisent les deux tiers du riz du pays²⁷.

Le Mékong présente un énorme potentiel de production hydroélectrique (très important débit de 475×10^9 m³/an) avec plus d'une centaine de possibilités d'aménagement, sur le cours principal du fleuve ou sur ses affluents. Équiper ces sites pour régulariser le Mékong, réduire les inondations dévastatrices, fournir l'électricité nécessaire aux projets d'industrialisation et développer l'irrigation, sans en compromettre les richesses halieutiques, constituent depuis près d'un demi-siècle l'enjeu auquel se trouvent confrontés les pays riverains du cours inférieur.

L'encadré 1.16 rappelle également l'histoire complexe des institutions qui ont tenté d'apporter des solutions à ces questions. Nous empruntons à N. Tien Duc (2004) l'exposé de cette question.

²⁶Les biologistes dénombrent jusqu'à 1 300 espèces différentes de poissons et on estime qu'une prise annuelle d'au moins un million de tonnes serait envisageable.

²⁷La production de la campagne 2000 était de 33 millions de tonnes, mais 20 millions de tonnes proviennent des provinces du Sud, en dépit des pertes de la campagne été-automne suite aux crues dévastatrices de septembre de la même année.

La Thaïlande voit sa consommation d'électricité augmenter rapidement, doublant tous les 12 ans, et ses besoins dépassent de loin la production de ses quatre ouvrages, de taille d'ailleurs relativement modeste, construits sur le territoire national, ainsi que l'importation de l'hydroélectricité du Laos. Deux importants projets d'aménagement (jusqu'à 10×10^9 m³ de capacité) existent sur son territoire mais sont bloqués pour des questions environnementales, ce qui la conduit à chercher de nouvelles importations d'électricité en provenance du Laos. De même, elle compte sur le cours principal du Mékong pour irriguer sa province du Nord-Est qui contient près de la moitié de ses terres arables (8 millions d'hectares) mais qui est pauvre en eau.

Les plus importants potentiels de production d'hydroélectricité du Mékong se trouvent en effet au Laos, déjà équipé de cinq ouvrages. Une vingtaine de possibilités d'aménagement de barrages-réservoirs sur le cours principal a été recensée. De nombreux autres sites existent aussi sur les affluents. Le Laos compte sur l'exploitation de ce potentiel par des consortiums étrangers sous forme de BOT (*Build, Operate and Transfer*) pour exporter l'électricité en Thaïlande, comme il le fait avec le barrage de Nam Ngum, afin d'amorcer son développement, après de nombreuses années d'isolement et de stagnation économique²⁸. Plusieurs projets existent parmi lesquels Nam Theun 2 (900 MW — 1,2 milliards de dollars) qui soulève bien des réserves de la part des défenseurs de l'environnement et pour lequel un budget exceptionnel de mesures environnementales de 180 millions de dollars a été récemment proposé.

Le Cambodge, qui a vu ses cultures irriguées réduites de 80 % à cause de la guerre, compte maintenant sur la même eau du Mékong pour reprendre ses activités agricoles, comme il compte sur les aménagements de ses propres sites de barrages pour répondre à ses nouveaux besoins d'électricité.

Le Vietnam a doublé sa production de riz en une décennie, passant d'une quinzaine de millions de tonnes à près de 35 millions de tonnes maintenant, devenant dès 1990 le troisième exportateur mondial de riz. La riziculture nationale, qui se concentre essentiellement dans le delta du Mékong (plus de 5 millions d'hectares, contre 2,7 millions d'hectares du delta du Fleuve Rouge dans le Nord du Pays) pourrait être fortement compromise par une dérivation inconsidérée d'eau en amont qui provoquerait une aggravation de l'intrusion saline dans le delta. Ses besoins d'énergie pour industrialiser le Sud du pays le conduisent également à s'intéresser à l'hydroélectricité en équipant les sites des affluents du Mékong. Le nouveau barrage de Yali (720 MW), sur le Se-San (sous-affluent du Mékong) a été mis en service tout récemment.

²⁸La vente d'électricité du barrage de Nam Ngum à la Thaïlande constituait à elle seule, pendant longtemps, 80 % de l'exportation laotienne.

La province chinoise du Yunnan, peu développée et isolée, considère le Mékong comme une artère qui cimente ses diverses minorités ethniques riveraines et entend tirer aussi du fleuve l'énergie électrique nécessaire à son développement industriel. Elle a d'ores et déjà réalisé, dans les années 1990, deux importants ouvrages (Manwan, 1 500 MW et Dachaosan, 1 350 MW). Un autre ouvrage, nettement plus important (Xiaowan, 4 200 MW) serait à l'étude. Il semble qu'une série d'autres ouvrages sur le cours principal lui-même (cinq ?), et d'autres encore sur les affluents (neuf ?) aient été envisagés, ce qui conduirait à une capacité de stockage totale d'une quarantaine de milliards de m³, soit environ la moitié des apports annuels du cours supérieur. Cinq aménagements pourraient être réalisés avant 2015, mais les conséquences pour les pays avals devraient être déterminées.

La Commission du Mékong est considérée par beaucoup comme un modèle de concertation transfrontalière. Mais la connaissance encore imparfaite de l'écosystème du fleuve devrait freiner les décisions d'aménagement. La possibilité de réunir 40 millions dollars pour les études indispensables, qui cimenterait l'accord des riverains, n'est pas non plus garantie. De même, une coordination parfaite des agences internationales avec les programmes nationaux semble encore faire défaut. Pour Paul J. Smith et le Lt. Col. Charles H. Gross du Centre d'études et de sécurité Asie-Pacifique, la coopération entre les pays riverains du fleuve restera même à jamais difficile, en absence de la Chine qui a toujours refusé de rejoindre la Commission du Mékong, arguant du fait que « quelle que soit la manière dont elle s'y prend pour équiper la partie du Mékong sur son territoire national, cela reste purement interne à la Chine ». Mais la Chine siège à l'ESCAP dont dépend la Commission du Mékong. C'est, de l'avis général des observateurs, le défi le plus important auquel l'actuelle Commission doit faire face.

Encadré 1.16

Les institutions du bassin du Mékong

Nguyen Tien Duc, agence de l'eau Seine-Normandie

Sous l'impulsion d'une commission des Nations unies, quatre pays, le Kampuchea, le Laos, la Thaïlande et le Vietnam (sans la Chine et la Birmanie), ont créé en 1957 un Comité pour la coordination et les études du Mékong inférieur, dit « Comité du Mékong » qui assure les premières études techniques. Plusieurs aménagements d'affluents, visant le double objectif d'irrigation et de production hydroélectrique, considérés comme le symbole de la coopération entre les pays riverains, sont lancés dans le même temps : barrages au Kampuchea, au Laos, en Thaïlande et, dans le delta du Vietnam, travaux d'aménagement de casiers pour lutter contre l'intrusion saline.

Cet « esprit du Mékong », a été rompu au bout d'une dizaine d'années lorsque le Comité a voulu changer d'échelle d'intervention en proposant un programme d'envergure de sept grands barrages totalisant une réserve d'eau égale au tiers du débit annuel du Mékong avec une puissance installée de 23 000 MW, au lieu de projets nationaux sur des affluents. Cette crise interne, ainsi que l'instabilité politique de la région à la même époque, a eu pour conséquence de réduire les activités du Comité à l'élaboration d'un programme limité pour la période 1971-1980. En janvier 1978, le Laos, la Thaïlande et le Vietnam décidèrent, suite au retrait du Kampuchea, de le transformer en un Comité intérimaire qui fonctionnera jusqu'en 1995 sur un périmètre réduit et avec des ambitions plus restreintes. Ce fut le début d'une prise de conscience des pays riverains de la nécessité de protéger l'écosystème du fleuve : en 1991, les représentants des six pays reconnaissent que le Mékong devait constituer une ressource commune à exploiter collectivement, ce qui permettrait de contribuer à la paix, la stabilité et la prospérité de la totalité des pays riverains. Ils ont unanimement reconnu qu'il fallait pour cela accorder la plus haute priorité à la préservation de l'écosystème du fleuve et à la prévention de la pollution de l'eau ; en 1992 a été créé le Réseau de recherches pour le développement du Mékong qui constitue un nouveau forum pour la coopération entre les pays du Mékong en vue de protéger l'écosystème et d'arriver à une meilleure utilisation de ses ressources en eau, l'objectif étant d'améliorer la qualité de vie de ses riverains.

En 1995, un nouvel accord entre les quatre pays de l'ancien Comité de 1957 intitulé « Accord de coopération pour le développement durable du Bassin du fleuve du Mékong » crée la Commission du Mékong (ou *River Mekong Commission* — RMC, en anglais) avec son siège à Phnom Penh, au Kampuchea. Elle est épaulée par un Groupe consultatif constitué de bailleurs de fonds permettant aux pays donateurs et agences internationales de coopération de coordonner leur action à l'égard des pays riverains. Tirant expérience des difficultés antérieures, la nouvelle Commission doit réaliser prioritairement un document fixant les règles d'utilisation de l'eau et de transfert d'eau d'un sous-bassin à un autre (établi à l'aide des outils de modélisation et des méthodes d'analyses environnementales et socio-économiques) et un plan de développement du bassin, outil de programmation et de procédures pour identifier les projets et leur priorité. L'ensemble constitue un programme ambitieux : études institutionnelles, études sur les règles de transfert et d'utilisation d'eau, études nécessaires à l'établissement du plan de développement du bassin, et études de protection de l'environnement et de l'écosystème, des ressources halieutiques du fleuve, d'un coût total estimé à 40 millions de dollars financé par les bailleurs de fonds internationaux.

2.4 Îles d'outre-mer

Les problèmes d'eau douce dans les îles d'outre-mer sont particuliers, nombreux et contrastés, selon leur nature et leur climat. Bien souvent, il s'agit de problèmes de qualité avant les problèmes d'approvisionnement. L'encadré 1.17 en donne un résumé.

Encadré 1.17

Les eaux continentales dans les îles d'outre-mer

Philippe Keith, Muséum national d'histoire naturelle

Les ressources en eau de Nouvelle-Calédonie sont constituées des eaux des rivières pour la Grande-Terre et des eaux des nappes souterraines pour les îles coralliennes de Maré et Lifou. Ouvéa est approvisionnée par les eaux de pluie et les eaux dessalées.

Sur la Grande-Terre, en dépit de sa variété, le matériel géologique ne permet que rarement la formation de véritables sources sauf dans certaines régions calcaires de la côte ouest et dans quelques massifs de péridotites, comme la Montagne des Sources où Nouméa tire ses ressources en eau potable. Les écoulements d'eau sont caractérisés par de profondes variations en fonction des caractéristiques orographiques, des localités, des saisons et des épisodes particuliers tels que les crues cycloniques ou au contraire les phénomènes de sécheresse. Il existe une dissymétrie de l'écoulement sur les deux versants de l'île. Les cours d'eau de la côte Est et de l'extrême Sud ont des débits spécifiques plus élevés que ceux de la côte Ouest (Marquet *et al.*, 2003).

Étant donné la taille réduite des bassins versants et la nature souvent imperméable de leur sous-sol, les nappes sont en général peu développées. Seules les nappes alluviales des cours d'eau de la côte Ouest présentent une certaine extension et une capacité de recharge ; elles sont exploitées dans quelques cas, mais restent très sensibles aux pollutions et aux remontées d'eau salée dans les estuaires, ce qui nécessite l'édification de barrages anti-sel (Gabrié, 1995a).

Les îles Loyauté sont coralliennes et ne comportent aucun réseau hydrographique constitué. Le ruissellement est éphémère et l'eau de pluie pénètre en totalité dans le massif corallien jusqu'à rencontrer l'eau de mer qui s'est infiltrée latéralement et sur laquelle elle vient former une « lentille d'eau douce » par différence de densité. Ces ressources sont très sensibles aux pollutions produites en surface. L'île d'Ouvéa ne possède pas de nappe phréatique et l'alimentation en eau potable, essentiellement par recueil d'eau de pluie et par dessalement d'eau de mer, reste encore problématique (Gabrié, 1995a).

La consommation d'eau sur l'ensemble du territoire est estimée à 500-700 litres/j.hab. À Nouméa, où les eaux sont traitées, et dans les îles, approvisionnées par la nappe, les eaux potables sont de bonne qualité. Ailleurs les eaux sont souvent contaminées par la pollution fécale (Gabrié, 1995a).

Les réseaux hydrographiques de Polynésie ne sont développés que dans les îles hautes, et ce d'autant plus que l'altitude moyenne de l'île est élevée. L'essentiel des ressources y est constitué par les eaux de surface, prélevées par captage et, secondairement, par les eaux souterraines, dans des proportions variables suivant les îles. Le régime des précipitations est extrêmement variable suivant la saison et conditionne le débit des rivières, avec des valeurs pouvant varier très brutalement, en particulier en période cyclonique, et suivant la localisation, versants au-vent ou sous-le-vent (Keith *et al.*, 2002).

Dans les atolls, avec peu de traces d'écoulement, les ressources sont constituées à plus de 75 % par les eaux de pluie auxquelles s'ajoutent, dans une dizaine d'entre-eux, les eaux pompées dans la lentille d'eau douce et plus rarement l'eau de mer dessalée. Dans ces îles basses, la nappe phréatique se présente le plus souvent sous forme d'une lentille plus ou moins épaisse, alimentée par les précipitations, en équilibre avec les eaux marines salées du soubassement de l'atoll. Des mesures réalisées sur un motu à Bora-Bora permettent d'évaluer le débit de fuite de la lentille à 5 000 m³/j, ce qui tend à montrer que 56 % seulement de la pluviométrie (1 300 mm/an) s'infiltré dans le sol, le reste étant évaporé. Les ressources exploitables sont beaucoup plus faibles, de l'ordre de quelques centaines de m³ par jour, dans le meilleur des cas.

La consommation, de 1 000 litres/j.hab en moyenne dans les îles hautes, peut atteindre 2 000 litres/j.hab à Tahiti, tandis que les habitants des atolls ne disposent le plus souvent que de moins de 100 l/j. La qualité de l'eau de consommation est très préoccupante dans toutes les îles, où l'eau distribuée à la population est le plus souvent non potable par pollution bactériologique et turbidité en période pluvieuse (Gabrié, 1995b).

La Réunion présente une forte dichotomie entre les côtes Est et Ouest : sur la côte au-vent, les rivières bénéficient d'un apport soutenu et régulier d'eau à l'étiage, alors que sur la côte sous-le-vent, de nombreuses rivières présentent un assèchement temporaire durant quelques mois. Si les débits d'étiages sont relativement faibles (moins de 10 m³/s), les débits de crues peuvent être très importants (plusieurs milliers de m³/s) et charrier d'importantes quantités de matériaux.

La répartition spatiotemporelle contrastée des pluies, la nature des terrains (perméabilité des matériaux volcaniques, ...), la couverture végétale et les caractéristiques morphologiques des bassins versants conditionnent en grande partie le régime des cours d'eau de cette région. La plupart d'entre

eux ne présentent que des écoulements sporadiques liés aux épisodes cycloniques durant l'été austral (régime torrentiel), plus rarement aux perturbations polaires de l'hiver. Sur les 750 rivières et ravines recensées dans l'île, treize ont un écoulement superficiel permanent tout au long de l'année, auxquelles il faut ajouter leurs affluents permanents (Keith *et al.*, 1999).

Le volume d'eau douce important généré sur la côte Est a engendré d'énormes aménagements à travers la montagne pour assurer le basculement des eaux de l'Est vers l'Ouest (côte sèche, où l'accroissement de la population est très important en raison du climat ensoleillé qui y règne toute l'année), mais cela modifie le régime hydraulique des rivières de l'Est et menace les pêcheries de bichiques (larves de poissons *Gobiidae*) fortement ancrées dans la tradition.

En conclusion, ces quelques exemples illustrent l'ampleur des enjeux d'aménagement de ces territoires. En devons-nous être de simples spectateurs ou avons-nous quelque chose à y apporter ? Le chapitre 2 sera l'occasion de développer les concepts sur lesquels un aménagement peut et doit intégrer les connaissances acquises concernant les écosystèmes et leur dynamique. Nous allons ci-dessous, pour terminer cette section consacrée à l'échelle des bassins versants, examiner le contexte européen, notamment en ce qu'il nous éclaire sur les possibilités méthodologiques nouvelles d'une gestion intégrée des ressources en eau à cette échelle.

2.5 La mise en œuvre en France de la directive-cadre sur l'eau : développer des capacités d'évaluation et de prospective

La directive-cadre européenne sur l'eau (DCE, Communauté européenne, 2000) engage les acteurs de la recherche dans un partenariat renouvelé avec les gestionnaires dans plusieurs domaines (Roche *et al.*, 2005) :

- la modélisation des écosystèmes en lien avec les notions de bon état écologique, abordée au chapitre 2 ;
- l'écotoxicologie, où existe un besoin de renforcement des capacités, abordé au chapitre 3 ;
- la modélisation globale des bassins versants ;
- une capacité d'évaluation et de prospective renforcée.

Nous développons ici les progrès faits dans la modélisation globale à l'échelle des bassins versants ainsi que les besoins d'évaluation des politiques publiques et de prospective.

2.5.1 Modélisation globale des bassins versants

Le développement d'outils de modélisation à l'échelle globale des districts hydrographiques (grands bassins hydrologiques, terminologie de la DCE) offre depuis peu aux acteurs de la gestion de l'eau les moyens de procéder à des évaluations des effets de la mise en œuvre de diverses politiques publiques possibles : la crédibilité des évaluations sur des échelles larges d'espace et l'aptitude des modèles existants à représenter la complexité des processus ont fait d'indéniables progrès, sans épuiser, loin de là, le sujet. La quantification des pressions anthropiques sur le milieu, dans toutes leurs composantes, est en effet le préalable indispensable pour les études socio-économiques des divers scénarios que la DCE demande d'établir. L'encadré 1.18 décrit les progrès faits à ce propos à l'occasion du travail pluridisciplinaire du Piren-Seine. Il reste cependant encore pas mal de travail à faire pour réduire les incertitudes sur ces modélisations (représentations mathématiques des processus géochimiques, transport des particules solides, spatialisation, des paramètres, ...), et pour disposer de l'ensemble des données nécessaires pour les alimenter. L'anthropisation des milieux engendre en effet de nombreuses singularités qui augmentent fortement la complexité.

Encadré 1.18

Modéliser à l'échelle des bassins-versants : l'exemple du Piren-Seine

Gilles Billen et Josette Garnier, CNRS, UMR Sisyphe, université Paris VI

La composition de l'eau des cours d'eau, systèmes éminemment ouverts, comme la nature et le fonctionnement des biocénoses qu'ils abritent, est étroitement liée aux apports de matière de leur bassin versant. Ces apports sont eux-mêmes déterminés par le fonctionnement biogéochimique des systèmes terrestres de ce bassin, actuellement totalement aménagés par l'homme. Les scientifiques sont en première ligne sur un point essentiel : le diagnostic doit orienter l'action. Des études au cas par cas n'étant pas envisageables, la définition d'une politique d'action passe par une analyse des relations entre pressions anthropiques et réponses biologiques, et une extrapolation à des échelles pertinentes pour la gestion. Cette approche suppose l'analyse de

données tirées des réseaux de suivi, pour développer des modèles explicatifs reliant les impacts à leurs causes probables.

Les problèmes à résoudre sont multiples. Il faut d'abord identifier les relations structures/pressions/impacts qui génèrent les états biologiques observés dans les rivières, et physicochimiques dans les nappes. Les structures correspondent aux compartiments du « sociosystème » qui interagissent avec l'eau : milieu urbain ou agricole, industries, usages (énergie, transports, loisirs, ...). Ces structures génèrent des pressions : occupation du sol des bassins et des vallées, rejets polluants directs ou diffus, prélèvements et ouvrages (barrages, chenalisation, ...). Les pressions induisent des impacts sur les composantes abiotiques du milieu, physicochimiques (pollution organique, nutriments, toxiques, ...) et hydromorphologiques (structure, hétérogénéité, connectivité, variabilité de l'habitat physique). Ces impacts déterminent *in fine* l'état des biocénoses ou des nappes.

Les progrès réalisés au cours des quinze dernières années dans la connaissance du fonctionnement des écosystèmes permettent aujourd'hui d'expliquer quantitativement sous forme de modèles mathématiques le lien entre les contraintes qu'exercent sur les bassins versants et les hydrosystèmes, le climat, la topographie, la géologie et les activités humaines, agricoles et urbaines. Il est ainsi possible de rendre compte de l'évolution des teneurs en nitrates ou en pesticides dans les eaux souterraines en fonction de l'historique des pratiques agricoles sur une durée suffisamment longue pour couvrir le temps de réponse des aquifères (Gomez et Ledoux, 2001 ; Gomez *et al.*, 2003). Il est possible de calculer le niveau d'oxygénation des cours d'eau d'un grand réseau hydrographique, leur teneur en éléments nutritifs, l'importance des blooms algaux qui s'y manifestent, connaissant les apports diffus et ponctuels qui leur parviennent (Garnier *et al.*, 1995 ; 1999 ; Billen et Garnier, 1999). Il est possible de prévoir la richesse de la faune piscicole compte tenu de la qualité de l'eau et des caractéristiques morphologiques de l'habitat (Boët et Fuhs, 2000). Il est possible enfin de prévoir les risques d'apparition en mer côtière de floraisons algales indésirables, connaissant les apports d'azote, de phosphore et de silice charriés par les fleuves (Cugier et LeHir, 2002 ; Cugier *et al.*, 2005) .

Toute cette batterie de modèles, en dialogue les uns avec les autres, peut être déployée sur l'espace d'un district hydrographique, au sens de la DCE, c'est-à-dire sur un grand bassin versant. Un tel ensemble de modèles concentre les connaissances acquises sur le fonctionnement écologique d'un grand espace régional exploité par la société humaine. Voir aussi une synthèse dans l'ouvrage *La Seine en son bassin*, Meybeck *et al.*, 1998, ou un numéro spécial de la revue *Science of the Total Environment*, à paraître fin 2006.

2.5.2 Évaluation

On dispose alors d'un ensemble d'outils de simulation permettant d'évaluer, en termes de résultat sur la qualité du milieu, des plans de gestion portant par exemple sur le traitement des eaux usées, ou sur diverses politiques agricoles ou inversement de définir ou d'optimiser les mesures à prendre pour atteindre un objectif donné de qualité du milieu.

Le scénario prospectif tendanciel voulu par la DCE consiste à faire l'inventaire, pour chaque district hydrographique, des travaux en cours en matière d'assainissement ou de ceux programmés en application des législations actuelles ; et à prolonger les tendances d'évolution de l'activité humaine à l'horizon d'une quinzaine d'années. Il peut ainsi être traduit de façon rigoureuse en termes de qualité de l'eau et des habitats. Ceci peut permettre d'identifier les secteurs où le bon état risque de ne pas être atteint, et où un plan de gestion plus volontariste doit donc être mis en place.

Les approches correctives devront véritablement s'attacher à viser la ressource dans sa globalité, en intégrant à la fois les aspects quantitatifs et qualitatifs, ainsi que les interrelations entre les eaux de surface, les eaux souterraines et les eaux littorales. L'organisation de cette démarche intégrative, qui devra inclure une synchronisation et une synergie efficaces des actions portées à la fois sur les eaux souterraines et superficielles, nécessitera forcément du temps. C'est d'autant plus vrai que les programmes de recherche lancés pour pouvoir mieux répondre à certaines des exigences de la DCE nécessiteront plusieurs années avant de fournir les résultats attendus.

La DCE reconnaît heureusement en grande partie ces difficultés et le risque de non-atteinte du bon état des masses d'eau en 2015. Elle autorise une démarche évolutive, voire progressive, et un certain nombre de dérogations temporaires, voire permanentes, sont prévues sous réserve que les États membres puissent avancer une argumentation appropriée (*origine naturelle, coût disproportionné, . . .*), et surtout montrer que tout est mis en œuvre pour essayer, selon les cas de figure, de résoudre ou de minimiser les problèmes. La question économique est très présente dans cette approche (encadré 1.19).

Encadré 1.19

La directive-cadre européenne sur l'eau et l'analyse économique

Yann Laurans, agence de l'eau Seine-Normandie
Pierre-Alain Roche, ministère de l'Équipement

La DCE introduit l'analyse économique systématique comme élément de décision pour le choix des programmes de mesures à mettre en place. Prendre en compte efficacement l'ensemble des aspects économiques — et encore plus socio-économiques — suppose de rendre plus efficaces et pertinentes les méthodes existantes d'évaluation économique (coût-bénéfice, coût-efficacité, calcul du coût disproportionné, ...), notamment pour pouvoir considérer à leur juste valeur tous les principaux aspects et paramètres environnementaux et ceux liés à la santé humaine. Il faut bien distinguer deux niveaux différents d'intervention de l'analyse économique dans la DCE :

- Le niveau explicite, et prévu comme tel, par le dispositif : analyse économique des usages, du degré de recouvrement des coûts ; analyse coûts-efficacité du programme de mesures, analyse et justification de la tarification des services de l'eau et de leur capacité à assurer le recouvrement des coûts (article 5 et 9, annexe III) ;
- le niveau implicite où l'économie devra participer au travail de définition et d'ajustement : (1) **dérogations** aux objectifs initiaux, (2) définitions des masses d'eau **profondément modifiées**, (3) qualifications des **sanctions** (proportionnées et incitatives, notamment pour les sanctions financières) et (4) caractère **incitatif de la tarification** pratiquée.

L'article 5 de la directive place l'analyse économique de l'utilisation de l'eau dans le prolongement de celle des caractéristiques du district et des incidences des activités humaines sur l'état des masses d'eau. L'analyse économique s'inscrit ainsi dans le schéma : activités — pressions — état des eaux — impact (schéma DPSIR), afin de contribuer à l'identification des réponses (les mesures).

Les travaux socio-économiques doivent se dérouler essentiellement en trois étapes :

- caractérisation des districts hydrographiques d'un point de vue socio-économique ;
- identification des enjeux et des principaux problèmes ;
- identification des mesures et de leurs impacts économiques.

Le groupe de travail européen WATECO a élaboré un guide méthodologique général destiné à assister les acteurs de l'eau dans le processus de mise en œuvre du volet économique de la DCE. L'évaluation des retombées des programmes de mesures va exiger la recherche d'indicateurs intégrateurs adaptés et efficaces. Ceux-ci devront inclure à la fois les aspects liés à la ressource (quantité et qualité), mais également à la santé (toxicité), à l'environnement (écotoxicité) et au tissu socio-économique.

La première base demandée est d'analyser l'état de la récupération des coûts par chaque catégorie d'utilisateurs. Les données à rassembler ont pour objectif de préciser l'importance économique de l'eau pour les divers secteurs d'activité, donnant ainsi des premiers repères pour l'évaluation ultérieure des impacts sociaux et économiques des diverses mesures envisageables pour atteindre l'objectif de bon état. Cet exercice en cours illustre bien les difficultés méthodologiques.

2.5.3 Prospective

Au-delà de ces exercices immédiats et imposés par l'ambition méthodologique forte de la DCE, il convient de s'interroger sur notre capacité prospective actuelle dans le secteur. La prospective conduite sur les systèmes agraires dans le cadre du Piren-Seine (Poux et Olive, 2003) et l'étude de l'influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine (projet GICC) sont particulièrement intéressantes (encadré 1.20).

Encadré 1.20

Prospective des systèmes agraires du bassin parisien

Xavier Poux, Engref et Asca

L'étude conduite caractérise les systèmes agraires d'un bassin d'une façon adaptée aux questions de gestion des ressources en eau (formes des systèmes de production — orientations, surfaces des exploitations, main d'œuvre —, assolements, pratiques structurantes — gestion de l'espace, irrigation, drainage — logiques technico-économiques de conduite des exploitations et des itinéraires techniques) en prenant en compte comme déterminants un ensemble de variables explicatives très large et structuré (marchés mondiaux, contexte international et positionnement de l'Union européenne, contexte socio-économique et demande sociale, régulations agriculture-

société, évolution technologique des systèmes de production. . .). Sont ainsi construits six scénarios contrastés d'évolution :

- agriculture de masse raisonnée ;
- cultures de masse et agriculture de conservation ;
- diversification et agriculture raisonnée ;
- diversification et infrastructure écologique ;
- agriculture biologique raisonnée ;
- agriculture biologique et infrastructure écologique.

Ces scénarios sont ensuite confrontés à diverses évolutions climatiques (Ducharne *et al.*, 2004) en utilisant des sorties de modèles de climat (Arpege et base de données GICC-BD) appliquées aux modèles globaux du Piren-Seine.

Une prospective sur l'eau et l'agriculture à l'échelle mondiale et française a également été réalisée par l'Inra-Cemagref sous la direction de Michel Sebillotte (2003).

Cette démarche intégrée permet, lorsque l'on aborde des travaux sur le changement climatique, de ne pas ignorer les facteurs majeurs d'évolution existant par ailleurs (qui interviennent dans des échéances encore plus proches que les effets des changements climatiques) et d'exploiter une modélisation hydrologique complète du bassin ; elle mérite d'être saluée car elle n'est pas si fréquente (elle a par exemple manqué dans les travaux analogues du GICC-Rhône).

Les moyens humains globalement consacrés par les organismes de recherche à la prospective dans ce domaine de la gestion intégrée des ressources en eau sont faibles mais la capacité de commande l'est tout autant. La direction de l'Eau, au ministère de l'Écologie et du Développement durable, dont la fonction pourrait être notamment de stimuler cette prospective, est dénuée de moyens dans ce domaine ; la direction des Études économiques et de l'évaluation environnementale elle-même ne dispose que d'un prospectiviste pour l'ensemble des questions, et non sur l'eau en particulier. Si l'agence de l'eau Seine- Normandie s'est dotée d'une petite équipe de prospective, elle fait figure d'exception dans l'ensemble des agences de l'eau.

La prospective serait-elle inutile à l'action publique dans le secteur de l'eau ? Les efforts réalisés dans d'autres domaines semblent pourtant indiquer que les

sociétés européennes sont confrontées, à échéance relativement courte, à une diversité importante d'évolutions possibles avec des inerties tendanciennes finalement assez faibles, dues notamment à leur faible poids démographique et à l'émergence économique de l'Asie. Les ambitions environnementales fortes de la DCE sont-elles de nature à maintenir les avantages compétitifs français en stimulant les innovations ou, en alourdissant les charges publiques, constitueront-elles finalement un handicap ? Le secteur de l'industrie a montré d'ores et déjà une forte capacité d'adaptation et celui de l'agriculture semble être aujourd'hui arrivé à la croisée des chemins.

2.6 Atouts et pistes de progrès concernant la gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle des bassins versants

- La résolution des difficultés rencontrées par de nombreux pays pour mettre en œuvre une gestion intégrée des ressources en eau et faire face dans des conditions satisfaisantes aux investissements et améliorations de gestion rendus nécessaires par leur développement démographique relève essentiellement de décisions souveraines des États concernés. Cependant, tant au Maghreb que pour les grands fleuves de l'Ouest africain qui nous ont servi d'exemples, mais de façon plus générale dans de vastes parties du monde connaissant de telles difficultés, la recherche française peut apporter beaucoup.
- Apporter l'assistance demandée à la maîtrise d'ouvrage publique et aux bailleurs internationaux. Par leurs conseils auprès des autorités nationales et locales, les organismes de recherche ou institutions françaises ont une présence appréciée. Le lien dans ces actions entre le secteur de la recherche (IRD, Cemagref, Cirad notamment) et les gestionnaires (AFD, agences de l'eau, ministère de l'Écologie et du Développement durable) est cependant insuffisant.
- Mieux assister le développement d'institutions internationales adéquates, en étant plus pragmatique et plus sensible aux réalités locales. Cela suppose pour l'IRD, comme pour d'autres partenaires, de réviser sa conception de la séparation de la recherche fondamentale et appliquée et d'accepter une implication plus forte dans les partenariats avec l'ingénierie à travers des missions d'expertise reconnues dans le parcours professionnel de ses chercheurs. De ce point de vue, les évolutions françaises des dix dernières années tournent le dos à la tendance pragmatique et performante des grandes institutions européennes du secteur (Wallingford Institute of Hydrological Sciences, au Royaume-Uni, souvent cité en référence d'excellence en matière de travaux fondamentaux tout en valorisant de façon massive l'expertise et les recherches finalisées, mais aussi l'IHE, le

DHI, etc.). Expertise collégiale²⁹ plutôt qu'individuelle, comme cela avait été récemment tenté, mais expertise appliquée au service du développement comme le souhaitent bien des chercheurs de l'institut³⁰.

- Développer les partenariats recherche-ingénierie. Si sur le terrain, les ingénieurs des bureaux d'études et les chercheurs se connaissent, tous relèvent la faiblesse des synergies entre les actions de recherche et l'offre d'ingénierie. Des initiatives ponctuelles existent cependant et constituent une excellente base comme par exemple l'implication de la CNR (Compagnie nationale du Rhône) auprès de l'IRD, citée à l'encadré 1.13, dans le développement et l'exploitation du système Hydromet de collecte et de gestion de bases de données hydrométéorologiques. D'autres exemples similaires existent. Les passerelles entre recherche et ingénierie sont nécessaires et à l'origine des innovations technologiques, qui peuvent souvent être aussi valorisées par des publications ou des brevets.
- Contribuer à mieux former les futurs cadres et techniciens : les efforts réalisés sont salutaires et méritent d'être encore développés et encouragés. Les partenariats nombreux avec les écoles d'ingénieurs, particulièrement fructueux par exemple au Maroc et en Tunisie ou avec l'EIER au Burkina-Faso, l'École des travaux publics de Yamassoukro en Côte-d'Ivoire, et avec l'Université Cheick Anta Diop de Dakar au Sénégal ; ces efforts ont sans aucun doute contribué à la formation sur place d'un grand nombre de jeunes cadres de l'administration et à la constitution d'une offre d'ingénierie privée de qualité capable en certains cas d'exporter son savoir-faire dans des coopérations Sud-Sud qui attestent de son dynamisme. Ce succès indéniable doit être poursuivi et renforcé. Le développement de centres de formation technique sur le modèle du centre mexicain créé avec l'appui financier et technique français devrait être encouragé.

À quelles conditions le savoir-faire français s'exportera-t-il durablement ? Les exemples asiatiques nous en donnent quelques clés. À leur propos, J. Gaillard (PDG de SOGREAH, un grand bureau d'études d'hydrauliques français) nous dit : « quand des Chinois viennent nous voir, c'est pour nous demander « ce qu'il y a de mieux », ce que nous demandent rarement les autorités françaises qui cherchent plutôt « le moins cher » ».

²⁹L'expertise aujourd'hui s'exerce essentiellement de façon individuelle et paradoxalement au détriment de la carrière de chercheurs évalués seulement sur des critères académiques de publications.

³⁰Certains chercheurs de l'IRD ont cependant participé par exemple à l'élaboration du Challenge Programme « Water and Food » de l'ONU, ou à des programmes en partenariat avec les organismes de gestion des grands bassins tels que l'OMVS, l'OMVG, ou ont été affectés à la Banque mondiale, à l'IWMI, etc.

- La possibilité de participer à ces opérations majeures, génératrices par leur importance d'expériences et de compétences futures, occasions d'innovation et de partenariats durables, dépend d'une excellence prouvée reposant sur la commande publique antérieure des pays plus anciennement développés. Sans cette commande tirant vers le haut leur compétitivité, les bureaux d'études français seront vite submergés par la concurrence. Sans cette expérience d'ingénierie des grands projets, la recherche risque de se priver de terrains majeurs de connaissance. Ce qui est attendu des acteurs français n'est d'ores et déjà plus une connaissance ponctuelle et fragmentaire très pointue (sauf innovations spécifiques) dont les instituts de recherche locaux disposent ou disposeront à court terme, mais une capacité pluridisciplinaire de compréhension des enjeux liés aux aménagements (gestion, optimisation, gestion socio-économique, intégration des aspects sanitaires, de qualité des eaux et de fonctionnement des écosystèmes, morphologiques, capacité d'évaluation et de modélisation globale, ...).
- L'expérience institutionnelle française de gestion intégrée à l'échelle des grands bassins versants (agences de l'eau et comités de bassins), les pratiques de planification et de programmation (Sage et Sdage, programmes des agences de l'eau), les progrès récents de modélisation globale des bassins versants, le savoir-faire technologique et organisationnel des services d'eau potable et d'assainissement, constituent un fondement solide pour être en mesure de relever les défis de la directive-cadre sur l'eau. Les exemples cités ci-dessus témoignent de cette capacité collective, et bien d'autres exemples ponctuels permettraient de l'illustrer. Le renouveau récent de la prévision hydrométéorologique en France (création du Schapi) vient compléter heureusement, pour la prévention des risques d'inondation, cette dynamique.

Les principaux progrès qui paraissent cependant devoir être suggérés concernent :

L'interface entre les programmes de recherche, le développement d'outils innovants pour l'ingénierie et les gestionnaires. La commande publique d'outils innovants et la capacité à les utiliser de façon pertinente devraient être la conséquence naturelle de cette richesse institutionnelle. Force est de constater cependant que cette commande publique est généralement techniquement faible et ne place pas nécessairement au meilleur niveau les références françaises. Cette faiblesse est un handicap évident pour les enjeux européens, mais également ne permet pas d'assurer un soutien suffisant à la présence de l'ingénierie française à l'exportation. Le renforcement des capacités techniques et scientifiques des services et organismes en charge de la gestion de l'eau devrait constituer une priorité ;

L'évaluation socio-économique, encore trop embryonnaire, et les capacités à conduire des exercices prospectifs pluridisciplinaires, clairement insuffisantes. Ceci tient sans doute pour partie à la difficulté permanente des équipes de recherche à bâtir des programmes pluridisciplinaires associant sciences de la nature et de la société, et pour partie également à la réticence des pouvoirs publics aux procédures d'évaluation des politiques publiques. C'est pourtant par cette pluridisciplinarité et dans la capacité d'évaluation et d'anticipation que se construiront les progrès les plus sensibles.

3 | Une échelle locale où les grandes métropoles constituent des nœuds de concentration tels qu'enjeux, difficulté et complexité y prennent une tournure particulière

En 2007, avec toutes les incertitudes que comporte une telle estimation, et pour la première fois dans l'histoire du monde, le nombre de citadins devrait excéder celui des ruraux sur la planète.

L'émergence au XX^e siècle et la généralisation au XXI^e siècle des mégapoles du tiers monde, concentrant densité d'occupation de l'espace et exposition aux risques d'inondation, demandes d'eau et de nourriture, sources de pollutions, pose un problème complexe et général de santé publique, de surexploitation des ressources et de fragilité aux événements extrêmes. Les problèmes de santé publique à plus proprement parler seront traités au chapitre 3. L'organisation des services publics essentiels des grandes métropoles est un sujet dans lequel les acteurs français sont très impliqués.

Trois milliards d'habitants sont concentrés dans des mégapoles, sur quelques pourcents de la surface de la Terre, essentiellement le long des côtes et des fleuves. Selon Cavallier (1996) : « la croissance urbaine n'a pas seulement changé d'échelle, elle a changé de nature. [...] C'est dans les villes que va désormais se jouer, pour l'essentiel, notre capacité de développement économique, le devenir de notre société, et jusqu'à l'avenir écologique de la planète ». La **vulnérabilité des activités et systèmes sociaux aux risques hydrologiques rares** (voir chapitre 4) **et la capacité à y faire face**, concernent autant, mais avec des différences qu'il est intéressant d'analyser, les grandes métropoles des pays développés que les mégapoles du tiers monde.

C'est, dans l'ensemble des problèmes et questions soulevées par cette dimension urbaine, sur la question de la vulnérabilité et des risques de crises liés à l'eau que nous avons souhaité ici mettre l'accent.

3.1 Démographie

En 1950, deux tiers de l'humanité vivaient encore à la campagne. La vague de fond de l'urbanisation devrait aboutir à une proportion sensiblement inverse d'ici 2030. Il est envisagé que les zones urbaines absorbent 90 % de l'augmentation de population à venir, et celle-ci est estimée entre 1,5 et 4 milliards dans les cinquante années à venir, dont l'essentiel dans les vingt-cinq prochaines années. Certes, le débat existe toujours sur le rythme de l'urbanisation. Madame le Dr Tibajuka, responsable du programme Habitat des Nations unies, déclarait à la fin des années 1990 au World Urban Forum, que, moyennant plus de sécurité et des revenus décents pour les habitants des campagnes, il serait possible d'en ralentir le rythme. En 2000, à la conférence mondiale sur l'avenir des agglomérations urbaines, était présenté un rapport allemand montrant des inflexions dans le rythme d'augmentation des mégapoles³¹. Mais, contrairement aux années 1970-1980, où les planificateurs refusaient d'accepter le phénomène, on s'accorde en général à le considérer comme inéluctable : les incertitudes portent sur son ampleur, non sur son existence.

L'urbanisation s'est développée plus tôt en Amérique latine, manifestant des concentrations en mégapoles dès les années 1960-1970³². La fin du XX^e siècle a vu surtout l'Extrême-Orient s'urbaniser, en relation avec la croissance économique. Aujourd'hui, la Chine et l'Afrique sont le siège d'un exode rural galopant. Où s'arrêtera cette tendance ? Les estimations se basent sur les taux atteints en Europe, Amérique du Nord et du Sud, qui se stabilisent vers 75-85 % d'urbains. C'est ainsi que l'on s'attend à ce que 100 millions d'habitants rejoignent les villes africaines dans l'actuelle décennie, et 340 millions les villes d'Asie (l'équivalent d'une nouvelle Bangkok tous les deux mois).

Chaque jour, 160 000 personnes de plus habitent dans une zone urbaine. Les taux d'augmentation de la population urbaine restent à peu près stables dans les divers continents, très largement supérieurs en Afrique (5 % par an) et dans la Péninsule Arabique (seule décroissance significative constatée, mais à partir d'un niveau record : 6,5 % en 1975-1980, 4 % maintenant, et portant sur une population globale assez faible) que dans le reste du monde (2,8 % en moyenne), comme le montre la figure 1.10.

³¹ Le Caire peut illustrer le caractère relatif de ce fléchissement : le taux moyen d'augmentation de 3,7 % par an durant 1950-1974 a diminué à 2,2 % par an de 1975 à 1999. Même ainsi « modérée » en valeur relative, cette augmentation représente une augmentation plus importante en valeur absolue (+4,5 millions d'habitants pour 1975-1999 contre +3,7 millions d'habitants pour 1950-1974). Aujourd'hui, le Caire atteint 10 millions d'habitants.

³² 45 % de la population urbaine en Amérique latine vit dans des villes de plus d'un million d'habitants.

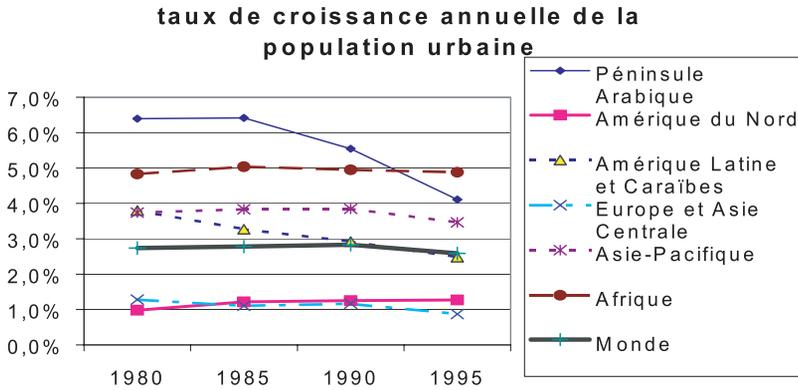


Figure 1.10

Taux d'évolution de la population urbaine (selon l'Unesco).

Il y avait trois villes de plus de 10 millions d'habitants en 1950 (New York, Tokyo et Londres), puis cinq en 1975 (Tokyo, New York, Shanghai, Mexico, et Sao Paolo) elles sont aujourd'hui 19 dont les 3/4 dans les pays en développement et notamment en Asie (Bombay, Delhi, Calcutta et Dakka), avec bientôt Lagos et Le Caire, et ces villes pourraient être plus de 50 en 2025, essentiellement situées dans les pays en développement³³ (figure 1.11).

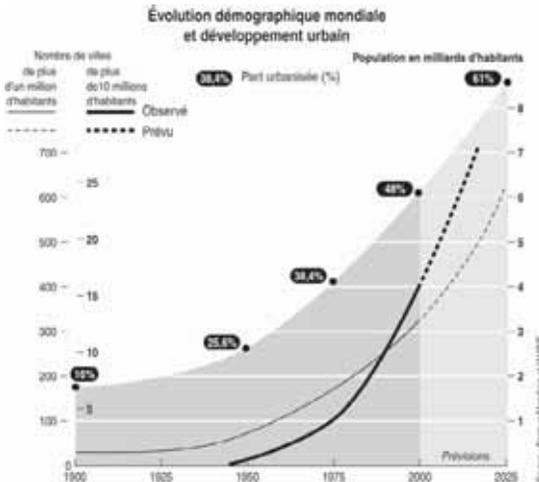


Figure 1.11

Évolution démographique dans le monde et développement urbain (Banque mondiale, 1999).

³³L'analyse des 26 villes dépassant actuellement 5 millions d'habitants (y sont entrées récemment Chongqing, Riyad, Bagdad, Ahmadabad, Toronto et Hô Chi Minh Ville et en sont sorties Birmingham et Manchester) et des 100 villes entre 1 et 5 millions d'habitants (la moitié d'entre elles sont asiatiques) montrent les mêmes tendances.

La croissance de la population urbaine résulte de plus en plus de la croissance démographique naturelle des populations urbaines elles-mêmes et de l'absorption de groupements ruraux à la périphérie des villes en extension ainsi que dans une moindre mesure des mouvements migratoires des campagnes plus ou moins lointaines vers les villes, souvent de proche en proche. La migration vers les centres urbains dominants s'accompagne en effet de fortes migrations intrarurales (des zones plus déshéritées vers des zones agricoles plus riches émergeant aux marchés urbains) qui, de proche en proche, nourrissent la croissance des petites villes. Non seulement l'urbanisation vide les campagnes, mais elle restructure profondément le peuplement des territoires autour des marchés urbains.

3.2 Une crise de l'urbanisme ?

De nombreux commentateurs ont annoncé la fin, ou tout au moins la crise, des politiques urbaines. On est loin du temps où « le prince et son architecte », et plus tard l'urbaniste et l'ingénieur (Barraqué, 2005), concevaient la ville comme un tout et l'organisaient à leur gré. L'essentiel du développement urbain, en particulier dans les pays en développement, procède d'une expansion fort peu maîtrisée par les institutions publiques. La croissance démographique se conjugue à un exode rural massif, dans un contexte de fragilisation des emplois industriels non qualifiés, pour induire le développement de quartiers sans équipements, sans services, dans les endroits les plus ingrats regroupant des familles sans emploi et sans ressources.

3.2.1 Une armature urbaine durable intégrant des échelles de territoires variées et demandant des adaptations institutionnelles

Les mégapoles fonctionnent à des échelles de territoire et de temps extrêmement variées (Lepetit et Pumain, 1993). De plus en plus, elles sont structurées sous une forme multipolaire, voire comme des archipels, seule façon de faire face à la nécessité pour chacun de vivre à une échelle d'espace lui permettant les déplacements de la vie quotidienne (logement, travail, loisirs. . .). En dehors de quelques activités industrielles très polluantes ou dangereuses, le temps du « zoning » à grande échelle dans la logique fonctionnaliste de l'urbanisme progressiste, comme le proposait la charte d'Athènes, est révolu.

Le laisser-faire et le développement anarchique de quartiers faiblement équipés en services n'offrent cependant pas une perspective durable. Les urbanisations modernes ne peuvent pas se passer de documents d'orientation stratégique (schémas directeurs, plans urbains, . . .) permettant la planification des équipements indispensables à une échelle suffisamment globale. Mais ceux-ci doivent

être également suffisamment adaptatifs et souples pour permettre, à l'échelle de l'îlot ou du quartier, l'établissement d'un cadre urbain diversifié. La valorisation du cadre historique et de la diversité de la ville, construite parfois depuis des siècles, devient essentielle pour un développement s'appuyant sur l'identité de ces mégapoles.

Cette extension géographique exponentielle des agglomérations au-delà des limites municipales impose des adaptations institutionnelles. Ainsi Budapest a absorbé, en 1950, sept villes et seize communes. À Mexico, le District fédéral (territoire de la ville vers 1950, 1 320 km²) a vu sa population diminuer de quelques centaines de milliers d'habitants depuis 1980, alors que dans le même temps la zone métropolitaine qui l'entoure accueillait de 5 à 7 millions d'habitants nouveaux : le District fédéral ne représente plus que moins de la moitié de la population totale de l'agglomération. Les problèmes de gestion de l'eau se posent, eux, à une échelle encore plus vaste, celle de la « Cuenca del Valle de Mexico » : les besoins d'arbitrages deviennent un enjeu majeur et les lieux de décision sont multiples.

3.2.2 Formes urbaines et occupation du territoire

La consommation d'espace correspondant à l'évolution des modes de vie, les surcoûts pour les services publics (voirie, eau, électricité) mais aussi les besoins de transport accrus sont donc variables mais peuvent être considérables. En Californie, où la population devrait tripler d'ici 2040, c'est 1,5 millions ha d'urbanisation supplémentaires qui sont à envisager, à la densité actuelle de 7 maisons/ha. La ville de Phoenix, en Arizona, dépasse 1 500 km² pour à peine plus d'1 million d'habitants, alors que l'ensemble des îles de Singapour font à peine 650 km² et abritent 4 millions d'habitants (encadré 1.21). Dans beaucoup de villes de pays à « pouvoir fort » comme Hanoi, Shanghai ou, il y a encore peu de temps, Leningrad, le choix était de faire héberger beaucoup de nouveaux arrivants dans des logements existants, et les conséquences sur la qualité de vie ont été parfois insupportables.

Encadré 1.21

Développement urbain de Singapour : un exercice sous contrainte

Pierre-Alain Roche, ministère de l'Équipement

Si le nouveau Concept Plan de Singapour, dans une planification rigoureuse et efficace en situation de pénurie d'espace, prévoit une nouvelle

densification pour accueillir 1 million d'habitants supplémentaires, c'est sans doute qu'il n'y a guère d'alternative et que le souci d'intégration pluriethnique, à travers une politique d'attribution centralisée des logements, est un enjeu politique majeur. Singapour est une création de l'Angleterre devenue en 1819 propriétaire de cette grande île de 620 km², avec son archipel de 40 petites îles situé à la pointe Sud de la péninsule de Malaisie, sur la route des bateaux vers la Chine et le Japon, et le Pacifique. Le port de Keppel Harbor, situé en eau profonde et protégé au Sud par deux îles, a très rapidement prospéré : 200 habitants en 1820, 10 000 cinq ans plus tard, 80 000 en 1860 et 4 millions aujourd'hui. Les ressources naturelles sont faibles, il y a trop peu d'eau pour une mégalopole avec seulement trois petits lacs de barrage : l'eau est importée de Malaisie. Le PNB de 30 000 dollars par habitant, même s'il est mal réparti, attire les immigrants qu'il faut loger et faire travailler. Avec seulement 5 % de forêt et 8,5 % de culture, la seule solution trouvée a été de densifier les 520 km² déjà urbanisés tout en réservant les terrains nécessaires pour l'activité du million d'urbains nouveaux attendus entre 2005 et 2020.

Les villes nouvelles (ou satellites) sont nées à Londres pour éviter le mitage venant des citadins ayant décidé de s'installer dans les banlieues et de fuir le centre devenu irrespirable et trop bruyant, ou pour abriter les ruraux attirés par l'aimant urbain. Ce concept s'est étendu sous des formes multiples d'abord à Paris, et aujourd'hui un peu partout dans le monde. On le trouve à Brasilia, à Buenos-Aires, au Caire, à New Delhi, à Séoul. À Séoul, qui s'étend sur 605 km² avec plus de 12 millions d'habitants, la zone métropolitaine couvre plus de 11 600 km² et concerne 5 sous-régions avec près de 20 villes satellites et 5 millions d'habitants, soit près de la moitié de la population de Séoul elle-même. La croissance de Séoul a pu être contenue, l'afflux des migrants se concentrant cependant sur la zone externe. Le concept de région urbaine prend le pas sur celui de la ville. Ces villes satellites peuvent être de véritables ghettos, pour pauvres ou bien pour riches. Sao Paulo, qui a vu se développer, pour les populations aisées ou moyennes, un important ensemble de tours de grande hauteur, connaît aujourd'hui une multiplication des villes satellites îlots, puissamment protégées pour des questions de sécurité : l'urbanisme ségréatif dans tous ses excès.

3.2.3 Les quartiers « spontanés »

Comme l'analyse en détail Haeringer (1998), l'urbanisation sauvage qui accueille la majeure partie des nouveaux habitants des mégapoles des pays en développement procède d'un phénomène sensiblement différent de ceux qui ont

créé les développements urbains, même très spectaculaires, du XIX^e et de la première moitié du XX^e siècle, dont le moteur avait été l'attractivité de l'emploi industriel en plein essor. Aujourd'hui, sur fond de disqualification des productions paysannes, elle répond à un déséquilibre démographique majeur lié à la baisse de la mortalité infantile, et se poursuit inexorablement, même en situation de crise économique, ne laissant aucun espoir d'emploi ni de revenus. La collectivité urbaine, aujourd'hui, loin de l'appeler de ses vœux, y voit une source de trouble et de déséquilibre qu'elle tente d'endiguer tant bien que mal. On estime à 600 millions le nombre d'habitants de ces secteurs vivant sous une menace permanente pour leur vie et leur santé, et à plus de 100 millions le nombre des sans-abri, d'après UNCHS, 1996. Certains de ces quartiers progressent de 10 % à 20 % par an (Global Environment Outlook, PNUE, 2000).

Cette urbanisation spontanée, généralement sans support légal, exécutée par autoconstruction, se développe dans les pires conditions de site, en occupant en général les territoires les plus ingrats (fonds de vallées marécageux, zones exposées aux inondations, flancs de collines soumis au ruissellement, au ravinement, aux coulées de boues, ...). De ce fait, ce sont les sites les plus coûteux à équiper en services publics (longueur de canalisations, instabilités des terrains, profondeur des fondations, importance des voiries pour les transports publics, ...). Et dans le même temps, ce sont ces territoires sur lesquels les investissements collectifs sont les plus faibles. Étant les lieux d'accueil par défaut de la grande pauvreté, la possibilité de prise en charge par les habitants y est également la plus réduite. C'est donc bien souvent l'impasse.

Dans les conditions les meilleures, malheureusement rarement atteintes, une première zone est desservie par robinet, au fur et à mesure des programmes d'habitat, ainsi que le long des grandes voiries. Le reste de cette zone sera parfois desservi aussi au robinet mais le plus souvent par des bornes-fontaines. Au-delà se situe la zone où s'entassent les migrants dans les pires conditions. Les habitants y sont souvent obligés d'acheter l'eau potable à des marchands ambulants à un prix en général dix fois supérieur à celui de l'eau du réseau³⁴. La maîtrise de l'urbanisation est beaucoup plus difficile dans beaucoup de ces villes en croissance rapide : la demande à satisfaire est chaque jour plus forte, les terrains à mobiliser plus importants. Or, ces villes, en plus des problèmes techniques à résoudre, ne disposent généralement pas de moyens financiers suffisants pour équiper à l'avance tous les terrains. La figure 1.12 schématise ce processus d'urbanisation (Roche *et al.*, 2002). Le cœur à habitat dense est prolongé, généralement en étoile, le long des routes principales par des zones d'extension différenciées, l'une accueillant un habitat moyennement dense, individuel, en bandes ou en petits immeubles destinés à la classe moyenne, l'autre constituée de lotissements d'habitat économique, comportant des parcelles pour

³⁴http://www.pseau.org/outils/ouvrages/lettre_44.pdf, décembre 2003.

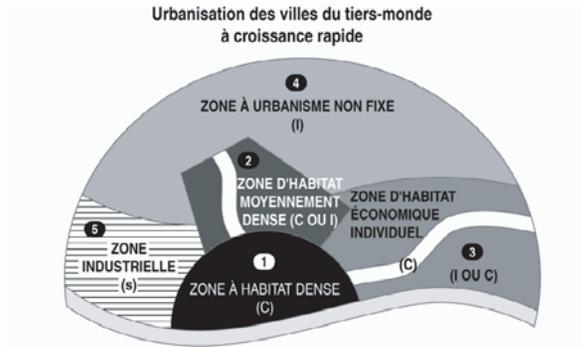


Figure 1.12
Urbanisation des villes du tiers-monde à croissance rapide.

un habitat en dur, complétés par un habitat plus dense, en petits immeubles, le long des grands axes de desserte. Enfin, sont également prévues diverses zones d'activités. L'urbanisation organisée et contrôlée est débordée et ne parvient pas à assumer l'urbanisation spontanée liée aux pressions migratoires et à l'explosion démographique.

La vision apocalyptique de ces villes sans un minimum d'urbanité, de ces mégapoles qui ne sont pas pour autant des métropoles, a alimenté des discours parfois très pessimistes sur l'avenir. Des efforts importants sont faits pour sortir de ce cercle vicieux, notamment pour créer les équipements indispensables, en valorisant au maximum les capacités d'organisation de la population. La collectivité, *volens nolens*, viendra régulariser et équiper *a posteriori* ces espaces qui font l'objet d'une colonisation pionnière. Raison de plus pour ne pas nier leur évidence, et au contraire mobiliser les ressources nécessaires à leur équipement progressif, par des étapes successives adaptées. Faire face à cet afflux, c'est bien l'enjeu des trente prochaines années. Les enjeux du développement urbain et des impacts environnementaux sont intimement liés, comme en témoigne, parmi beaucoup d'autres, l'exemple de Jakarta (encadré 1.22).

Encadré 1.22

Jakarta, urbanisation et environnement

Pierre-Alain Roche, ministère de l'Équipement

La croissance de Jakarta a conduit à l'élargissement de l'espace urbain. La cité de 26 km² du début du siècle est devenue aujourd'hui une zone métropolitaine de 6 800 km² dont plus de 700 km² urbanisés à Jakarta même et

plus de 100 km² à Tangerang et Bekasi, à l'est et à l'ouest, et à Bogor au sud. Cette zone élargie dénommée « Jubotabek » avait 11,5 millions d'habitants en 1980 et près de 20 millions en l'an 2000, dont 60 % à Jakarta même. Dans cette zone à l'origine agricole, la croissance urbaine a provoqué de nombreux dérèglements : déforestation, érosion, risque d'inondation, intrusion d'eau salée, affaissement des sols avec l'intensification des pompages (figure 1.13). Cela a conduit à rechercher une gestion intégrée des ressources en eau pour tous les usages, rendue difficile par les lacunes de structure institutionnelle adaptée à cette échelle.

Impacts environnementaux des conflits d'occupation des sols dans Jabopunjur

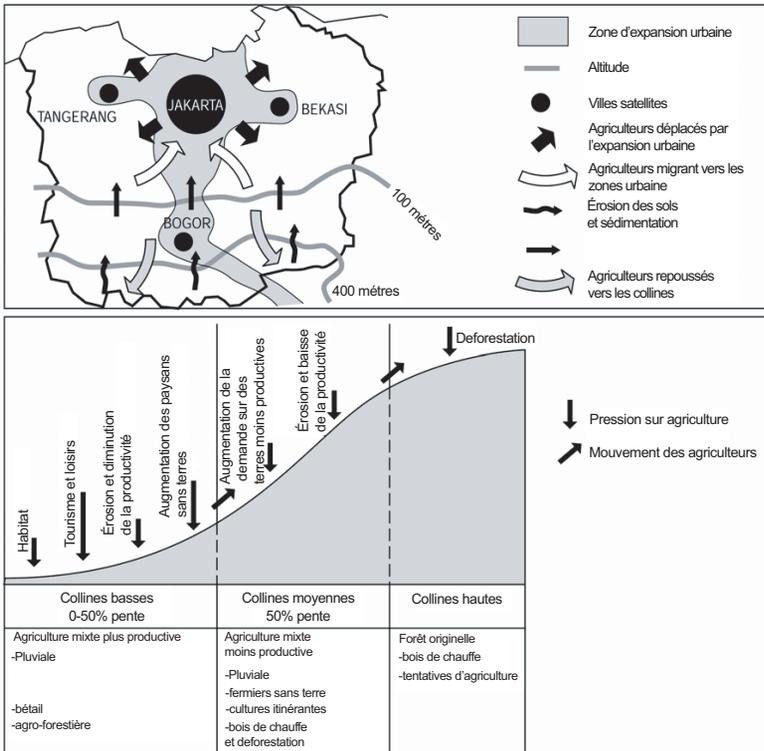


Figure 1.13
Impacts environnementaux des conflits d'occupation des sols dans Jabopunjur.

3.2.4 Maîtrise des eaux pluviales : une des difficultés majeures

Pour des raisons aussi bien sanitaires que de maîtrise des risques d'inondation, le défi qui apparaît sans doute le plus difficile à relever dans cette expansion urbaine de grande échelle, plus encore que les services d'eau potable et d'assainissement, consiste à assurer une maîtrise des eaux pluviales, des risques sanitaires liés à leur stagnation et de la pollution que celles-ci véhiculent.

Ce sujet particulier de la maîtrise des eaux pluviales rencontre des difficultés spécifiques de financement et de prise en charge institutionnelle. En effet, il ne s'appuie pas naturellement comme les services d'eau potable et d'assainissement sur une clientèle domiciliée, individuelle, à laquelle un service est apporté en contrepartie d'une facturation. Il relève le plus souvent des sources de financements de l'impôt général et s'intègre dans une politique publique de choix des investissements urbains qui ne lui fait pas naturellement une place prioritaire.

L'urbanisation décrite ci-dessus s'accompagne le plus souvent :

- d'une absence d'équipements conduisant à des eaux pluviales stagnantes posant des problèmes majeurs d'hygiène ;
- d'une imperméabilisation accrue conduisant à une très forte augmentation des débits d'orage. Lorsque les premiers équipements sont réalisés, ils ne comportent le plus souvent aucun dispositif adéquat d'évacuation ou de stockage des eaux pluviales, et lorsqu'ils existent, ils ne peuvent être maintenus en état de fonctionnement par manque de moyens municipaux et difficulté générale de maîtrise de l'érosion et de la sédimentation, de gestion des déchets et d'évacuation et traitement des produits de curage.

Lorsque ces aspects ne sont pas maîtrisés, se multiplient en ville, dans des secteurs densément peuplés, le débordements en période de pluie et la stagnations des eaux, bien sûr alors mélangées avec les eaux usées. Lorsque ces aspects sont pour l'essentiel maîtrisés en terme d'investissements, apparaissent deux difficultés :

- la gestion en temps réel des installations face à des situations d'orages ou de pluies toujours différentes, dans leur déroulement comme dans leur répartition spatiale, avec de faibles capacités d'anticipation et dans des conditions d'exploitation pouvant comporter de très nombreuses sources de dysfonctionnement (alimentation électrique défaillante, vannes bloquées, capteurs de mesure hors d'usage ou fournissant des données erronées, etc.). Qu'advierait-il le jour où le grand système de drainage central profond de Mexico, qui assure l'évacuation des eaux pluviales

et usées de cette grande cuvette lacustre asséchée à faibles pentes, sans exutoire naturel adapté, connaîtrait une difficulté technique majeure ? Les conséquences en terme de santé publique et de fonctionnement urbain seraient considérables et imparables dans la configuration actuelle de ce système ;

- l'importance majeure de la pollution urbaine (hydrocarbures, métaux lourds, ...) transportée par le ruissellement des eaux pluviales sur les toitures et les chaussées. En Europe, ces questions sont aujourd'hui sur le devant de la scène : en agglomération parisienne, ces pollutions dépassent aujourd'hui celles des rejets industriels et de la consommation domestique réunis. La concentration et l'importance des métaux lourds issus des toitures conduisent à modifier les matériaux de celles-ci pour réduire la pollution à la source. Une part des recherches se tourne également vers la valorisation et le recyclage des produits ainsi collectés.

L'hypothèse d'une poursuite de solutions uniquement technologiques, sans efforts individuels de maîtrise à la parcelle, est une impasse en raison de ses coûts et de la déresponsabilisation collective à laquelle elle conduit, qui pousse en réalité le développement de la situation actuelle de laisser-faire, de non-investissement et de non-entretien. Tout se passe comme si l'urbanisation actuelle « n'avait pas les moyens » de gérer la partie la moins rentable de ses investissements technologiques. Le programme Habitat considère brutalement que « les systèmes utilisés dans le monde développé ne sont pas les plus efficaces et les plus logiques ». Certains expriment également qu'ils ne sont pas soutenables et de nombreux auteurs appellent à de nouveaux paradigmes.

En France, la remise en cause des solutions purement technologiques au profit de solutions plus locales a progressé dans les années 1980-1990 et reste d'actualité : ces expériences sont regroupées sous les termes d'« eau dans la ville » ou de « techniques alternatives ». Pour éviter de véhiculer l'eau de pluie des grandes métropoles avec les eaux usées au prix d'ouvrages toujours plus gigantesques, on sépare, on réinfiltre, on stocke, on reconstruit des zones humides, on réhabilite la présence de l'eau dans la ville (Roche *et al.*, 2001). Certains considèrent parfois même que la protection environnementale est aujourd'hui tellement omniprésente en Europe qu'elle conduit inversement à négliger les questions d'hygiène et de protection contre les inondations qui sont abusivement considérés comme résolus. L'idée d'un développement possible sans impact sur l'environnement (hypothèse d'ailleurs assez présente dans la directive-cadre européenne sur l'eau) avec une maîtrise totale à la source et uniquement basée sur des mesures locales sans recours à des réseaux de collecte est fortement dominante (dans les discours, pas dans les faits). On sous-estime alors la difficulté de la maîtrise sanitaire et de la gestion quotidienne d'une multitude toujours

plus grande d'installations individuelles reposant essentiellement sur le civisme de tous.

On peut plutôt faire l'hypothèse moins radicale que ces mesures utiles de rétention à la source, et d'infiltration apportent une contribution importante à la maîtrise des problèmes si l'on peut y associer des systèmes de gestion adéquats, mais qu'il reste une part d'effet d'imperméabilisation qui requiert la mise en place de systèmes lourds de stockage, de transfert, et de traitement des eaux pluviales avant rejet.

3.3 Risques rares d'inondations et fragilité des grands systèmes urbains

La question des eaux pluviales nous conduit sur le terrain des événements de fréquence de retour plus rares. Les inondations posent la question de l'exposition de ces nouveaux systèmes urbains aux risques, y compris ceux relativement rares que constituent les inondations de grande ampleur, à probabilités d'occurrence de 10 % à 1 % par an (événement décennal à centennal), voire quelques pour mille par an (pluricentennal).

Le facteur principal d'évolution des coûts des dommages est sans conteste celui de la valeur des biens exposés, indépendamment de toute évolution des aléas, dans les zones inondables. Au-delà de l'évolution générale du PNB, ces zones, en l'absence de mesures draconiennes de maîtrise de l'occupation des sols, constituent en effet un territoire privilégié d'accueil des activités humaines qu'elles concentrent dramatiquement³⁵. Le bénéfice immédiat l'emporte sur toute autre considération. La concentration urbaine en accroît l'impact et la situation peut se résumer en quelques constats (voir les encadrés 1.23 et 1.24 concernant l'Île-de-France et Shanghai) :

- malgré des efforts d'aménagements très considérables, les villes des pays développés comme celles des pays pauvres sont mal adaptées à l'existence de ce risque pourtant prévisible, bien connu et facile à évaluer ;
- cette inadaptation tient pour une part à l'inconscience d'une extension urbaine relativement récente en zone inondable, mais aussi à l'existence de l'ensemble de l'agglomération autour du fleuve, dès ses installations les plus anciennes, et au phénomène de boule de neige qui vient agglutiner aux installations existantes les nouveaux établissements. La fragilité des centres-villes historiques est réelle et les centres de décision majeurs sont inondés en cas de crue majeure ;

³⁵Il faudrait éventuellement s'interroger sur l'influence néfaste des lois d'indemnisation des catastrophes naturelles pour une gestion de l'urbanisme diminuant la vulnérabilité.

- c'est de plus en plus la complexité et la fragilité des systèmes et réseaux urbains modernes qui transforment un épisode somme toute supportable en catastrophe humanitaire par un effet de château de carte qui vient induire des conséquences économiques dans des périmètres très largement supérieurs à ceux qui sont réellement inondés ;
- les efforts d'aménagement et les politiques d'occupation du sol vertueuses engagées sont certes utiles et souhaitables mais ne s'appliquent en pratique que là où il y a le moins d'enjeu et où ils ne modifieront pas sensiblement la scène : inexistants dans les métropoles en pleine explosion démographique, ils concernent les périphéries d'agglomérations de pays développés dont les taux de croissance démographique sont faibles ;
- bien que l'efficacité économique des efforts d'adaptation des réseaux urbains et du dispositif de gestion de crise soit évidente et colossale, ceux-ci sont en général minimes au regard des enjeux.

C'est donc bien une inadaptation à trois niveaux qui doit aujourd'hui être constatée et corrigée :

- *structurelle* : les avantages trouvés successivement dans l'occupation des zones inondables ont conduit à disposer aujourd'hui d'une ville qui occupe de façon inadéquate ces espaces : si l'on savait aujourd'hui reconstruire, ce n'est pas cette urbanisation qui prévaudrait ;
- *fonctionnelle* : la ville vit de plus en plus aujourd'hui sans prendre en compte le risque auquel elle est exposée et multiplie artificiellement par simple impéritie les conséquences potentielles d'une inondation ;
- *organisationnelle* : l'impréparation de la gestion de crise vient ajouter la désorganisation et l'inadéquation potentielle des décisions à la vulnérabilité des systèmes : c'est bien sûr dans ce domaine majeur que les progrès les plus importants sont à attendre de la démarche engagée.

Les actions à mener s'en déduisent naturellement :

- structurelles : on est ramené à la question des ouvrages régulateurs, digues et diverses protections, qui réduisent les conséquences des événements pour lesquels ils ont été dimensionnés, mais encouragent le renforcement de la vulnérabilité aux événements plus importants ; et également à la préservation ou au rétablissement des zones d'expansion des crues ;
- non structurelles :

- maîtrise de l'occupation des sols, en particulier dans les agglomérations à forte expansion démographique,
- amélioration de la prévision hydrométéorologique permettant de gagner de précieuses heures dans la gestion de la crise,
- adaptation des systèmes urbains pour en réduire la vulnérabilité (réseaux électriques, transports publics, télécommunication, eau potable et assainissement) en limitant les effets de château de carte,
- préparation de l'organisation des secours.

Encadré 1.23

L'Île-de-France, des effets en château de cartes

Pierre-Alain Roche, ministère de l'Équipement

Les crues de la Seine et de ses affluents se produisent essentiellement de mi-décembre à avril, avec un risque particulier en janvier et février. En mai, des crues tardives de moindre ampleur peuvent poser des difficultés sensibles par le fait que les barrages-réservoirs sont alors presque pleins. Ces crues lentes mettent de 3 à 4 jours pour l'Yonne et 6 à 8 jours pour l'aval de la Seine et de la Marne pour parvenir à Paris. Les effets maximaux sont provoqués par l'arrivée concomitante de plusieurs crues liées à des épisodes pluvieux successifs.

La crue la plus importante repérée date de février 1658 (34 cm au-dessus de celle de 1910). Au XVII^e siècle, on enregistra 3 crues exceptionnelles en 9 ans et 5 crues majeures. Au XVIII^e, 6 crues majeures, 13 au XIX^e et 9 au XX^e dont la mémorable crue de 1910, proche d'une occurrence centennale. Depuis 1910, deux fortes crues sont survenues en 1924 et en 1955. Depuis 1955, si la région Ile-de-France n'a vécu aucune crue d'ampleur comparable, c'est que le bassin de la Seine n'a pas connu durant cette même période d'événements pluviométriques et hydrologiques très intenses et non, comme on le croit souvent à tort, par la protection (réelle, mais limitée) apportée par les barrages-réservoirs.

Les premiers dégâts physiques liés à la montée des eaux sont provoqués par les infiltrations de l'eau de la Seine à travers les quais puis par la montée progressive de la nappe de la Seine dans les sous-sols. Les ouvrages situés en sous-sols (canalisations diverses sur jusqu'à 3 m, parkings et urbanisme souterrain jusqu'à 15 m, galeries RER jusqu'à 30 m) sont très nombreux. L'inondation du standard téléphonique du Quai des Orfèvres en 2001 pour

une crue relativement modeste à 5,2 m a été un révélateur de ces phénomènes. À partir de 7,3 m, les inondations proprement dites commencent par l'amont dans les 12^e et 13^e arrondissements et par débordement direct dans les 4^e, 7^e et 15^e. Pour ne parler que de Paris.

Les conséquences socio-économiques sur l'agglomération d'une inondation atteignant le niveau de 1910 seraient considérables en raison de l'importance de la population inondée (estimation Diren : 880 000 personnes, plus 260 000 pour le Val-de-Marne et 255 000 pour les Hauts-de-Seine), du grand nombre d'établissements humains concernés (estimation Chambre de commerce et d'industrie de Paris : 170 000 entreprises) et de la présence de nombreux centres de décision gouvernementaux, politiques, financiers ou économiques dans une ville capitale.

Le fonctionnement de notre société urbaine actuelle est à la fois beaucoup plus sophistiqué que celui du Paris de 1910 et beaucoup plus vulnérable aux inondations : notre dépendance envers la fourniture d'énergie électrique, les télécommunications et les transports est évidente. En 1910, les trains pouvaient circuler malgré quelques centimètres d'eau sur les voies ; actuellement les dispositifs électromécaniques et informatiques ne le supporteraient pas et devraient tous être vérifiés et le plus souvent remplacés. En 1910, les Parisiens pouvaient, dans un mois de janvier particulièrement froid, continuer à se chauffer au charbon dans leur cheminée. Vivre aujourd'hui dans un appartement sans électricité ni chauffage (interruption du chauffage urbain ou chaudières commandées par électricité) serait beaucoup plus délicat.

Les études conduites dans les années 1990 ont conduit à une première alerte des pouvoirs publics : le montant des dégâts d'une crue de type 1910 était alors évalué à 4,6 milliards d'euros (situation 1990). Ces études estimaient que les désordres dus à la hauteur d'eau atteinte par la crue de 1910 toucheraient :

- 70 % du trafic du métro pendant 30 à 50 jours ;
- 50 % du trafic RER pendant 30 à 50 jours ;
- plus de 200 000 abonnés pour l'électricité ;
- plus d'1 million d'abonnés pour le téléphone ;
- près de 100 000 abonnés pour le gaz ;
- 5 usines de traitement des ordures ménagères ;
- 5 centres de production de chauffage urbain ;
- 50 % de la production d'eau potable.

Les évaluations les plus récentes ont porté ce chiffre à plus de 12 milliards d'euros. Aux dégâts directs, il faut ajouter les coûts engendrés par l'altération ou l'arrêt d'un grand nombre de services publics. L'arrêt d'un transformateur EDF touche une zone beaucoup plus vaste que la seule zone inondée ; il en va de même pour tous les réseaux (télécommunications, chauffage urbain, eau potable, assainissement, . . .) et bien évidemment les transports (RATP, SNCF mais aussi ponts, routes et autoroutes). Des effets de « château de cartes » viennent ainsi propager les conséquences de l'inondation dans des périmètres très éloignés : l'estimation des dommages « indirects » ne cesse de croître au fur et à mesure que ceux-ci sont mieux étudiés tant que des précautions spécifiques n'ont pas été prévues pour en réduire la propagation.

Au-delà des dispositifs de lutte contre les effets dévastateurs des inondations, le moyen le plus évident pour se protéger reste d'éviter de construire dans les zones inondables et de préserver les champs d'inondation. La réalisation des PPRI (plans de prévention des risques d'inondation) est enfin bien engagée : fin 2003, la plupart des zones à enjeux des grands cours d'eau d'Île-de-France sont maintenant dotées d'un PPRI approuvé ou en cours d'élaboration. Plusieurs départements en sont parfois à leur deuxième génération, soit parce que des études complémentaires ont apporté des précisions (Val-de-Marne), soit par décision du tribunal administratif (cas de huit communes du Val-d'Oise). Le PPRI de Paris a été arrêté en 2003, le plus récent est celui des Hauts-de-Seine (arrêté du 9 janvier 2004), celui des Yvelines (première partie) en phase de discussion finale avec les élus.

Ces mesures salutaires sont rassurantes (on évite d'aggraver la situation) mais ont été prises alors que le niveau d'urbanisation des zones inondables était déjà très grand : elles ne changent pas fondamentalement le niveau d'exposition collectif aux risques.

Les pouvoirs publics l'ont compris tardivement, une crue importante de la Seine et de ses affluents en Île-de-France est une catastrophe nationale qui plonge le pays dans une situation de crise majeure : centaines de milliers de réfugiés à héberger et alimenter pour plusieurs semaines, activités économiques paralysées, . . . Si l'on se rapporte seulement aux conséquences politiques de la canicule de l'été 2003, ou à celles des crues en Allemagne ou de la coupure prolongée du métro de Prague, il ne fait pas le moindre doute qu'un événement tel que la crue de 1910, outre ses conséquences directes dramatiques, générerait un raz-de-marée politique auquel aucun gouvernement et aucune autorité municipale ne résisteraient.

On l'a vu, on ne peut malheureusement rêver d'aucune solution technique réduisant très sensiblement l'ampleur du risque et il faut donc vivre avec. Seules voies possibles : diminuer la vulnérabilité et améliorer la gestion de crise. Il faut repérer les points faibles fonctionnels du système et mettre en

place une organisation performante pour mobiliser les moyens nécessaires. Les plans de secours spécialisés sont destinés à répondre à ces préoccupations.

Certaines préconisations procèdent du seul bon sens et demandent des aménagements dont le coût, même élevé, reste dérisoire au regard des bénéfices en cas de crue. La RATP connaît ainsi les accès devant lesquels il faudrait construire des protections en trois jours. Le premier plan de secours dont l'élaboration a été engagée en 1998, a été mis en place par la RATP pour éviter l'inondation de son réseau : 400 points doivent être obstrués. Encore faut-il s'assurer que dans ce délai on a la capacité physique de réaliser ces protections. Poser la question, c'est avoir la réponse : non, sauf à les préfabriquer et à les stocker dans un lieu adéquat : ce qui vient d'être fait en 2003. Les standards téléphoniques, les transformateurs EDF sensibles ont été repérés à l'avance, tous les services publics connaissent la marche à suivre en fonction de la montée de l'eau, etc. Un minimum de réflexion amène à transférer ailleurs les éléments sensibles difficiles à transporter rapidement (réserves des musées qui, en cas de crue, auraient mobilisé tous les moyens de secours disponibles sur Paris). Les médias se sont fait l'écho des insuffisances et incohérences qui traduisaient une impréparation coupable de l'ensemble des acteurs publics et ont eu un impact salutaire pour les placer devant leurs responsabilités.

C'est certainement l'un des exercices les plus difficiles et les plus complexes de protection civile. La RATP, SNCF, RFF, EDF, RTE, France Télécom, GDF, les hôpitaux de Paris, l'assistance publique, les musées, les préfectures de département, les syndicats d'eau, d'assainissement, de collecte ou de traitement des déchets et les communes et départements sont concernés, d'autant que les moyens en hommes de l'armée, sur laquelle on comptait traditionnellement en de telles circonstances en France, se sont réduits par la fin de la conscription.

Pour être efficace, une prévision de crue à plus long terme que les prévisions actuelles à 24 heures est nécessaire. L'objectif pour le nouveau service de prévision des crues qui sera mis en place (le SCHAPI) est de passer de la prévision actuelle à 24 heures à 72 heures en conservant une fiabilité satisfaisante, ce qui est parfaitement réaliste.

Il est difficile de chiffrer les économies que l'on peut attendre de ces travaux, mais il est clair que quelques dizaines de millions d'euros de mesures adaptatives sont de nature à réduire du quart ou du tiers les conséquences concrètes de la catastrophe, soit des économies chiffrées en milliards d'euros.

Encadré 1.24

Shanghai

Pierre-Alain Roche, ministère de l'Équipement

Shanghai avec ses 12 millions d'habitants, située à l'embouchure du Yang Tsé, est construite sur des terrains très bas. Elle est soumise à l'effet des pluies de mousson sur des terrains imperméables et à des crues de petites rivières aboutissant au lac Tai Hui. Celles-ci peuvent être très dangereuses si elles se conjuguent avec un typhon, malgré des endiguements très considérables. Le système d'alerte et de prévision permet, dans ce cas, de stocker les eaux de pluies de mousson dans le lac et de réduire ainsi fortement la montée des eaux. Le système de prévision et de gestion mis en place pour faire face à ces événements est un des plus performants au monde (figure 1.14).

3.4 Conclusion

La gestion urbaine des eaux, tant pour les services publics d'eau et d'assainissement que nous n'avons pas développés ici, que pour la maîtrise des eaux pluviales et la prévention de risques majeurs d'inondations, constitue déjà et va constituer de plus en plus dans les décennies qui viennent une difficulté partagée par de nombreux pays, du fait des concentrations urbaines en cours. L'expérience et les compétences françaises dans ce domaine sont reconnues et le haut niveau de technologie des solutions requises (instrumentation complexe, contrôle en temps réel sophistiqué) en font durablement un secteur où le savoir-faire d'ensemble technologique peut être utilement valorisé.

Dans le domaine industriel, des efforts importants d'analyse systémique ont été faits sur des systèmes complexes pour en maîtriser les niveaux de risques par enchaînements d'événements ; par ailleurs, une approche « villes et réseaux » s'est développée en France (Dupuy *et al.*, 1984 ; Veltz, 1993), et a aujourd'hui atteint une vraie dimension pluridisciplinaire avec le Pir-Villes. Mais l'analyse de la ville exposée aux risques naturels est encore très peu développée, en particulier pour les très grandes mégapoles où des effets d'échelle et de concentration d'acteurs rendent les problèmes de secours et de gestion de crise particulièrement complexes, et où les effets se propagent bien au-delà des zones directement exposées. Ce sont pourtant des domaines où la crise (cette « confrontation brutale à l'extrême », Godard *et al.*, 2002) peut avoir des conséquences plus ou moins fortes selon la qualité de préparation et de prévention.

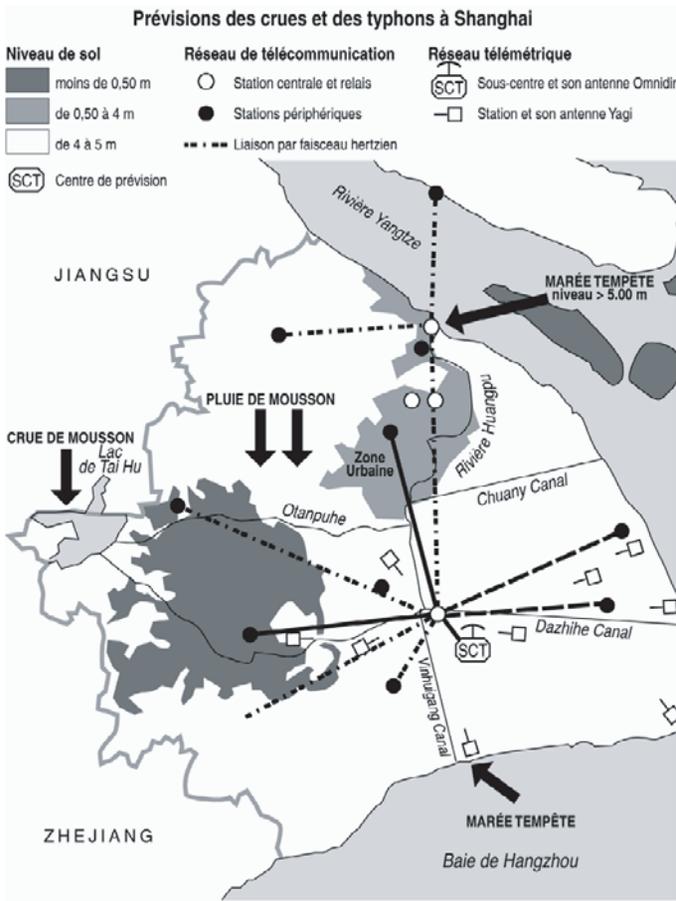


Figure 1.14
Prévision des crues et des typhons à Shanghai.

Conclusions générales

Le monde de demain n'est pas la conservation du monde d'aujourd'hui, encore moins la patiente correction de quelques erreurs du passé, ni l'extrapolation sereine de tendances constatées ; c'est une avalanche de possibles ruptures et de nouveaux défis induits par la rapidité de l'évolution de l'occupation du territoire et des activités humaines qui conduisent à des bouleversements majeurs dont il s'agit de maîtriser au mieux les conséquences. Comment faire face à cette confrontation entre des enjeux économiques et sociaux d'ampleur croissante et une ressource limitée, variable, aléatoire et inégalement répartie ? La fragilité

des solutions technologiques pour répondre à cette pression croissante (voire l'augmentation de la fragilité induite par certains aspects de la technologie) pose clairement la question des moyens à proposer pour assurer la durabilité du développement des années à venir.

La situation européenne est majoritairement celle d'un continent déjà densément peuplé, largement aménagé et à très faible évolution démographique. Concernant les usages, en dehors de quelques zones littorales touristiques, les risques de surexploitation quantitative de la ressource sont globalement faibles, mais le choix des usages prioritaires s'imposera en cas de pénurie, pénuries dont la fréquence est susceptible d'augmenter (voir chapitre 4). Des interconnexions de réseaux, et éventuellement des stockages (par exemple souterrains par recharge artificielle) pourront être à reconsidérer, ou même des transferts sur de longues distances. Concernant la préservation des milieux, les pressions sur les zones humides subsistent et leur protection doit être assurée (delta du Danube notamment) ; des efforts coûteux restent à consentir pour la maîtrise de la pollution urbaine et industrielle essentiellement en Europe de l'Est, et également agricole, notamment par les pesticides, mais la restauration des fonctionnalités de ces milieux est engagée dans l'ensemble de l'Union européenne, sous l'impulsion notamment de la nouvelle directive-cadre européenne sur l'eau.

Les mutations majeures se situent au sein d'autres continents. Notre oasis de relative richesse, de patrimoine collectif et de stabilité démographique ne peut ignorer qu'à l'échelle mondiale, l'essentiel des bouleversements concerne d'abord et surtout les pays et les continents en pleine explosion démographique qui connaissent un puissant phénomène de concentration urbaine et où les difficultés s'accumulent quand ces phénomènes concernent des pays particulièrement pauvres et peu équipés.

La concentration à venir dans les mégapoles du tiers-monde a de quoi inquiéter quant à la possibilité d'accueillir ces nouvelles populations sur des bases déjà aussi dégradées que celles connues aujourd'hui : comment, d'ici 2015, Dhaka au Bangladesh pourra-t-elle accueillir 9 millions d'habitants supplémentaires, ou Lagos au Nigéria 10 millions ?

Concernant les risques liés aux inondations, les années récentes ont révélé la vulnérabilité des activités humaines et montré comment pouvaient se déclencher des réactions en cascade. Ceci a suscité l'inquiétude des populations et le doute chez les politiques sur l'adéquation des mesures de protection prises ou restant à prendre. La concentration urbaine dans les zones inondables ainsi que les problèmes de maîtrise des eaux pluviales posent, parmi beaucoup d'autres difficultés, des problèmes croissants.

La recherche française et les institutions de gestion de l'eau en France bénéficient à la fois d'une notoriété internationale réelle et d'une maîtrise effective tant des technologies que des mécanismes sociopolitiques aptes à aider à la résolution de ces questions. Nous avons proposé tout au long de ce chapitre quelques pistes de progrès qui nous semblent de nature à faciliter leur mobilisation sur les enjeux les plus cruciaux, et, sachant la limite des moyens disponibles, d'alerter sur la nécessité de ne pas passer à côté de l'immense mouvement actuel, sans doute sans précédent, d'aménagements de toutes natures engagés dans les continents connaissant les mutations démographiques les plus puissantes.

Il s'agit de confronter l'urgence (échéances de 5 à 20 ans) des problèmes humains (démographie, sortie de la pauvreté, accès à la nourriture, à la santé — chapitre 3 —, notamment par l'accès à l'eau et à l'assainissement de milliards de personnes) à la compréhension croissante de la complexité des hydrosystèmes et de leurs temps d'évolution (la panarchie qui sera présentée au chapitre 2) ainsi qu'à des évolutions climatiques à échéance de 50 ou 100 ans (chapitre 4) susceptibles d'affecter à la fois les régimes moyens et les événements extrêmes (crues et sécheresses).

Références bibliographiques

- Académie de l'eau (2002). *Proposition de guide stratégique pour aider la constitution de commissions internationales inter-États sur les eaux partagées*. Agence de l'eau Seine-Normandie, Paris, France.
- Académie des sciences (2003). RST N° 15. *Études sur l'environnement : De l'échelle du territoire à celle du continent*. Éditions Tec. & Doc Lavoisier.
- African Caucus (1999). *The Africa Water Vision for 2025 : Equitable & Sustainable Use of Water for Socioeconomic Development*.
- Alcamo J., Henrichs T., Roesch T. (1999). *World Water in 2025 : Global modeling and scenario analysis for the World Commission on Water for the 21st Century*. University of Kassel, Centre for Environmental Systems Research, Germany.
- Allan JA. (1998). Virtual water : a strategic resource. Global solutions to regional deficits. *Groundwater*, **36** (4) : 545-546.
- Banque mondiale (1996). *Proceedings of the World Bank subsaharian Africa water resources technical workshop*. Dakar, Sénégal.
- Banque mondiale (1999). *World development report 1999/2000 : entering the 21st Century*. Oxford University Press, New York, USA.

- Barraqué B. (2005). *Eau (et gaz) à tous les étages : comment les Européens l'ont eue, et comment le tiers-monde pourrait l'avoir ?* Séminaire IDDRI. Accès aux services essentiels dans les PED.
- Besbes M., Chahed J., Bargaoui Z., Matoussi MS., Mhiri A. (2002). *L'avenir de l'eau : un nouveau challenge pour la Tunisie*. Institut tunisien d'études stratégiques.
- Besbes M. et al. (2003). Système Aquifère du Sahara Septentrional, Gestion commune d'un bassin transfrontière. *La Houille Blanche*, **5** : 128-133.
- Billen G., Garnier J. (1999). Nitrogen transfer through the Seine drainage network : a budget based on the application of the RIVERSTRAHLER Model. *Hydrobiologia*, **410** : 139-150.
- Behrman JR., Alderman H., Hoddinott J. (2004). *Hunger and malnutrition*. Copenhagen Consensus Challenge Paper.
- Boët P., Fuhs T. (2000). Predicting presence of fish species in the Seine River basin using artificial neural networks. p. 131-142. In : *Artificial neuronal networks. Application to ecology and evolution*, Lek S., Guégan JF. (eds.). Environmental Science, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- Cavallier G. (1996). De la ville à l'urbain. *Urbanisme*.
- Commission européenne. Directive 2000/60/CE établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. *Journal officiel* N° L 327 du 22/12/2000.
- Conseil mondial de l'eau (2000). Commission mondiale sur l'eau pour le XXI^e siècle, Rapport au Forum de La Haye, Marseille.
- Cosgrove WJ., Rijsberman FR. (2000). *World Water Vision. Making water everybody's business*. Conseil mondial de l'Eau, Marseille, EARTHSCAN.
- Cugier P., LeHir P. (2002). Development of a 3D hydrodynamical model for coastal ecosystem modelling. Application to the plume of the Seine River. *Est. Coast. Shelf Sci*, **55** : 673-695.
- Cugier P., Billen G., Guillaud JF., Garnier J., Ménesguen A. (2005). Modelling eutrophication of the Seine Bight under present, historical and future Seine river nutrient loads. *Journal of Hydrology*, **304** : 381-396.
- Davies WJ. (2005). Ecophysiological principles at work : partial root drying as a water saving technique for crop growth in arid systems, University of Lancaster, UK, http://www.nioo.knaw.nl/events/current_themes_in_ecology/CT5Freshwater/abstracts/CT5Davies.htm

- Ducharne A., Théry S., Billen G., Benoit M., Brisson N., Garnier J., Kieken H., Ledoux E., Mary B., Mignolet C., Mermet L., Poux X., Sauboua E., Schott C., Viennot P., Abu Alkhair A., Baubion C., Curie F., Ducos G., Gomez E., Lebonvallet S., Olive G., Sicart JE. (2004). *Projet GICC-Seine : influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine, rapport final*. Programme PIREN-Seine. Université Paris VI, UMR SISYPHE.
- Dupuy G. (ed.) (1984). *Les réseaux techniques urbains. Les annales de la recherche urbaine*, **23-24**, Dunod.
- FAO (2003). *World Agriculture — towards 2015/30*.
- Fritsch JM. (1998). *Les ressources en eau, intérêts et limites d'une vision globale*. In : *Revue française de géoéconomie*, N° 4. Economica, Paris, France.
- Gabrié C. (1995-a). *L'état de l'environnement dans les territoires français du Pacifique sud. La Nouvelle-Calédonie et Wallis et Futuna*. Medd, Ifen.
- Gabrié C. (1995-b). *L'état de l'environnement dans les territoires français du Pacifique sud. La Polynésie française et Clipperton*. Medd, Ifen.
- Garnier J., Billen G., Coste M. (1995). *Seasonal succession of diatoms and chlorophyceae in the drainage network of the River Seine : Observations and modelling*. *Limnol & Oceanogr*, **40** : 750-765.
- Garnier J., Leporcq B., Sanchez N., Philippon X. (1999). *Biogeochemical budgets in three large reservoirs of the Seine basin (Marne, Seine and Aube reservoirs)*. *Biogeochemistry*, **47** : 119-146.
- Godard O., Henry C., Lagadec P., Michel-Kerjan E. (2002). *Traité des nouveaux risques*. Gallimard.
- Gomez E., Ledoux E. (2001). *Démarche de modélisation de la dynamique de l'azote dans les sols et de son transfert vers les aquifères et les eaux de surface*. *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, **87** : 111-120.
- Gomez E., Ledoux E., Viennot P., Mignolet C., Benoit M., Bornerand C., Schott C., Mary B., Billen G., Ducharne A., Brunstein D. (2003). *Un outil de modélisation intégrée du transfert des nitrates sur un système hydrologique : application au bassin de la Seine*. *La Houille Blanche*, **3** : 38-45.
- Grey D. (2003). *Banque mondiale : séminaire du Conseil mondial de l'eau*. Exposé Powerpoint, Marseille.
- Haeringer P. (1998). *La mégapolisation, un autre monde, un nouvel apprentissage*. In : *De la ville à la mégapole : essor ou déclin des villes au XXI^e siècle*.

- Techniques, Territoires et Sociétés*, N° 35, ministère de l'Équipement, des Transport et du Logement, Paris.
- Kabbaj O. (2001). *Le défi du développement de l'Afrique au début du XXI^e siècle*. Agir, France.
- Keith P., Vigneux E., Bosc P. (1999). Atlas des poissons et crustacés d'eau douce de la Réunion. *Patrimoines naturels, MNHN*, **39** : 1-136.
- Keith P., Vigneux E., Marquet G. (2002). Atlas des poissons et crustacés d'eau douce de la Polynésie française. *Patrimoines naturels, MNHN*, **55** : 1-175.
- Khanfir R. et al. (1998). EAU 21. *Stratégie du Secteur de l'Eau en Tunisie à long terme*. Min. Agri., Tunis.
- Lepetit B., Pumain D. (1993). *Temporalités urbaines*. Ed. Anthropos, Paris.
- Maddison A. (2001). *L'économie mondiale, études du Centre de développement*. OCDE, Paris, France.
- Mahé G., Olivry JC. (1995). Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest de 1951 à 1989. *Sécheresse*, vol. 6, Paris, France.
- Margat J., Vallée D. (1999). *Mediterranean Vision on Water, Population and the Environment for the XXIst Century*.
- Marquet G., Keith P., Vigneux E. (2003). Atlas des poissons et crustacés d'eau douce de la Nouvelle-Calédonie. *Patrimoines naturels, MNHN*, **58** : 1-282.
- Meublât G. (ed.) (2001). Les nouvelles politiques de l'eau, enjeux urbains, ruraux, régionaux. *Revue Tiers Monde*, N° 166, t. XLII. Presses Universitaires de France, Vendôme, France.
- Meybeck M., Marsily G. de, Fustec E. (eds.) (1998). *La Seine en son bassin, fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*. Elsevier, Paris, 749 p.
- OSS (2003). *Système Aquifère du Sahara Septentrional. Gestion commune d'un bassin transfrontière. Rapport de Synthèse*. Observatoire du Sahara et du Sahel. Tunis
- Partenariat mondial pour l'eau (1998). *Southern Africa Vision for Water, Life and the Environment in the 21st Century and Strategic Framework for Action Statement*, SATAC (Global Water Partnership — Southern Africa Technical Advisory Committee).
- Partenariat mondial pour l'eau (1999-a). *Toward water security : a framework for action*. GWP, Stockholm.

- Partenariat mondial pour l'eau (1999-b). West Africa Water Vision, WATAC (Global Water Partnership — West Africa Technical Advisory Committee).
- Poux X., Olive G. (2003). Prospective agricole sur le bassin de la Seine, rapport d'activité 2002 du PIREN-Seine, Université Paris VI, UMR Sisyphe, 23 p. http://www.sisyphe.upmc.fr/~agnes/gicc/final/annexes/4.Rapport_AScA_2002.pdf.
- PNUE : Global environmental outlook, <http://www.unep.org/GEO2000>.
- Roche PA. (2000). L'eau au XXI^e siècle, enjeux, conflits, marchés. RAMSES, Ifri.
- Roche PA., Macsimovitch M., Tejada-Guibert E. (eds.) (2001). *La gestion urbaine de l'eau au XXI^e siècle, espoir ou impasse ?* Unesco, Presses des Ponts et Chaussées.
- Roche PA., Margat J., Bommelaer O., Tien Duc N., Barraqué B. (2002). Gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle mondiale. Cours de l'ENPC, Paris, France.
- Roche PA., Billen G., Bravard JP., Décamps H., Pennequin D., Vindimian E., Wasson JG. (2005). Les enjeux de recherche liés à la directive-cadre européenne sur l'eau. *C.R. Geoscience*, **337** : 243-267.
- Rockström J. (2003). Water for food and nature in drought-prone tropics : vapour shift in rain-fed agriculture. *Phil. Trans. R. Soc. London B*, **358** : 1997-2009.
- Rockström J. (2004). Magnitude of the hunger alleviation challenge — Implications for consumptive use. Proc. Stockholm International Water Institute seminar « Balancing food and environmental security : finding opportunities for improving livelihoods ».
- Sebillotte M., Hoflack P., Leclerc LA., Sebillotte C. (2003). *Prospective l'Eau et les Milieux Aquatiques. Enjeux de société et défis pour la recherche*. Éditions Inra, Cemagref éditions, Paris, Antony.
- Shiklomanov IA. (1999). *World Water resources and Water Use, present assessment and outlook for 2025*. State Hydrological Institute, St Petersburg, Russia.
- Tardieu F. (2005). Plant tolerance to water deficit : physical limits and possibilities for progress. *C.R. Geoscience*, **337** : 57-67.
- Tien Duc N. (1999). *L'Humanité mourra-t-elle de soif ?* HYDROCOM Éditions, Paris.
- Tien Duc N. (2004). *La guerre de l'eau aura-t-elle lieu ?* Johannet.

- Trébuil G. (2004). Intensification durable de la production agricole dans les zones à forte densité de population et à productivité élevée d'Asie. *In : Colloque Académie d'agriculture de France*. Cirad, Paris, 13 octobre 2004.
- Veltz P. (1993). *Logiques d'entreprises et territoires : les nouvelles règles du jeu. Les nouveaux espaces de l'entreprise*. DATAR, Ed. de l'Aube.
- Zimmer D., Renault D. (2003). Virtual water in food production and global trade : review of methodological issues and preliminary results. *Proceedings Delft Workshop on Virtual Water*. IHE.

CHAPITRE 2

Écosystèmes aquatiques

HENRI DÉCAMPS

Introduction

Depuis plusieurs décennies, nos besoins en eau s'accroissent et se diversifient — une tendance appelée à se poursuivre dans les décennies à venir. Pour être satisfaits, ces besoins exigent des milieux aquatiques en « bon état ». D'où l'objectif fixé par la directive cadre européenne sur l'eau : atteindre en 2015 un état ne s'écartant que légèrement d'une situation de référence — celle de milieux faiblement modifiés par les activités humaines¹.

Cependant, les eaux continentales correspondent à des systèmes instables, susceptibles de passer d'un état à un autre, selon des trajectoires qui, elles-mêmes, évoluent en fonction de tendances à long terme — climatiques, hydrologiques, géomorphologiques (encadré 2.1). Les interactions entre les organismes vivants ajoutent à ces tendances des dynamiques à plus court terme, cycliques ou chaotiques, au gré d'assemblages infiniment variables dans l'espace et dans le temps. Tout « état » d'un système aquatique s'inscrit ainsi dans un ensemble de « régimes dynamiques », secoués de ruptures soudaines, rarement prévisibles.

Dans ces conditions, comment assurer un bon état des eaux continentales et, par suite, satisfaire les besoins en une eau de plus en plus rare et précieuse ? Comment tendre vers ce bon état partout, dans la diversité des régions et des territoires ? L'écologie propose une réponse originale à ces questions, en fixant un objectif et en présentant une méthode. L'objectif est de rendre les écosystèmes aquatiques plus résilients, c'est-à-dire plus aptes à se régénérer après perturbations, que ces dernières soient naturelles ou provoquées. La méthode est de gérer cette résilience (Folke *et al.*, 2002). La résilience est en effet nécessaire pour utiliser les biens et les services de systèmes soumis, entre autres, à des crues et à des sécheresses de plus en plus probables et aiguës. Quant à la gestion, elle exige de mieux comprendre comment évoluent les interactions entre les milieux terrestres et aquatiques, à diverses échelles d'espace et de temps, sous l'effet de mécanismes multiples et interdépendants².

Ce chapitre part de l'idée que les organismes vivants témoignent des états successifs des eaux continentales, et représentent un « capital nature » d'une valeur à bien des égards inestimable (§ 1). Préserver ce capital conduit à retenir la notion de résilience comme clé d'un développement durable des écosystèmes

¹La directive cadre définit le « bon état écologique » des eaux superficielles en référence à un état peu perturbé par les activités humaines pour ce qui est de la biologie du milieu, le « bon état chimique » des eaux superficielles et souterraines par rapport à des normes européennes sur l'écotoxicité et la toxicité pour l'homme, et le « bon état quantitatif » des eaux souterraines par rapport à un équilibre entre captage de la ressource en eau et renouvellement naturel de la nappe phréatique (Commission européenne).

²Voir aussi le « Millenium Assessment Report, Ecosystems and Human Well-being. Synthesis » (2005). Island Press, Washington, DC. www.maweb.org

aquatiques (§ 2), à gérer cette résilience dans un environnement toujours fluctuant et incertain (§ 3), et à prescrire des traitements capables d'assurer la santé écologique des eaux continentales (§ 4). Ces questions amènent à prendre conscience d'un devoir : celui d'une vision planétaire de « socio-écosystèmes » indissolublement liés aux eaux continentales (§ 5).

Encadré 2.1

Un siècle de limnologie

Henri Décamps, Académie des sciences

Qualifiée d'océanographie des lacs par son fondateur, le suisse François-Alphonse Forel, la limnologie est née en 1901, avec la publication d'une monographie limnologique sur le Léman. Elle est ensuite devenue la science des eaux continentales, en s'intéressant aux relations qu'entretiennent les organismes aquatiques et riverains entre eux et avec leurs milieux — lacustres ou lotiques, superficiels ou souterrains, doux ou saumâtres.

La limnologie moderne est donc l'héritière d'un siècle d'histoire. Elle s'est particulièrement développée entre les deux grandes guerres mondiales, en Europe, en Amérique du Nord et au Japon. Parmi les figures marquantes de la discipline, l'Allemand August Thienemann et le Suédois Einar Nauman³ animèrent pendant une trentaine d'années, entre autres recherches, un vaste travail de classification des lacs de la planète, tandis qu'en Amérique du Nord, Edward Birge et Chancey Juday s'attachaient à replacer les lacs et leurs différents types le long de gradients environnementaux. Cette phase principalement descriptive prit fin avec G. Evelyn Hutchinson, auteur d'un monumental *Traité de Limnologie* et instigateur d'une bonne part des recherches menées de 1945 à 1980 sur l'écologie des eaux continentales.

De 1945 à 1960, les avancées les plus marquantes ont porté sur : le métabolisme des rivières, l'influence des bassins versants sur le fonctionnement écologique et biogéochimique des cours d'eau, la modélisation prédictive de l'eutrophisation des lacs et leur réhabilitation, la manipulation *in situ* des réseaux trophiques. Ces avancées, souvent réalisées par de petites équipes dans un souci d'application, ont stimulé des recherches plus fondamentales sur les mécanismes écologiques sous-jacents. Elles ont aussi ouvert la voie, notamment sous l'influence du Programme biologique international entre

³Thienemann et Nauman fondèrent la Société internationale de limnologie théorique et appliquée en 1922, une société aujourd'hui forte d'environ 2 800 adhérents répartis en plus de 80 pays, tenant congrès tous les quatre ans (sa branche française est l'Association française de limnologie, <http://aflimno.free.fr>).

1960 et 1980, au développement de modèles quantitatifs de plus en plus réalistes. Les travaux menés en France, dans les différents organismes de recherche et dans les universités, ont largement contribué à ces avancées (Pourriot et Meybeck, 1995).

Les dernières décennies du XX^e siècle ont vu s'estomper les limites entre limnologie fondamentale et appliquée. Surtout, elles se sont démarquées des décennies précédentes (Kalff, 2002) : d'un point de vue technique, les méthodes d'observations en continu, y compris par télédétection, ont permis de disposer de quantités considérables de données, en même temps que se développaient les capacités de modélisation et que s'affinaient les analyses permettant de détecter, par exemple, les produits contaminants ; d'un point de vue conceptuel, les écosystèmes aquatiques continentaux sont apparus comme des systèmes ouverts, largement influencés par les caractéristiques de leurs bassins versants, et les communautés aquatiques comme des systèmes en état de non-équilibre quasi permanent. Mais la structuration de ces communautés continue à diviser les tenants des approches par populations et par écosystèmes : les premiers privilégient les interactions entre espèces (prédation, compétition, parasitisme, symbiose), les seconds privilégient plutôt la disponibilité des ressources (nutriments, lumière).

Au-delà de ce débat, et quel que soit son intérêt, la limnologie est confrontée à deux défis majeurs en ce début de XXI^e siècle. Le premier défi concerne la question des échelles d'espace et de temps — y compris la question des relations entre ces échelles — auxquelles il convient de se placer face aux changements de notre environnement (voir § 2.2 et 3.1). Le second défi concerne l'articulation de la limnologie avec d'autres sciences, particulièrement celles de l'homme et de la société, pour imaginer des solutions aux problèmes posés par ces changements, une articulation qui renvoie à des notions telles que celle de socio-écosystème (voir § 2.3). Répondre à ces défis suppose une organisation plus cohérente et plus interdisciplinaire des recherches conduites en France sur les eaux continentales, une organisation qu'il faudrait repenser, à un niveau européen, sans oublier le devoir d'une vision planétaire (voir § 5).

1 | Les organismes vivants, témoins des états des eaux continentales

Par leur présence, les assemblages d'organismes aquatiques témoignent des événements qui se sont déroulés dans les lacs et les rivières, ainsi que sur les terres de leurs bassins versants. Ces assemblages résultent en effet d'adaptations millénaires à des conditions climatiques, géologiques, chimiques et biologiques.

Ce sont des indicateurs de l'état de santé des eaux continentales — un état de santé qui conditionne les usages des lacs et des rivières, qu'il s'agisse de produire de l'eau potable, de générer de l'électricité, de pêcher, de naviguer ou d'irriguer. Ces indicateurs biologiques doivent permettre de suivre les transformations, naturelles ou provoquées, de l'état des eaux continentales.

Cette première partie porte sur la notion d'état de santé des écosystèmes aquatiques, sur la surveillance de cet état et sur les perturbations susceptibles de le modifier. Elle évoque également la valeur du capital nature associé aux systèmes aquatiques.

1.1 La santé des écosystèmes

Les écosystèmes aquatiques sont transformés par les activités humaines. En certains cas, cette transformation peut aller jusqu'à la disparition pure et simple d'écosystèmes aussi bien établis que ceux de la mer d'Aral. La notion de santé des écosystèmes permet d'évaluer jusqu'où ces transformations restent acceptables. Comment définir cette notion ? Par quelles méthodes la mesurer ? Par quels indicateurs ? Ces questions sont discutées au sein d'une Société internationale de santé des écosystèmes qui, depuis 1994, réunit des scientifiques de divers domaines, des sciences de la nature aux sciences de l'homme et de la société.

La notion de santé des écosystèmes est souvent associée à celle d'intégrité. Ainsi, en 1992, la conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement faisait obligation aux États membres de « sauvegarder la santé et l'intégrité des écosystèmes de la planète ». Il importe toutefois de distinguer ces deux notions. Un écosystème en bonne santé assure le recyclage de l'énergie et des nutriments ; il maintient ses fonctions essentielles de production, de consommation, et de décomposition ; il s'adapte aux effets à long terme des perturbations naturelles. Il est capable de « s'auto-renouveler » et, malgré les stress, de conserver sa résilience, sa diversité et sa productivité, attributs dont dépend une utilisation durable de ses services par la société. Pour sa part, la notion d'intégrité écologique renvoie à des états de référence qui, supposés indemnes d'interventions humaines significatives, fournissent une base d'évaluation des écosystèmes actuels. Bref, les deux notions se complètent : la santé évalue l'aptitude des écosystèmes à délivrer une gamme acceptable de services, l'intégrité procure un étalon de mesure pour cette évaluation.

Cette distinction se précise quand on replace la notion de santé écologique le long d'un gradient, celui de l'influence humaine sur les milieux aquatiques (figure 2.1). Le problème revient à identifier le seuil séparant les conditions de

« bonne santé » des conditions de « mauvaise santé ». Où placer ce seuil ? Selon quels critères ? Quand la dégradation de la santé du système devient-elle irréversible ? Quand est-elle ressentie comme intolérable par le public ?

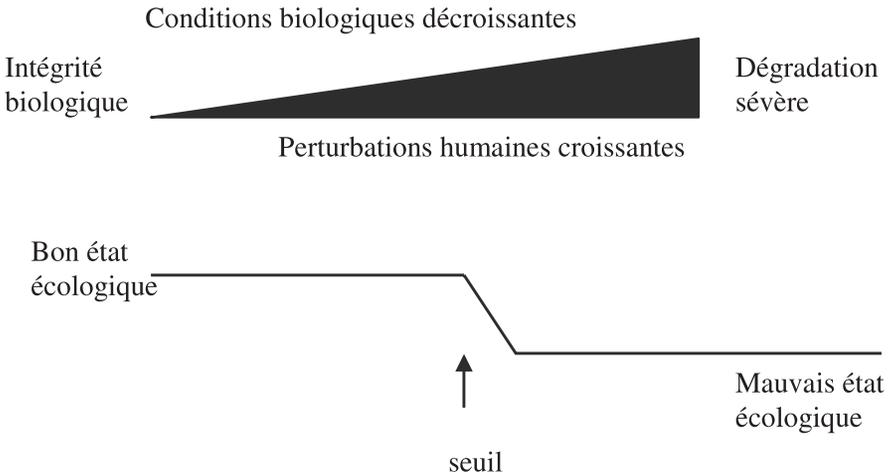


Figure 2.1

État de santé d'un écosystème aquatique (en bas) en fonction d'une influence humaine perturbatrice croissante (en haut). Les systèmes peu perturbés par les activités humaines conservent une certaine intégrité biologique. Avec l'augmentation des perturbations, la santé de l'écosystème s'altère soudainement au-delà d'un certain seuil (d'après Karr et Chu, 1999).

L'identification objective de ce seuil se heurte à la diversité des perceptions de la bonne santé des lacs et des rivières : celles des agriculteurs, des ingénieurs, des ménagères, des pêcheurs, des protecteurs de la nature diffèrent les unes des autres. Elle se heurte en outre à la diversité des méthodes utilisées par les scientifiques pour questionner la nature. On accepte généralement l'idée que : 1) les activités humaines ne doivent pas altérer la capacité d'une zone donnée à soutenir durablement les biens et les services fournis par cette zone, et que, 2) elles ne doivent pas non plus dégrader, par répercussion, d'autres zones que celle considérée, ce qui implique une vision de l'état des eaux continentales élargie à l'ensemble des bassins versants. En fait, l'identification des seuils entre bonne et mauvaise santé écologique est d'autant moins subjective qu'elle s'appuie sur une surveillance biologique rigoureuse des écosystèmes aquatiques.

Comment définir un écosystème de référence ? Souvent, aucun site n'y correspond vraiment, aucun ne peut exprimer à lui seul tous les attributs de l'intégrité écologique, ni ses états successifs. L'identification d'un écosystème de référence s'appuie donc sur de multiples sites et fait appel à des traits relevés antérieurement aux dommages subis, ou caractéristiques d'autres sites semblables moins dégradés. On tente ainsi de dégager les traits physicochimiques majeurs « naturels », la périodicité des événements perturbateurs « normaux », certains aspects

de la biodiversité comme la composition spécifique et la structure des communautés. Tout ceci demande de l'expérience et du jugement, et ne va pas sans discussions, ni sans recherches.

1.2 Surveillance biologique des eaux

La surveillance biologique de l'état des écosystèmes conditionne leur protection, en eau douce comme ailleurs. Cette surveillance porte sur des indices dits « multimétriques » car ils s'appuient sur plusieurs attributs — ou métriques — pour évaluer l'état d'un lac ou d'un secteur de rivière. Les bonnes métriques sont celles qui reflètent clairement les réponses biologiques aux activités humaines : elles varient de manière prévisible en fonction de ces activités ; elles réagissent à un ensemble et non à un type particulier de stress ; elles permettent de distinguer les changements provoqués par les activités humaines du « bruit de fond » des variations naturelles.

Le choix de ces métriques suppose une bonne connaissance de l'histoire naturelle des milieux aquatiques. Il s'agit en effet de disposer d'indices réellement liés à la vie aquatique et susceptibles d'orienter les gestionnaires vers de bonnes décisions, tout en étant compris par le public. Pour les cours d'eau, une dizaine de métriques ont été proposées, par exemple sur les poissons (tableau 2.1). D'autres ont aussi été développées, sur les macro-invertébrés, les algues et les végétaux vasculaires. Regroupées en indices, ces métriques permettent un

Nombre d'espèces natives
Nombre d'insectivores de fond à courant rapide
Nombre d'insectivores de pleine eau
Nombre d'insectivores de fond à courant lent
Nombre d'espèces intolérantes
Abondance relative des individus d'espèces tolérantes
Abondance relative d'omnivores
Abondance relative d'insectivores
Abondance relative de top carnivores
Abondance relative d'individus malades

Tableau 2.1

Exemple de métriques relatives aux poissons, testées et utilisées dans des indices multimétriques d'intégrité biologique.

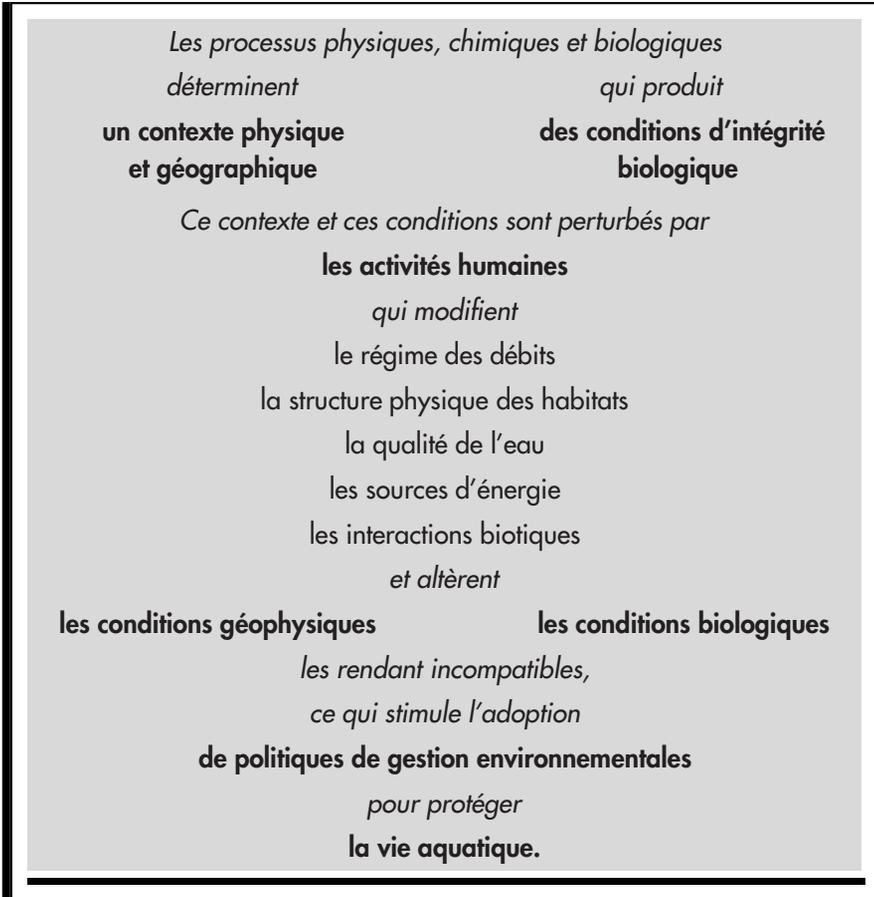
diagnostic des effets des activités humaines à divers niveaux d'échelles (individu, population, communauté, écosystème, paysage). Leur précision dépend des progrès de nos connaissances quant aux espèces présentes, aux états physiologiques, aux données démographiques, aux structures trophiques, au recyclage des nutriments et des flux d'énergie.

La surveillance biologique de l'état des eaux continentales s'insère donc dans une logique qui conduit à protéger la vie aquatique en référence à des conditions d'intégrité biologique (tableau 2.2). Dans cette logique, les sources d'altération concernent :

- le régime des débits (crues et étiages en décalage par rapport aux cycles de vie des organismes, prélèvements d'eau excessifs) ;
- la structure physique des habitats (recalibration des rivières, sédimentations accrues de frayères, diminution du bois mort immergé, destruction de la végétation riveraine) ;
- la qualité de l'eau (eaux plus chaudes, plus troubles, moins oxygénées, diversement contaminées) ;
- les sources d'énergie (apports de matière organique) ;
- les interactions biotiques (processus de compétition, de prédation, de mutualisme, de parasitisme).

La directive cadre européenne a incité à intensifier les efforts en vue d'évaluer la qualité biologique des cours d'eau, notamment en France avec l'amélioration des indices couramment utilisés sur les macro-invertébrés, les diatomées ou les poissons. À l'échelle européenne, le système AQEM (Aquatic Quality Evaluation Method), récemment mis au point, prend en compte une grande diversité de situations et s'appuie sur 9 557 espèces de macro-invertébrés, dans une approche multisite et multimétrique (Hering *et al.*, 2004). Ce système vise à classer les tronçons de cours d'eau en cinq classes de qualité, tout en identifiant les causes possibles de dégradation.

L'état écologique d'un cours d'eau évalué à partir des espèces est-il identique à celui évalué à partir des genres ou des familles ? Autrement dit, l'indice de qualité attribué à un site change-t-il quand on extrapole des métriques calculées au niveau spécifique à d'autres niveaux taxinomiques ? Les travaux récents conduisent à répondre oui à cette question : les évaluations se révèlent moins précises en passant du niveau spécifique aux niveaux taxinomiques plus élevés. D'où l'intérêt du choix des espèces comme indicateurs biologiques, et la nécessité de l'expertise dans le domaine de la systématique.

**Tableau 2.2**

Logique d'une surveillance biologique des eaux continentales tenant compte des relations entre les différentes variables en cause (d'après Karr et Chu, 1999).

1.3 Perturbations naturelles et provoquées

Le nombre de grandes crues risque d'augmenter avec le changement climatique et l'avènement probable de pluies hivernales extrêmes, par exemple en Europe du Nord et en certaines régions de l'Asie du Sud (Palmer et Räsänen, 2002). Les habitants du Bangladesh, dans la plaine inondable de trois grands fleuves, vivent déjà une situation paroxystique : des millions d'entre eux ont été déplacés par des crues désastreuses, auxquelles s'ajoutent des périodes de sécheresse et la recrudescence de maladies liées à l'eau.

Il est difficile de distinguer la part naturelle de ces perturbations de celle provoquée par les activités humaines. En principe, les perturbations naturelles renouvellent les écosystèmes : elles sont indispensables au maintien de leur intégrité, au point que l'absence de perturbation naturelle est elle-même considérée comme une perturbation, par exemple dans le cas de la régularisation du régime des débits d'une rivière. Peut-être peut-on souligner que les perturbations provoquées par les activités humaines diffèrent de celles susceptibles de se produire dans les conditions naturelles quant à leur type, leur fréquence, leur expansion ou leur degré de prévisibilité : beaucoup de perturbations subies par les écosystèmes aquatiques s'écartent aujourd'hui des normes établies sur l'histoire du dernier millénaire (Naiman *et al.*, 2005).

La notion d'événement extrême s'avère aussi difficile à définir. D'abord, ces événements sont divers : certains, relativement soudains et courts, agissent par pulsations (une crue), d'autres apparaissent aussi soudainement mais se prolongent dans le temps, exerçant une pression continue (une sédimentation consécutive à un effondrement de terrain), d'autres encore voient leurs effets s'aggraver avec le temps (une sécheresse). Ensuite, les espèces peuvent elles-mêmes réagir différemment à une même perturbation. Enfin, entre en jeu une perception sociale, variable dans l'espace et dans le temps, de tout événement perturbateur.

Il est encore plus délicat de prévoir les réponses des écosystèmes aux perturbations anthropiques. Ces réponses n'apparaissent souvent qu'après un temps de latence plus ou moins long, plusieurs années s'avérant nécessaires pour observer, par exemple, les effets d'un dépôt acide, d'une espèce introduite ou d'une pollution des eaux souterraines (encadré 2.2). Aux questions posées par l'existence de ces temps de latence s'ajoutent celles liées à l'accumulation des impacts : les effets s'ajoutent-ils les uns aux autres de façon linéaire, s'amplifient-ils, introduisent-ils des seuils plus sévères ? Au total, ces temps de latence et ces effets cumulatifs compliquent singulièrement la prévision des trajectoires à venir des écosystèmes aquatiques, d'autant plus que ces derniers intègrent les événements, des plus habituels aux plus extrêmes, qui se déroulent sur l'ensemble de leurs bassins versants.

Comment accompagner les effets du changement climatique sur les écosystèmes aquatiques continentaux ? Cette tâche s'avère difficile car ces systèmes sont très sensibles aux élévations de température, dans leur fonctionnement comme dans leur composition spécifique. Et leurs espèces sont particulièrement vulnérables aux modifications des régimes d'écoulement. De plus, les effets du changement climatique s'ajoutent, par exemple, aux dégradations de la qualité des eaux. Il s'avère donc nécessaire d'adapter les méthodes de suivi de l'état des eaux aux conséquences du changement climatique, tout en minimisant les prélèvements d'eau souterraine et les effets du fonctionnement des barrages, en réduisant les charges en nutriments, et en maintenant des boisements riverains.

Encadré 2.2

Échanges à l'interface entre eaux de surface et souterraines

Janine Gibert, université Claude Bernard Lyon 1

Depuis une vingtaine d'années l'interface eaux de surface/eaux souterraines a fait l'objet de diverses études écologiques (Gibert *et al.*, 1997). Il a été démontré que les échanges (physiques, chimiques et biologiques) au niveau de la zone d'interface jouent un rôle majeur dans la régulation des flux de nutriments circulant dans les cours d'eau et de la biodiversité globale des systèmes aquatiques. Deux exemples permettent d'illustrer ces recherches.

1. Effets des aménagements des grands fleuves

L'interface entre les eaux de surface et les eaux souterraines correspond à une zone d'échanges privilégiés. Les communautés interstitielles, assemblages faunistiques à l'interface entre les eaux de surface et les eaux souterraines, jouent un rôle majeur dans la dynamique de ces échanges. En milieu fluvial, elles apparaissent comme de véritables « descripteurs du fonctionnement », intégrant les modifications des conditions de milieu sous l'effet des aménagements. Par exemple, les recherches effectuées sur le Haut-Rhône ont montré que la diversité des traits biologiques des espèces, en particulier les catégories trophiques, répondaient aux modifications de la qualité et de la quantité des nutriments reçus par le milieu interstitiel ; de même, les modes de déplacement des espèces traduisent les possibilités d'accès aux annexes fluviales, et les différentes classes de taille rendent compte des modifications des interstices et donc de l'habitabilité du milieu.

2. Protection des eaux souterraines en milieu urbain

Souvent placés dans les plaines alluviales des grands fleuves, les ensembles urbains concentrent les flux (eau, polluants et nutriments) vers les nappes phréatiques utilisées par ailleurs comme source d'eau potable. D'où l'intérêt du rôle de filtre naturel joué par la zone non saturée des aquifères dont les premiers centimètres filtrent les métaux lourds et les hydrocarbures. Des organismes comme les oligochètes, en multipliant leurs galeries, augmentent les échanges entre l'eau libre et les sédiments, et stimulent les processus de dégradation de la matière organique. L'épaisseur de la zone non saturée apparaît ainsi comme un paramètre prépondérant qui module les effets de l'infiltration des eaux pluviales et permet une meilleure protection des eaux souterraines.

Les échanges entre les eaux superficielles et souterraines, notamment à l'échelle européenne, font l'objet de divers programmes d'études. Ces programmes tentent d'estimer la biodiversité aquatique souterraine, et son rôle dans le fonctionnement, tant des écosystèmes aquatiques souterrains que de leurs interfaces avec les milieux de surface. Leur objectif est d'élaborer des plans d'action visant à intégrer la biodiversité souterraine dans les politiques de conservation et de gestion de l'environnement. C'est le cas par exemple du programme européen PASCALIS (Protocol for the Assessment and Conservation of Aquatic Life In the Subsurface)⁴ qui définit des recommandations à intégrer : (1) dans la directive cadre sur l'eau (considération de la ressource en eau souterraine comme un milieu vivant, introduction pour les eaux souterraines du statut de « bon état écologique », proposition d'indicateurs d'échanges entre eaux de surface et eaux souterraines) et (2) dans la directive habitat (protocoles pour définir des espèces et des sites prioritaires pour la conservation à l'échelle de l'Europe).

1.4 Le « capital nature »

Les écosystèmes aquatiques représentent un capital nature, source de bénéfices pour la société. Ils sont susceptibles de rendre des services dont l'évaluation est difficile car ils ne sont pas pris en compte dans les analyses économiques classiques (tableau 2.3).

En 1997, Costanza *et al.* évaluèrent le « prix » des services écologiques pour l'ensemble de la planète à une valeur à peu près égale au PNB global de l'époque, 18 % de cette valeur revenant aux eaux continentales. Cette évaluation déclencha une controverse, dans la mesure où les extrapolations impliquées ne prenaient pas en compte la façon dont varie la demande des services considérés et où certaines méthodes utilisées pour évaluer ces services sont contestables. En outre, il n'était pas tenu compte des bénéfices liés à certaines transformations des milieux naturels. Un écosystème peut en effet délivrer des services substantiels — éventuellement différents — après transformation intentionnelle. Il importe alors d'identifier les différences entre les flux de bénéfices existant avant et après transformation. En leur temps, le drainage de certains marais a largement bénéficié à l'agriculture comme à la santé humaine.

Il existe pourtant des raisons économiques pour conserver notre capital nature (Balmford *et al.*, 2002). Et la dégradation actuelle des écosystèmes aquatiques pose des problèmes de survie en de nombreuses régions de la planète.

⁴<http://www.pascalis-project.com>

Alimentation en eau agricole, industrielle et domestique.

Source de nourriture, notamment poissons.

Purification de l'eau et élimination des déchets par les zones humides.

Atténuation des effets des crues par rétention des eaux sur les bassins versants et dans les plaines inondables.

Atténuation des effets des sécheresses par recharge des aquifères à partir des eaux de surface.

Habitats variés, abris et lieux de reproduction de poissons, oiseaux et autres espèces sauvages.

Renouvellement de la fertilité des sols proches des systèmes d'eau courante.

Apports de nutriments aux deltas, estuaires et milieux marins côtiers.

Maintien des gradients de salinité des deltas et zones marines côtières, source de richesse biologique et de productivité.

Contribution à la beauté des paysages, à la qualité de la vie, ainsi qu'à des valeurs culturelles et spirituelles.

Sources de loisirs : pêche, nage, canotage, observation de la nature, parcours riverains. . .

Conservation de la biodiversité.

Tableau 2.3

Services vitaux rendus par les écosystèmes aquatiques continentaux (d'après Postel et Richter, 2003).

En ces circonstances, l'association de l'écologie et de l'économie doit livrer les bases nécessaires aux politiques d'amélioration de l'état des eaux continentales. Elle doit aussi permettre de mieux comprendre les équilibres entre les différents services rendus par les écosystèmes aquatiques, tout en précisant en quoi l'utilisation trop poussée d'un service donné entrave celle d'autres services et affecte des fonctions écologiques vitales. À cet égard, le *Rapport de synthèse sur l'évaluation des écosystèmes pour le Millénaire* cite la production de ressources halieutiques et la production d'eau douce comme deux services aujourd'hui rendus à un niveau bien inférieur aux besoins actuels, sans parler des besoins futurs⁵.

2 | La résilience des socio-écosystèmes aquatiques

Les écosystèmes en bonne santé s'adaptent aux changements de leur environnement et se réorganisent après perturbation sans perdre leurs fonctions vitales.

⁵<http://www.maweb.org>

Cette aptitude à se régénérer correspond à la résilience. Cependant, tout écosystème peut perdre cette aptitude et, suite à de fortes perturbations, s'engager vers de nouveaux états, souvent jugés indésirables. Un défi majeur pour l'aménagement des eaux continentales est de comprendre les causes de ces alternances d'états.

2.1 Alternances d'états

L'état d'un écosystème peut fluctuer pendant un certain temps autour de valeurs moyennes, selon des tendances relativement stables et prévisibles. Un régime de croisière s'établit qui, toutefois, peut s'interrompre soudainement pour faire place à un nouveau régime, à la surprise des observateurs. De telles alternances de régimes ne sont pas rares et l'un des exemples les plus connus est celui de la crise affectant les écosystèmes coralliens (Bellwood *et al.*, 2004). À aucun moment, la bonne connaissance du fonctionnement de ces écosystèmes ne permettait de prévoir leur encroûtement par des algues, et un certain recul était nécessaire pour comprendre la suite des événements à l'origine de la crise : l'exploitation plus poussée des terres a grossi les apports de nutriments au milieu aquatique, amplifiant la croissance des algues ; cette croissance a d'abord été masquée par l'action d'abondantes populations de poissons herbivores et, suite au déclin de ces populations intensément pêchées, par la prolifération d'une espèce d'oursin elle-même herbivore, cette prolifération a favorisé le développement d'un agent pathogène, la disparition des oursins et, désormais en l'absence de tout contrôle, le développement d'algues encroûtantes.

Des exemples semblables existent en milieu lacustre, notamment avec la perte de transparence en certains lacs peu profonds. Sous l'effet des apports en nutriments provenant du bassin versant, ces lacs — écosystèmes aux eaux claires abritant de nombreuses plantes submergées — voient leur concentration en nutriments augmenter, sans paraître au début affecter la clarté des eaux. Mais au-delà d'un seuil critique, la prolifération des algues du phytoplancton installe une forte turbidité qui cause la disparition des plantes submergées et des animaux associés à ces plantes. Or, quand on tente de ramener ces milieux à leur état d'origine, la réduction de la concentration en nutriments s'avère souvent insuffisante pour restaurer la clarté des eaux : cette réduction ne devient effective qu'à des concentrations nettement inférieures à celles qui marquaient le début de la disparition des végétaux submergés (figure 2.2). Le retour à une eau claire implique en effet une réduction des nutriments dans la colonne d'eau, mais aussi un arrêt des remises en suspension des sédiments du fond et le redéploiement d'un zooplancton s'alimentant à partir de phytoplancton. Ce retour peut être contrarié par la présence des poissons qui, en l'absence de plantes submergées, exercent une forte prédation sur le zooplancton, tout en remettant fréquemment en suspension les sédiments du fond.

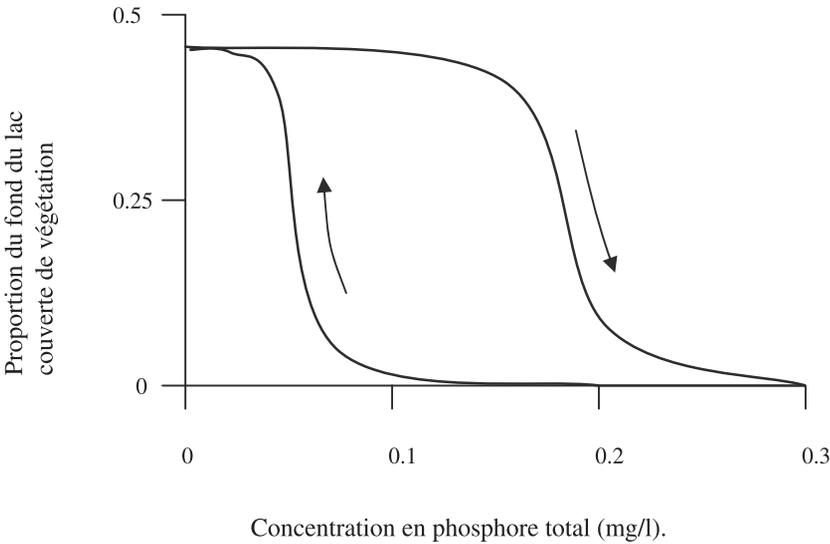


Figure 2.2

Réponse du couvert végétal du fond du lac peu profond à une augmentation, puis à une diminution de la concentration en phosphore (d'après Scheffer et al., 2001).

De telles crises peuvent survenir suite à une légère transformation des conditions extérieures, lorsque le dépassement d'un seuil critique provoque le basculement d'un état à un autre. Ainsi, un écosystème situé de par son état sur l'une des branches continues de la courbe de la figure 2.3 ne passera pas graduellement à un état qui le placera sur l'autre branche continue de la courbe : il y passera soudainement au niveau d'un seuil. Premièrement, avant d'atteindre ce seuil, un système placé sur la branche supérieure d'un état stable désirable n'évolue que faiblement, rien ne laissant prévoir à l'avance son basculement. Deuxièmement, on ne ramène pas un système d'un état indésirable à un état désirable par un simple retour au point de basculement F2, mais par un retour au point F1. Ce cycle d'hystérésis peut varier fortement d'un système à l'autre, voire au sein d'un même système : des lacs peu profonds peuvent ainsi présenter une hystérésis prononcée en réponse à un apport de nutriments, tandis que des lacs profonds réagiront de manière plus graduelle, certains présentant même des différences entre leurs zones superficielles et profondes.

Un changement environnemental progressif peut donc modifier le « domaine d'attraction » de l'état d'un écosystème, et augmenter le risque de basculement vers un autre état sous l'effet de perturbations même faibles. Ces basculements sont difficiles à gérer : d'une part, il n'existe généralement pas de signes précoces du changement d'un état désirable vers un état indésirable ; d'autre part, une fois ce changement réalisé, les restaurations s'avèrent longues et coûteuses

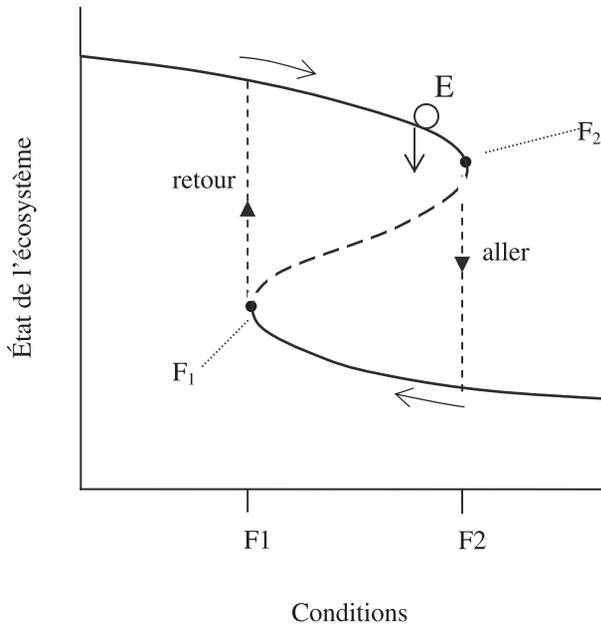


Figure 2.3

Aller et retour entre deux états stables alternatifs. Un léger déplacement des conditions d'environnement vers la droite conduit l'écosystème placé en E sur la partie supérieure de la courbe à dépasser le point de bifurcation F2 et à basculer vers l'autre état stable dans la partie inférieure de la courbe (aller). Un retour à l'état stable du haut demande à revenir aux conditions d'environnement qui prévalaient à la hauteur du point de bifurcation F1 (d'après Scheffer et al., 2001).

à cause de la présence d'hystérésis. Les efforts portent donc souvent sur la prévention des perturbations et non sur le problème sous-jacent de la perte de résilience. Or, les perturbations qui déclenchent les changements d'état — tempêtes, sécheresses, épidémies — sont difficiles à prévoir et à modifier, contrairement aux variables qui contrôlent la résilience, par exemple le mode d'utilisation des terres, le stockage des nutriments, la connectance des chaînes trophiques. La gestion de ces variables — et donc de la résilience — est probablement la meilleure façon de gérer les états désirés d'un écosystème soumis au changement des conditions de l'environnement.

2.2 Cycles adaptatifs et emboîtements d'échelles

Les systèmes naturels et humains interagissent au cours de transformations cycliques, avec des phases successives de croissance, de conservation, de destruction et de renouvellement (figure 2.4). Ces cycles sont adaptatifs, c'est-à-dire susceptibles d'innover face aux crises. Et cette capacité d'innover dépend de trois propriétés :

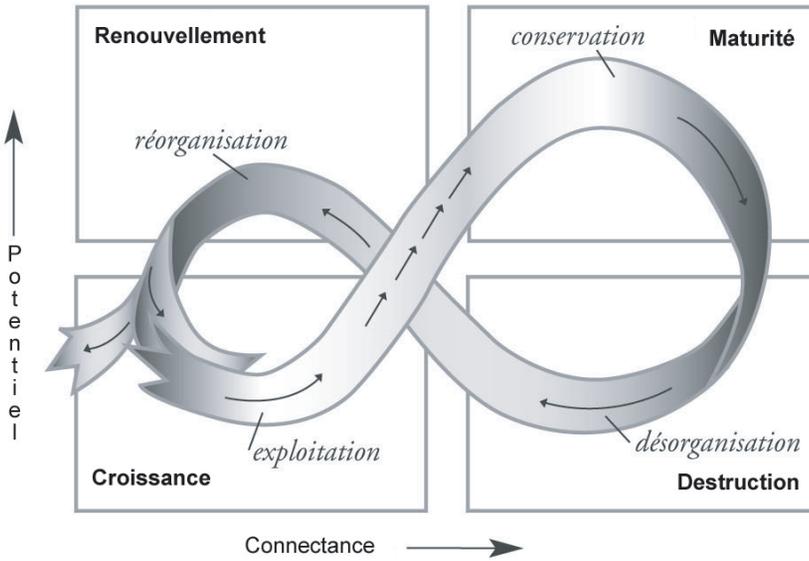


Figure 2.4

Représentation du cycle adaptatif d'un écosystème dont la trajectoire passe d'une phase d'exploitation à une phase de conservation (d'un système en croissance à un système à maturité), puis d'une phase de désorganisation à une phase de réorganisation (d'un système en destruction à un système en renouvellement). La transformation du système est d'abord lente (flèches courtes), puis rapide (flèches longues). En ordonnée, les ressources s'accumulent par accroissement de biomasse et de nutriments (potentiel). En abscisse, le degré d'organisation des variables qui contrôlent le système (connectance) augmente. La sortie du cycle, sur la gauche, figure un transfert vers un autre système (d'après Gunderson et Holling, 2002).

- le capital accumulé des systèmes considérés ;
- leur connectance, ou lien entre leurs processus de contrôle interne ;
- leur résilience, ou aptitude à s'adapter à des perturbations, y compris soudaines et imprévues.

Dans un lac, par exemple, on assiste à une accumulation du capital de biomasse végétale, en même temps que, avec la connectance, le contrôle interne exercé par l'écosystème devient plus complexe. Le système perd alors de sa souplesse et devient plus rigide, vulnérable face aux crises. Ainsi, tout cycle adaptatif se construit par une alternance entre deux périodes qui s'opposent et se succèdent : l'une de croissance et de conservation, l'autre de destruction et de renouvellement. Quant à la résilience, la capacité d'adaptation à des surprises, elle accompagne ces deux périodes par une sorte de respiration : elle se contracte lors de la lente progression de la phase d'exploitation vers celle de conservation ; elle s'épanouit lors de l'accélération qui conduit de la phase de désorganisation vers celle de réorganisation. Autrement dit, minimale

à maturité, quand le système est le plus rigide, la résilience devient maximale au renouvellement du système, quand il est le plus inventif.

L'idée de cycle adaptatif a été associée à celle de l'emboîtement des échelles pour donner naissance à la métaphore de la « panarchie » (figure 2.5). Par emboîtement des échelles on entend une organisation en poupées russes dans laquelle un système d'ordre élevé comprend des sous-systèmes qui comprennent eux-mêmes d'autres sous-systèmes, et ainsi de suite. Il en est ainsi du bassin versant d'une rivière et de ses différents sous-systèmes jusqu'au microhabitat présent dans les interstices d'un banc de galets. Cette organisation impose de prendre en compte l'ensemble de ces échelles pour comprendre les causes et les conséquences de l'état d'une masse d'eau, et en prévoir les évolutions.

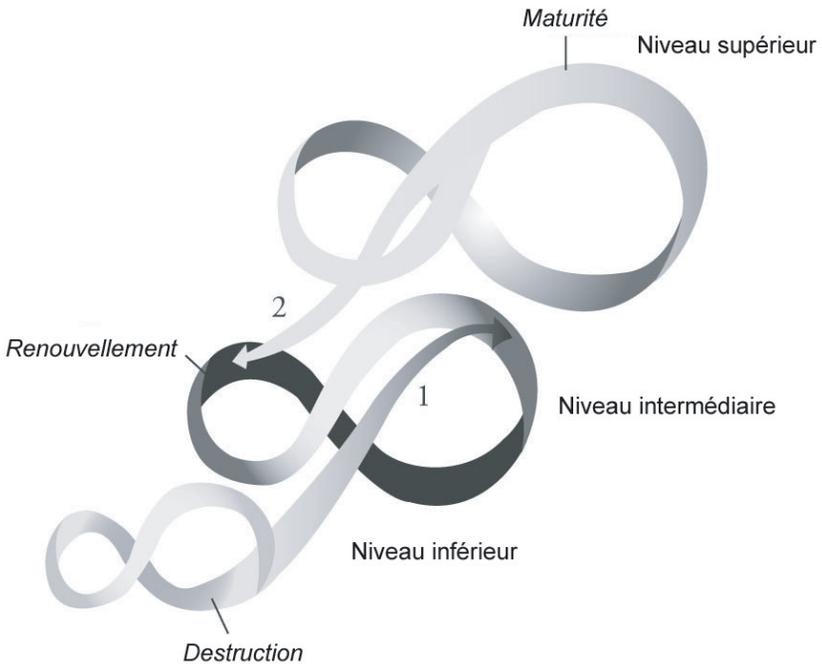


Figure 2.5

Organisation hiérarchique des systèmes écologiques. En (1), la phase de destruction du niveau d'échelle inférieur, plus petit et plus rapide, se répercute sur la phase vulnérable du niveau intermédiaire (par exemple, le déversement d'un produit toxique dans une roselière contamine l'ensemble d'un écosystème lacustre). En (2), le renouvellement de ce même niveau intermédiaire subit l'influence du potentiel accumulé et stocké dans le niveau d'échelle supérieur, plus grand et plus lent (par exemple, un massif forestier modère les variations de température des ruisseaux qui le drainent) (d'après Gunderson et Holling, 2002).

L'état des eaux continentales change donc sans cesse, tantôt progressivement, tantôt soudainement. Il change au sein de configurations ressenties les unes comme désirables, les autres comme indésirables. Et l'aptitude d'un système écologique à se maintenir dans une de ces configurations dépend de sa

résilience. Or, cette résilience change également : au fil des phases que parcourt chaque niveau d'échelle d'un système écologique, au fil des connexions possibles d'un niveau d'échelle à l'autre, de haut en bas, comme de bas en haut. Et donc, tout état d'une masse d'eau s'inscrit dans une dynamique de systèmes écologiques emboîtés, une dynamique qu'il faut prendre en compte pour orienter un système donné vers une configuration désirable ou, à l'inverse, pour l'écartier d'une configuration indésirable.

2.3 Notion de socio-écosystème

Les sociétés humaines utilisent les écosystèmes aquatiques et, par suite, les modifient, localement et globalement. En retour, elles sont capables d'ajuster leurs usages aux modifications qu'elles perçoivent. Cette interaction dynamique caractérise ce qu'il est convenu d'appeler des socio-écosystèmes (Walker *et al.*, 2002). La résilience de ces socio-écosystèmes passe, notamment, par l'aptitude des sociétés humaines à tirer les leçons d'expériences passées pour anticiper et élaborer des plans pour l'avenir. Concernant les eaux continentales, cette aptitude conduit à des interrogations :

- Comment tel groupe social réagit-il aux changements du milieu naturel qu'il utilise ?
- Comment parvenir à une utilisation équitable et durable des milieux naturels ?
- Quelles structures sociales favorisent l'émergence de solutions à la dégradation des milieux naturels ?

Ces questions relèvent des sciences de l'homme et de la société, et le grand défi posé à la gestion des socio-écosystèmes est justement d'articuler ces sciences avec celles de la nature, dans un souci de partage avec les gestionnaires et les décideurs de politiques publiques. Une utilisation durable des eaux continentales suppose en effet d'intégrer les dynamiques des écosystèmes aquatiques et celles des structures sociales qui relient les utilisateurs de ces écosystèmes.

En quel état de santé souhaitons-nous maintenir telle ou telle rivière ? Une certaine dégradation est-elle acceptable ? Si oui, que doit-on sacrifier ? Si non, quel niveau de restauration viser ? Les réponses à ces questions dépendent des objectifs qu'une société fixe à l'usage de ses rivières, mais aussi de critères choisis pour définir divers états possibles. L'approche proposée par la directive cadre européenne s'appuie sur des critères qui permettent de classer les cours d'eau et

autres pièces d'eau en référence à des conditions « naturelles » ou « non perturbées ». Elle permet de fixer des standards aux projets d'aménagement, et ouvre ainsi un champ nouveau de collaboration aux scientifiques et aux gestionnaires.

3 | Gérer la résilience dans un environnement fluctuant

Les biens et les services délivrés par les eaux continentales dépendent de variables à évolution lente, sujettes à des changements soudains. Ainsi, l'état d'un lac dépend des quantités de phosphore présentes dans le sol du bassin versant et dans les sédiments lacustres. Tant que ces quantités ne dépassent pas un seuil critique, la teneur de l'eau en phosphore est contrôlée par des processus d'assimilation et de décomposition, et le lac reste dans une configuration qui permet d'utiliser ses services. Le dépassement du seuil critique entraîne un changement de configuration : le système se retrouve placé dans une nouvelle dynamique qui ne permet plus d'utiliser ses services. Du point de vue de la gestion, il importe d'identifier les variables qui, à l'instar du phosphore, peuvent conduire au dépassement de seuils critiques.

L'identification de ces variables ne peut se concevoir sans référence à la notion d'échelle (§ 3.1). Parmi ces variables, la biodiversité apparaît comme une condition fondamentale de la résilience des socio-écosystèmes aquatiques (§ 3.2), d'autant plus que la mondialisation suscite des événements d'ampleur inédite, comme les invasions d'espèces exotiques (§ 3.3). Gérer cette résilience exige une réflexion sur les avenir possibles des écosystèmes aquatiques (§ 3.4).

3.1 De l'importance des échelles d'espace et de temps

Les eaux continentales peuvent être perçues à plusieurs niveaux d'échelles, dans l'espace et dans le temps. Elles peuvent aussi être perçues à divers niveaux d'organisation biologique — individus, populations, communautés, écosystèmes. Aucun de ces niveaux n'est *a priori* meilleur que les autres, mais à chaque niveau correspondent certaines questions, certains outils et méthodes, et certaines conclusions possibles.

Ainsi, pour les facteurs de la distribution des végétaux fixés dans un lac : l'échelle continentale privilégie le rôle des facteurs climatiques (irradiance annuelle, température moyenne de l'air, longueur de la saison de croissance), l'échelle régionale privilégie le rôle des facteurs géomorphologiques (chimie des eaux, pentes des versants), l'échelle locale du lac privilégie la profondeur de

l'eau, substitut de la pénétration de la lumière reçue. . . Les causes de la distribution de ces végétaux dépendent ainsi de l'échelle considérée, et une interprétation valable à une échelle pourra s'avérer inexacte à une autre. La difficulté est d'associer tout en les distinguant les différents niveaux d'échelles considérés, et de communiquer les résultats obtenus explicitement dans un contexte d'échelle. Car la confusion entre échelles est souvent source de malentendus, interdisant de parvenir à des réponses opérationnelles aux questions posées.

Concrètement, la relation entre échelles se pose en ces termes : dans quelle mesure une modification locale d'un écosystème aquatique peut-elle influencer un niveau régional, voire continental ? Autrement dit, le dysfonctionnement d'un écosystème aquatique est-il susceptible d'influencer de plus vastes niveaux d'échelles ? Il semble possible de répondre affirmativement à cette question. Dans le domaine des eaux courantes, des impacts locaux peuvent se répercuter à des milliers de kilomètres, en d'autres milieux. Ainsi, les barrages du Mississippi et de ses affluents, en réduisant les débits du fleuve, ont annulé sa capacité de transport de nutriments, ce qui provoque le déclin des stocks de poissons et de crustacés dans le golfe du Mexique, et des effets semblables peuvent être prévus à propos du barrage des Trois Gorges sur la mer de Chine. Dans le domaine des eaux stagnantes, la décomposition de la biomasse associée aux réservoirs hydroélectriques peu profonds des climats chauds rejettera des quantités de gaz carbonique telles que ces réservoirs pourraient être responsables de près de 15 % des émissions de gaz à effet de serre, étant donné les projets de construction en cours.

3.2 La biodiversité, condition de la résilience

La biodiversité joue un rôle majeur dans le maintien de la résilience des écosystèmes. Ce rôle tient à l'existence de groupes fonctionnels, c'est-à-dire d'ensembles d'espèces aux fonctions écologiques similaires. Par exemple, parmi les invertébrés herbivores du fond d'un cours d'eau, certains broutent les algues de la surface des pierres, d'autres filtrent celles qui dérivent avec le courant, d'autres déchiquettent les feuilles tombées depuis les rives, s'attaquent aux tiges des macrophytes, etc.

Après perturbation, un écosystème se réorganiserait d'autant mieux qu'il renferme divers groupes fonctionnels et, au sein de chacun de ces groupes, diverses espèces qui, tout en accomplissant une même fonction, répondent différemment aux perturbations. Ainsi, dans un lac, la résilience de la production primaire aux variations de température et d'éclairement dépend de la présence d'un nombre élevé d'espèces d'algues qui, parce qu'elles répondent différemment aux diverses combinaisons de température et d'éclairement, se remplacent au fil des saisons et maintiennent une production végétale pendant une grande partie

de l'année. La diversité représente donc une sorte d'assurance face au risque (Loreau *et al.*, 2001), et son érosion peut rendre plus vulnérables certaines fonctions des écosystèmes. Dans une situation d'incertitude, une gestion écologique des milieux aquatiques s'attachera à maintenir les groupes fonctionnels critiques — ceux qui comprennent peu d'espèces. La conservation de la biodiversité ne relève donc pas seulement de raisons éthiques, esthétiques ou psychologiques ; elle relève aussi de raisons pragmatiques.

Or, le nombre des espèces vivant en eaux continentales diminue d'une manière préoccupante. Globalement, au moins 34 espèces de poissons (7 depuis 1970) ont disparu au cours du XX^e siècle, et ce nombre doit être probablement doublé pour tenir compte des espèces disparues depuis le début du XIX^e siècle. Au niveau régional, de grandes extinctions ont frappé les eaux continentales, plus que d'autres milieux, au cours du XX^e siècle. On estime ainsi à plus de 60 % le taux de disparition des cichlidés endémiques dans le lac Victoria, suite à l'introduction de la perche du Nil, jointe à une pression de pêche, à une sédimentation et à une eutrophisation de plus en plus importantes (encadré 2.3). Aux États-Unis, le bassin versant de l'Alabama a vu disparaître 34 de ses 120 espèces de poissons avec la multiplication des barrages sur ses cours d'eau.

Encadré 2.3

Les systèmes aquatiques africains : des modèles pour étudier l'évolution et les conséquences des changements climatiques

Christian Lévêque, IRD et Muséum national d'histoire naturelle

Les systèmes aquatiques africains constituent d'excellents modèles pour appréhender le fonctionnement à long terme des écosystèmes et la dynamique de la biodiversité aquatique. Les situations écologiques y sont en effet très contrastées, depuis les lacs profonds dont l'existence est très ancienne jusqu'aux immenses plaines d'inondation associées aux grands fleuves, dont l'existence saisonnière dépend fortement des fluctuations climatiques.

Les Grands Lacs d'Afrique de l'Est (Tanganyika, Malawi) vieux de plusieurs millions d'années sont caractérisés par une faune hautement endémique de poissons et d'invertébrés. Ce sont de véritables laboratoires naturels pour l'étude des mécanismes de l'évolution et des processus de spéciation, où la co-évolution des espèces avec leur environnement a permis une grande diversification des réseaux trophiques. Ce sont également des observatoires privilégiés des conséquences des perturbations anthropiques : le fonctionnement écologique du lac Victoria a été profondément modifié

par l'eutrophisation, la pêche excessive, les pollutions chimiques, et les introductions d'espèces, notamment celle la perche du Nil ou capitaine (*Lates niloticus*) et de la jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*).

Les grands fleuves de l'Afrique nord-tropicale (Niger, Chari, Sénégal, et Nil) ont connu quant à eux des situations climatiques contrastées au cours de l'Holocène, avec des périodes très pluvieuses et d'autres marquées par la sécheresse. La composition de leur faune ichtyologique laisse penser que de nombreux échanges ont eu lieu entre les bassins lors des épisodes humides. Les vallées fossiles du Sahara sont les témoins de fleuves puissants qui alimentaient le lac Tchad depuis l'Ennedi et le Tibesti il y a quelques milliers d'années. Même au cours du siècle dernier, la superficie du lac Tchad n'a cessé d'évoluer en rapport avec les fluctuations climatiques, et le lac a parfois été réduit à un grand marécage. Il ne comporte aucune espèce endémique, mais les peuplements ichtyologiques y sont composés en partie d'espèces adaptées aux conditions extrêmes, ce qui leur confère une certaine résilience quand on passe de conditions lacustres à des conditions palustres, et vice-versa.

Le fleuve Congo correspond à un des grands bassins fluviaux encore peu modifiés par l'homme : la densité de sa population y est restée relativement faible et aucun projet « pharaonique » n'y a encore été réalisé. De par son existence ancienne (bien avant le Miocène), il héberge une faune particulièrement riche, mal connue à cause de difficultés d'accès et menacée par un projet récurrent de détournement d'une partie des eaux du Congo vers le bassin du Tchad.

Les dynamiques à long terme des systèmes aquatiques africains et européens dépendent de facteurs différents. Les glaciations n'ont pas joué un rôle déterminant dans la mise en place de la biodiversité des systèmes aquatiques africains, mais les périodes de sécheresse peuvent avoir eu des effets dont on retrouve les traces dans la composition actuelle des peuplements (Lévêque et Paugy, 1999). Dans les deux cas, les espèces ont dû s'adapter à des changements de température et de régime des eaux. La comparaison de ces situations permet de mieux cerner les mécanismes biologiques mis en jeu par les espèces pour faire face aux changements de l'environnement. De nombreux peuplements aquatiques ont été l'objet de périodes successives d'extinction et de colonisation au cours desquelles le hasard et l'opportunité ont dû jouer un rôle essentiel. Ce qui conduit à un autre regard sur les introductions d'espèces : à long terme, ces peuplements paraissent capables d'intégrer de nouveaux immigrants.

En 2000, plus de 3 500 espèces de vertébrés et d'invertébrés liés aux eaux continentales étaient classées à haut risque d'extinction, et au moins 20 % d'espèces de poissons d'eau douce menacées de disparition (UN/WWAP, 2003). Parmi les espèces emblématiques menacées figurent des espèces aussi diverses qu'un dauphin du Yang-tseu, un canard des rivières rapides d'Amérique du Sud, l'alligator chinois, une tortue de Thaïlande, l'axolotl du Mexique, l'esturgeon commun de France et de Géorgie. . . Cette érosion de la biodiversité, souvent concomitante de destructions d'habitats, se développe sous l'influence des modes d'utilisation des terres, des invasions biologiques et du changement climatique, trois facteurs susceptibles d'agir différemment selon la latitude : les modes d'utilisation des terres surtout dans les régions tropicales, les invasions biologiques et les modes d'utilisation des terres en régions tempérées, le changement climatique en régions arctiques ou en haute altitude (Sala *et al.*, 2000).

En fait, les changements climatiques récents ont déjà affecté beaucoup d'espèces continentales, terrestres et aquatiques. On observe déjà des déplacements d'aires de répartition vers les pôles de plus de 6 km par décennie en moyenne, de même qu'une plus grande précocité au printemps (Parmesan et Yohe, 2003). En outre, le réchauffement climatique agit en synergie avec d'autres facteurs, obligeant à adopter une perspective globale pour tenter d'enrayer l'érosion de la biodiversité des milieux aquatiques. Il faut par exemple tenir compte des déforestations dont dépend le sort de la faune et de la flore de l'Amazone, du Congo et de maints fleuves d'Asie du Sud-Est, soit près de la moitié des espèces de poissons d'eau douce de la planète. Il faut aussi tenir compte des détournements des eaux dans le cadre des grands projets d'irrigation, des barrages et des canalisations qui partout fragmentent les réseaux hydrographiques. Il faut enfin voir l'érosion de la biodiversité comme une conséquence de tout un ensemble d'effets sur la physiologie des organismes vivants, leur phénologie, leur distribution géographique et leur adaptabilité, effets qui impliquent des transformations de la structure et de la composition des communautés et de nouvelles interactions entre les espèces.

Comment enrayer l'érosion de la biodiversité des eaux continentales ?

- *En protégeant sans tarder les habitats aquatiques, au-delà des réserves et des parcs, dans les milieux de la « nature ordinaire ».*
- *Et en conservant la résilience des socio-écosystèmes par une meilleure compréhension des liens entre : 1) le fonctionnement des écosystèmes et les facteurs environnementaux, 2) la société, la biodiversité et les services rendus par les écosystèmes aquatiques.*

3.3 La question des espèces envahissantes

Introduites hors de leur région d'origine, certaines espèces s'installent et prolifèrent au détriment des espèces en place. Ce phénomène n'est pas nouveau, ni dû exclusivement à l'homme, mais il a été considérablement amplifié par le développement des transports, des voyages et des échanges commerciaux au cours des dernières décennies. Et ses effets peuvent s'avérer dramatiques vis-à-vis de la santé publique, de l'économie et de l'environnement. Les invasions biologiques apparaissent aujourd'hui comme la deuxième cause d'érosion de la biodiversité, après la destruction des habitats naturels (Mack *et al.*, 2000).

Pourquoi une espèce normalement discrète dans son milieu d'origine devient-elle envahissante — souvent après un temps de latence de plusieurs années — quand introduite dans un nouveau milieu ? Première raison possible, cette espèce trouve des conditions favorables de développement sans être freinée par ses ennemis habituels, parasites, pathogènes ou prédateurs. Elle consacre donc une part plus importante de ses ressources pour croître et se reproduire dans la mesure où elle n'a plus à se défendre de ces ennemis. Les espèces envahissantes seraient ainsi des espèces pouvant exprimer leur caractère prolifique. Mais le succès d'une invasion dépend de plusieurs autres facteurs : nombre d'individus introduits, fréquence des introductions, vulnérabilité des communautés d'accueil, conditions de transport, d'établissement, d'expansion.

Parmi les effets les plus spectaculaires des invasions par des espèces d'origine étrangère, on cite souvent l'obstruction de certaines voies navigables par des plantes comme la jacinthe d'eau ou la disparition déjà évoquée d'espèces endémiques dans le lac Victoria. De même, les rats musqués et les ragondins, introduits pour leurs fourrures, creusent les berges des cours d'eau et aggravent les effets des crues, notamment en Europe centrale et méridionale. Tout aussi marquantes pour l'écologie des cours d'eau sont les colonisations de leurs berges, par exemple en région méditerranéenne par le robinier faux acacia et l'érable américain, mais aussi par des arbustes et des herbacées comme l'ambrosie, le faux-indigo, le buddleia, la balsamine géante, les jussies, la renouée du Japon, les verges d'or. En Afrique du Sud, certaines introductions d'eucalyptus et d'acacias ont été jusqu'à assécher des rivières dans la province du Cap.

Il n'est pas facile de lutter contre de telles invasions. Comment en effet identifier les attributs des espèces potentiellement envahissantes et comment prévoir les sites susceptibles d'être envahis ? L'éradication est rarement possible une fois une espèce indésirable installée et son contrôle demande des efforts longs et coûteux. En 2002, la Convention pour la diversité biologique attirait l'attention sur les priorités à respecter : d'abord, éviter les introductions, sinon éradiquer précocement, et quand cela n'a pas été possible, exercer un contrôle à long

terme. La mise en place de stratégies efficaces passe par des progrès à accomplir dans la compréhension épidémiologique des invasions, dans l'évaluation de leurs coûts directs et indirects, dans une prise de conscience par le public et les responsables politiques de leur gravité.

Faut-il proscrire l'installation de toute espèce d'origine étrangère ? La distinction entre natives et étrangères n'est pas toujours aisée : des espèces introduites il y a plusieurs siècles sont aujourd'hui naturalisées, au même titre que celles installées lors de changements climatiques datant de l'holocène. En outre, toute espèce introduite n'est pas forcément malfaisante : certaines s'avèrent capables d'assurer des fonctions écologiques manquantes sans devenir envahissantes. La plus grande vigilance s'impose cependant vis-à-vis des espèces à expansion rapide, d'autant plus que le changement climatique favorise les proliférations hors des aires d'origine.

3.4 Construire des scénarios d'avenir

Quel que soit notre niveau de connaissance, il sera toujours difficile de prévoir l'avenir des écosystèmes aquatiques. D'abord, parce qu'il s'agit de systèmes complexes, dont la dynamique dépend de conditions souvent imprévisibles sur le long terme. Ensuite, parce que ces systèmes sont étroitement couplés aux systèmes sociaux et donc soumis à des interactions qui, pour la plupart, demeurent inconnues. Telle prévision à propos de la qualité des eaux d'un bassin pourra susciter, en retour, de nouveaux comportements, et se trouver finalement démentie. Toute décision de gestion porte donc sur des systèmes complexes, aux dynamiques incertaines à moyen et à long terme. Une erreur courante est justement de sous-estimer ces incertitudes, d'ignorer les à-coups et les surprises dans les dynamiques écologiques.

La méthode des scénarios vise à identifier quels sont les avènements possibles de tel ou tel écosystème aquatique sous l'effet, par exemple, de conditions climatiques inhabituelles, d'augmentations de population, d'améliorations techniques... Elle permet de recentrer l'attention sur les discontinuités qui risquent d'accompagner toute tendance à moyen ou à long terme. Elle facilite également l'émergence d'hypothèses de travail à propos des changements à venir, en mettant en regard différents usages des écosystèmes avec leur dynamique biophysique. À cet égard, l'élaboration de scénarios par les différents utilisateurs d'un écosystème aquatique les amène à prendre conscience des conséquences possibles des décisions de gestion.

Comment améliorer notre aptitude à prévoir les dynamiques des systèmes aquatiques continentaux et, en conséquence, répondre aux changements à moyen terme des socio-écosystèmes ? Une réponse consiste à élaborer différents

scénarios possibles. Nourrir ces scénarios suppose l'existence d'observatoires pérennes, susceptibles d'associer étroitement les scientifiques, les décideurs et les gestionnaires.

4 | Prescriptions pour la santé écologique des eaux continentales

Ces dernières années ont vu se développer des recherches qui permettent en principe d'améliorer la santé écologique des eaux continentales. Les prescriptions se réfèrent : à l'environnement terrestre des eaux continentales (§ 4.1), aux besoins en eau des organismes aquatiques et riverains (§ 4.2), à l'eutrophisation des lacs et des rivières (§ 4.3), à l'aménagement des zones humides et des ripisylves (§ 4.4). Toutes ont des implications socio-économiques fortes, illustrant le bien-fondé de l'assimilation des eaux continentales à des « socio-écosystèmes ».

4.1 Prendre en compte l'environnement terrestre des eaux continentales

Les eaux continentales s'inscrivent dans un environnement terrestre dont elles sont indissociables. Non seulement leur fonctionnement écologique et biogéochimique dépend de cet environnement, mais ce dernier peut subir de leur part un effet en retour déterminant. Cette réalité conduit à l'idée d'une gestion de l'eau coordonnée avec les projets de territoire, l'eau entretenant des relations étroites et complexes avec les écosystèmes terrestres (encadré 2.4). Elle conduit aussi à la notion d'hydro-écorégion proposée pour regrouper des écosystèmes aquatiques réagissant de façon similaire aux facteurs de l'environnement (Wasson *et al.*, 2005). Les approches d'écologie du paysage, privilégiant les relations entre organisation de l'espace et fonctionnement écologique, prennent ici tout leur sens (Décamps, 1996).

Les recherches engagées en 1963 dans la forêt expérimentale de Hubbard Brook, New Hampshire, ont révélé la complexité, l'ampleur et la durée des conséquences des déboisements sur les cours d'eau (Likens et Bormann, 1995). Elles ont par ailleurs démontré l'intérêt des stations de terrain équipées pour observer quels étaient les effets des changements d'utilisation des terres sur les écoulements. Mais il reste encore à quantifier ces effets, à diverses échelles, en régions tropicales dont les surfaces forestières diminuent, comme en Europe où elles ne cessent d'augmenter depuis deux siècles. En France, par exemple, cette surface dépasse actuellement le quart du territoire métropolitain, soit presque deux fois plus qu'en 1800, avec des conséquences à préciser sur les températures des eaux de surface, les transports des sédiments, les charges en nutriments. . .

Encadré 2.4

Eaux et territoires : enjeux

Daniel Terrasson, Cemagref

Les communautés humaines se sont développées en fonction des ressources qu'elles pouvaient exploiter. L'eau a ainsi joué un rôle structurant majeur : pas d'implantation un tant soit peu pérenne sans une source d'eau potable, pas de gibier, d'animaux domestiques qui ne puissent s'abreuver. Les civilisations avançant, l'humanité a progressivement appris à exploiter le pouvoir de dilution de l'eau, sa force hydraulique, ses propriétés calorifiques. Les réseaux de transports se sont localisés autour des voies d'eau : plus grande facilité du transport fluvial, sites de vallées plus propices à l'établissement des voies de communication... L'artisanat puis l'industrie y ont puisé l'énergie, les eaux de lavage, de refroidissement. Même si les progrès de la chimie et de la technologie ont permis de découvrir des produits de substitution, l'eau n'en a pas moins gardé un rôle majeur y compris dans certaines industries de pointe comme par exemple les centrales nucléaires. Le simple examen d'une carte de France montre combien le développement s'est structuré en fonction du réseau hydrographique.

L'eau a également contribué à structurer l'occupation de l'espace chaque fois qu'elle pouvait constituer directement (submersions plus ou moins occasionnelles, zones désertiques) ou indirectement (insalubrité des zones humides) un facteur limitant. Très tôt, les sociétés ont cherché à se soustraire à ces contraintes de localisation, à l'excès ou à la pénurie d'eau. L'eau a eu en particulier de très fortes implications dans la culture et la technologie urbaine, ce dont témoignent les travaux archéologiques dans la vallée de l'Indus (-2400 av. J.-C.). De nombreux développements régionaux n'ont été possibles que grâce à la construction d'aqueducs romains, au percement de canaux de liaison entre réseaux hydrographiques, à l'assèchement de marais, à la mise hors d'eau de vastes polders, au forage dans les nappes profondes, à la construction d'usines de dessalement d'eau de mer. L'ampleur de ces transformations a pu conduire, encore de nos jours, à des confrontations entre États.

Cependant, depuis quelques décennies, les sociétés occidentales voient leurs économies se dématérialiser. L'agriculture, grosse consommatrice d'eau, perd son poids économique et social, y compris dans les territoires ruraux. Les moteurs du développement ne sont plus basés sur l'exploitation de ressources naturelles, mais sur le capital humain, les effets d'agglomérations, les nouvelles technologies de la communication et de l'information. L'Europe se structure autour de grands axes urbains, dont certains peuvent certes prolonger les principaux réseaux hydrographiques (axe Rhin-Rhône) mais

en dépassant largement leur emprise. D'une façon générale, le territoire en tant qu'unité d'organisation de la société, tend à s'asseoir sur un espace de plus en plus étranger aux logiques naturelles, géomorphologiques ou écologiques. La confrontation eaux-territoires soulève alors deux types d'enjeux.

1) Au niveau politique, la prise de conscience est d'autant plus forte qu'il ne peut y avoir de gestion de l'eau sans coordonner celle-ci avec les projets de territoire. En France, la nécessaire solidarité entre usagers est certes bien ancrée dans les esprits depuis la création des agences financières de bassin devenues agences de l'eau. Mais ces dernières, institutions sectorielles, ne permettent pas la mise en débat des modes de développement, des choix de planification et d'aménagement du territoire, et de leurs conséquences à plus ou moins long terme sur la ressource en eau. La nouvelle directive cadre européenne sur l'eau ne règle pas cet aspect et, dans sa séance du 25 juin 2004, l'Académie de l'eau qualifiait le territoire de « grand absent » de cette directive. Ce point de vue n'est sans doute pas partagé par tous ; il souligne cependant l'idée que, dans le champ de l'environnement notamment, nombre de politiques publiques actuelles portent sur des enjeux qualitatifs qui croisent l'organisation sectorielle d'une administration héritée d'une société du besoin. Le véritable enjeu de la pollution des nappes par l'agriculture en Bretagne n'est-il pas *in fine* celui du choix entre deux modes de développement : l'un axé sur la filière agricole, l'autre sur la valorisation des atouts environnementaux ? Des coordinations s'avèrent de plus en plus nécessaires entre des niveaux imbriqués de responsabilité spatiale et sectorielle à l'échelle du territoire.

2) Au niveau scientifique, il s'agit de comprendre les interactions multiples entre une dynamique économique et sociale et les caractéristiques quantitatives et qualitatives d'une ressource naturelle. Cela pose notamment des questions fortes en termes d'emboîtement d'échelles spatiales (géographiques/hydrologiques/sociologiques/politiques) et temporelles dans un contexte d'incertitude sur l'évolution des politiques économiques et du climat. L'eau n'est pas seulement une ressource, c'est aussi la composante d'un milieu naturel qui entretient des relations complexes avec les écosystèmes terrestres. Sur un plan opérationnel, cela suppose non seulement des approches interdisciplinaires, mais aussi le décloisonnement de communautés scientifiques isolées dans leurs thématiques et qui ne partagent pas les mêmes concepts.

Globalement, l'irrigation agricole soustrait les plus grandes quantités d'eau aux systèmes aquatiques continentaux. Elle est responsable, les besoins des élevages compris, de plus de 70 % des extractions d'eau du milieu naturel

et conduit, suivant les bassins, à des pertes d'eau, des pollutions chimiques, la salinité des terres, ou l'épuisement des aquifères souterrains. Autre aspect de l'utilisation des terres, l'urbanisation croissante affecte elle aussi lourdement les écosystèmes aquatiques continentaux, particulièrement quand l'intégrité des zones d'interface n'est pas respectée, par exemple entre les eaux de surface et les eaux souterraines (encadré 2.2).

Les ripisylves jouent un rôle d'interface qu'il convient aussi de mieux apprécier (Naiman *et al.*, 2005). Forêts (*sylva*) des rives (*ripa*), elles concernent des linéaires importants le long des réseaux hydrographiques et s'étalent plus ou moins largement de part et d'autre des cours d'eau : tantôt en simples boisements de berges au voisinage des lits mineurs, tantôt en véritables forêts alluviales complexes et diversifiées. Leur existence dépend de la présence d'une nappe phréatique peu profonde et d'inondations périodiques. Leur aptitude à favoriser la conservation de la biodiversité de la faune des cours d'eau est clairement établie, en zone agricole comme en zone urbaine. Elles correspondent certainement à des éléments clés des paysages aquatiques, indispensables à prendre en compte dans les opérations de conservation et de restauration.

La forêt permet-elle de gérer les ressources en eau ? Cette question se pose alors que la forêt se déploie en France. À côté d'avantages démontrés (réduction des charges en sédiments), d'autres n'ont été vérifiés que sur de petits bassins versants. Déceler les tendances, notamment à l'échelle des grands bassins, demande des observations à long terme. Et toute généralisation se heurte à la variabilité des débits d'une forêt à l'autre, en fonction du sol, de la topographie, du climat et des pratiques forestières (Lavabre et Andréassian, 2000). Quantifier l'impact de la forêt sur le cycle de l'eau reste la condition nécessaire d'une gestion intégrée des eaux et des forêts.

4.2 Prendre en compte les besoins des organismes aquatiques et riverains

Au fil du temps, les organismes aquatiques et riverains se sont adaptés à la variabilité naturelle des régimes hydrologiques de leurs régions biogéographiques. Leurs cycles de vie se déroulent en synchronie avec les crues et les étiages. Or, parfois d'une manière spectaculaire, les activités humaines ont transformé la variabilité naturelle des régimes hydrologiques, soumettant les organismes aquatiques et riverains à de nouvelles conditions. Ces derniers ne survivent pas tous, et leur capacité de survie dépend des stratégies adoptées pour s'adapter aux régimes auxquels ils étaient habitués (tableau 2.4).

Adaptation	Organismes
<i>Traits d'histoire de vie</i>	
Dissémination des graines lors de la décrue de printemps	Saules et peupliers
Rapide allongement des racines après germination	Saules et peupliers
Stade de diapause lors de la saison sèche	Plécoptères et autres insectes aquatiques
Éclosion retardée des œufs d'une partie de la ponte	Éphémères
Frai ou émergence des alevins en période de faible probabilité de crue	Poissons salmonidés
<i>Comportement</i>	
Déplacement vers des lieux abrités lors des crues	Divers invertébrés aquatiques
Œufs profondément déposés dans le substrat	Poissons salmonidés
<i>Morphologie</i>	
Enracinement important	Macrophytes aquatiques
Rejets de souches nombreux	Saules et peupliers
Forme aplatie	Divers invertébrés aquatiques

Tableau 2.4

Trois modalités d'adaptation des organismes d'eau courante aux crues et aux étiages (d'après Lytle et Poff, 2004).

Ces stratégies doivent être prises en compte pour prévoir les réactions des espèces aux modifications des régimes hydrologiques, tant en ce qui concerne l'amplitude de ces modifications que leur fréquence, leur durée, leur occurrence saisonnière, leur soudaineté (Poff *et al.*, 1997). Il est encore nécessaire de prendre en compte la prévisibilité des événements hydrologiques. Soit par exemple des crues fréquentes et de grande ampleur : si ces crues sont

prévisibles, la sélection favorise les espèces dont le cycle est synchronisé de manière à leur permettre de les éviter ; si elles sont imprévisibles, elles n'ont qu'un faible pouvoir de sélection sur le calage du cycle de vie, même si elles causent de fortes mortalités. L'espèce survit alors en évitant « de mettre tous ses œufs dans le même panier », à l'exemple de certains insectes aquatiques qui, par éclosions asynchrones décalées dans le temps, ont une chance d'éviter une éventuelle crue trop sévère. Il faut ajouter que la durée de vie d'un organisme peut aussi jouer un rôle considérable : le long d'une même rivière de montagne, un saule subira de nombreuses crues de fonte des neiges au cours de sa vie, contrairement à certains insectes aquatiques dont le développement n'excède pas quelques mois.

Ainsi les organismes aquatiques et riverains ne sont pas tous égaux devant les modifications des régimes des débits. Certains ont acquis des traits vitaux qui leur permettent d'éviter ou même d'exploiter certaines crues ou étiages sévères ; c'est le cas de nombreuses espèces d'insectes aquatiques aux stades adultes aériens ou des poissons migrateurs. Leurs cycles de vie sont adaptés aux régimes des débits en place, et ces organismes seront particulièrement vulnérables aux gestions qui déplacent les événements hydrologiques d'une période de l'année à une autre. D'autres organismes présentent plutôt des adaptations comportementales ou morphologiques. Ils résistent alors aux débits extrêmes au cas par cas, par exemple en s'enfonçant dans le substrat. Ces adaptations sont déclenchées par des variations de débit elles-mêmes et permettent de mieux résister aux altérations des régimes hydrologiques.

Quelle part des débits réserver à la santé des rivières ? L'idée de réserver une part de l'eau au fonctionnement écologique des rivières est récente. Inscrite au National Water Act d'Afrique du Sud en 1998, elle a été généralisée par l'UICN : « Respecter les valeurs intrinsèques des écosystèmes, et les bénéfices qu'ils délivrent, implique de laisser de l'eau aux écosystèmes pour assurer leur fonctionnement. Cette eau, avec celle nécessaire à la satisfaction des besoins humains de base, constitue une réserve prioritaire sur tous les autres usages. » L'identification des débits ainsi à réserver ouvre la voie à une nouvelle éthique de l'utilisation de l'eau des rivières, les écosystèmes devenant des consommateurs légitimes de cette eau.

4.3 Préserver les lacs et les rivières de l'eutrophisation

Il a fallu près d'un demi-siècle de recherches, une concertation internationale, et des observatoires bénéficiant de moyens pérennes, pour comprendre les bases scientifiques de l'eutrophisation des eaux continentales. Comme celui de tout écosystème, le comportement des lacs et des rivières s'inscrit dans

la durée, et son observation demande du temps. L'histoire des recherches sur l'eutrophisation des lacs est, à cet égard, révélatrice.

Dès les années 1950, les scientifiques s'intéressèrent aux facteurs qui déterminent la biomasse du phytoplancton des lacs. Leurs efforts, menés en de nombreux pays, aboutirent à une corrélation entre la biomasse de phytoplancton présente dans un lac et le phosphore apporté à ce lac. Il devint alors possible d'évaluer l'état trophique d'un lac en s'appuyant sur le taux d'apport en phosphore, la profondeur moyenne du lac et le temps de rétention hydraulique de ce lac. Restait à prouver qu'on pouvait modifier cet état trophique en manipulant les apports de phosphore, ce que démontrèrent des expériences *in situ*, sur une série de lacs canadiens. Cependant, une dispersion considérable caractérisait encore les diagrammes représentant les biomasses de phytoplancton des lacs en fonction de leur charge en phosphore. Cette dispersion ne fut réduite que par la prise en compte de la structure des réseaux trophiques, notamment avec l'influence du zooplancton sur le métabolisme des nutriments (Schindler *et al.*, 1990) et les effets en cascade des grands poissons carnivores jusqu'au phytoplancton (Carpenter *et al.*, 2001). Enfin, pour affiner les prévisions, il fallut encore préciser tout un ensemble d'interactions au sein des communautés aquatiques, avec des seuils, des pseudo-équilibres multiples, des processus emmêlés.

Sans doute savons-nous mieux gérer la biomasse végétale présente dans un lac : en modifiant les apports de phosphore, la structure du réseau trophique, ou les deux. Sans doute a-t-il été possible — il est vrai non sans mal — d'utiliser les résultats obtenus pour bannir l'usage des détergents phosphatés, pour atténuer les effets des rejets industriels et municipaux, pour « sauver » certains lacs comme à Annecy ou au Bourget. Mais les connaissances acquises sont toujours difficiles à appliquer, tant les causes de l'eutrophisation des eaux sont variées, les territoires concernés étendus, et les implications sociologiques, économiques et politiques nombreuses. Préserver les lacs et les rivières de l'eutrophisation demande à la fois des observations à long terme, des recherches interdisciplinaires et une meilleure communication entre scientifiques, gestionnaires et décideurs des politiques publiques (encadré 2.5).

Peut-on prévoir les floraisons de cyanobactéries toxiques ? Nombre d'entre elles sont susceptibles d'empoisonner les pièces d'eau à la faveur de processus d'eutrophisation, avec des conséquences sérieuses aux plans de l'économie et de la santé humaine. Or, il s'avère difficile de discriminer les espèces toxiques au microscope. Les méthodes de biologie moléculaire représentent une voie d'avenir car elles permettent l'identification rapide des gènes impliqués dans la biosynthèse des toxines, la détection des espèces potentiellement toxiques, et l'identification des conditions propices à la production de toxines.

Encadré 2.5

Changements récents dans l'écosystème lémanique

Daniel Gerdeaux, Inra, Thonon

Les scientifiques ont perçu la menace d'eutrophisation du Léman dès la fin des années 1950, et lancé un programme pour suivre la qualité des eaux. Cette initiative a été reprise par les deux États suisse et français qui créèrent en 1962 la Commission internationale de protection des eaux du Léman, CIPEL⁶. Les principaux paramètres physicochimiques et la dynamique du plancton sont suivis une fois par mois *a minima* depuis plus de 40 ans, et des statistiques de pêche sont disponibles depuis cette date.

La concentration en phosphore des eaux du lac est passée de 10 $\mu\text{g/l}$ en 1955 à 80 $\mu\text{g/l}$ au début des années 1970. Les premières stations d'épuration ont alors été équipées pour la déphosphatation des eaux rejetées. La concentration en phosphore a continué d'augmenter jusqu'en 1980, atteignant alors 90 $\mu\text{g/l}$. Depuis, particulièrement avec l'arrêt de l'emploi des phosphates dans les lessives textiles en Suisse en 1986, cette concentration s'est abaissée pour atteindre aujourd'hui 32 $\mu\text{g/l}$. Toutes les stations d'épuration pratiquent désormais la déphosphatation et plus de 95 % de la pollution domestique est raccordée à ces stations. Cet important effort d'épuration ne permet pas toutefois un retour à la concentration en phosphore des années 1950 et l'existence d'une charge résiduelle a conduit la CIPEL à se fixer l'objectif réaliste de 20 $\mu\text{g/l}$ pour éviter les nuisances dues à l'eutrophisation.

Les nuisances les plus perceptibles concernent la transparence des eaux et la pêche. La prolifération du phytoplancton diminue la transparence de l'eau et la matière organique en excès sédimente, colmatant les fonds et consommant de l'oxygène lors de sa dégradation. Les invertébrés du fond les plus exigeants en oxygène disparaissent. Quant aux poissons, l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) et le corégone (*Coregonus lavaretus*) voient leur survie embryonnaire fortement diminuer, voire s'annuler pour l'omble chevalier qui fraie très profond. Le tonnage pêché de ces deux espèces a été très bas lors du maximum de l'eutrophisation et, sans un soutien par déversement d'alevins, l'omble chevalier aurait pu disparaître comme en d'autres lacs eutrophes. La perche et les cyprinidés, qui se reproduisent au printemps en zone littorale, souffrent moins de l'eutrophisation, la perche devenant dominante avant de laisser la place aux cyprinidés, les seules espèces à supporter une forte eutrophisation. Ce processus est réversible, et le corégone est à nouveau l'espèce dominante au Léman. Outre la restauration de la qualité

⁶www.cipel.org

de l'eau, l'alevinage et le réchauffement des eaux interviennent également dans ces changements.

En 30 ans, les eaux du fond du Léman ont subi un réchauffement de l'ordre de 1 °C, et la stratification thermique annuelle a été avancée d'environ un mois. En surface, la dynamique saisonnière du phytoplancton suit ce décalage, et il en est de même de celle du zooplancton herbivore. Quant aux algues « automnales », elles se développent dès l'été dans les eaux profondes mais, pour la plupart filamenteuses, elles sont difficiles à consommer. Ces avancées dans la dynamique de la production modifient les rapports trophiques dans le lac, d'autant plus que les poissons réagissent différemment d'une espèce à l'autre. Les gardons, cyprinidés d'eau chaude, se reproduisent un mois plus tôt environ, contrairement aux perches, d'où un partage des ressources nutritives modifié, avec des conséquences sur les dynamiques des populations. Les corégones, à reproduction hivernale, voient leurs larves bénéficier d'eaux plus chaudes qu'il y a 30 ans et d'une ressource nutritive dont la dynamique est anticipée. Leur survie est probablement meilleure : les captures annuelles de cette espèce sont passées de moins de 50 tonnes dans les années 1970 à plus de 300 tonnes depuis 1997.

En outre, une pollution industrielle au mercure a frappé le Léman au début des années 1970 et, par contre-coup, la qualité de la chair des poissons pendant 10 ans. Les analyses actuelles révèlent des pesticides dont les concentrations cumulées demeurent inquiétantes.

4.4 Aménager les zones humides et les ripisylves

Les zones humides correspondent à des terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre, de façon permanente ou temporaire. Quand elle s'y développe, la végétation y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année. Les zones humides n'occupent que 4 à 6 % de la surface terrestre. Elles ont souvent été asséchées dans le passé, en raison de leur rôle dans les épidémies de malaria et autres maux, notamment dans les régions méditerranéennes. Depuis une trentaine d'années, la tendance est à les conserver, voire à les restaurer en régions tempérées, pour leur aptitude : 1) à stocker du carbone, 2) à maintenir la biodiversité, et 3) à éliminer certaines substances polluantes.

L'aptitude des zones humides à stocker du carbone tient à leur forte productivité végétale, jointe à des conditions d'anaérobiose favorables à l'incorporation

dans le sol d'une matière organique végétale se décomposant lentement (Mitsch et Gosselink, 2000). Mais ce stockage peut s'inverser et les zones humides devenir des sources de carbone, rejetant du gaz carbonique et du méthane dans l'atmosphère, en raison de l'accélération de la décomposition végétale par une élévation des températures. Ces rejets sont d'ailleurs facilités par le fait que les végétaux des zones humides — *Typha*, *Carex*, *Phragmites* ou *Juncus* — se décomposent sur pied avant d'être incorporés dans les sédiments sous-jacents, et donc ont le temps de rejeter du carbone vers l'atmosphère. Les évaluations à cet égard méritent d'être confirmées, en climat subtropical comme en climat tempéré froid, notamment en Eurasie et en Amérique.

En France, les zones humides occupent 1,7 millions d'hectares, soit 3 % du territoire national ; 50 espèces d'oiseaux en dépendent et 30 % d'espèces végétales remarquables et menacées y sont inféodées. Ce sont des milieux fragiles (encadré 2.6), aux fonctions désormais reconnues : hydrologiques, biologiques, économiques, sociales et culturelles. Leur régression se poursuit de manière continue depuis le début du XX^e siècle. D'où le « Plan national d'action pour la reconquête des zones humides » élaboré en 1995. Sans doute convient-il, dix ans après son lancement, de dresser un bilan de ce plan. Mais il convient surtout de développer une véritable « ingénierie écologique » des zones humides pour purifier les eaux usées, produire de la biomasse, créer des habitats, ... à l'exemple des expériences qui se multiplient actuellement un peu partout dans le monde.

Encadré 2.6

Le delta du Rhône : un milieu fragile

Mireille Provansal, François Sabatier, Claude Vella, Grégoire Maillet,
Cerege, UMR CNRS, universités Aix-Marseille I et III

Le delta du Rhône est un milieu fragile, menacé à la fois par le recul actuel du littoral, la montée du niveau marin et les inondations du fleuve. Il subit depuis deux siècles diverses transformations, en relation avec l'aménagement du fleuve et les activités agricoles, industrielles et touristiques.

Le delta est une construction sédimentaire récente. La progradation du trait de côte — 10 à 20 km depuis 6 000 ans — tient au ralentissement de la montée du niveau marin et aux apports alluviaux du Rhône. La montée du niveau marin, d'abord rapide entre 18 000 et 6 000 BP (10 mm/an en moyenne), s'est ensuite progressivement ralentie, le 0 NGF étant atteint à la fin du premier millénaire ap. J.-C. Les apports du Rhône ont été abondants, en particulier à partir du Néolithique avec le début des défrichements

et des mises en culture. Leurs variations ont induit plusieurs avancées rapides, déplacements et/ou multiplications des embouchures, stabilisations et reculs du trait de côte. La dernière avancée importante du delta est associée au Petit Âge Glaciaire, période de crise hydrologique et de démographie rurale génératrice d'érosion, donc d'apports sédimentaires abondants.

Le xx^e siècle s'individualise par l'affinement granulométrique et la réduction quantitative des apports fluviaux (de 20 à 8-10 Mt environ), notamment suite à la réduction des surfaces agricoles, à la reforestation des Alpes, aux barrages hydroélectriques et aux dragages. Le littoral recule et prend une forme lobée, tout en bénéficiant encore d'un héritage sédimentaire, mais en cours de démantèlement et non renouvelable. Son « équilibre dynamique » est fragilisé par la montée du niveau marin et la réduction des apports du fleuve. Cette montée relative, mesurée au centre du delta, atteint 2 mm/an depuis 1905, et le bilan sédimentaire du système littoral est devenu négatif depuis 50 ans, avec un déficit de 700 000 m³/an entre 0 et -20 m et un recul quasi généralisé du linéaire côtier (4 m/an en moyenne). La moitié sud du delta risque ainsi d'être submergée : 30 % de sa surface est à une altitude inférieure à 0,50 mètres sous le niveau moyen de la mer, et le village des Saintes-Maries de la Mer pourrait être bientôt encerclé par la mer. En outre, la remontée de la nappe d'eau salée affecte les étangs méridionaux, mettant en péril des milieux à forte valeur écologique et, à plus long terme, la Camargue rizicole.

Ces effets s'ajoutent à une moindre fréquence des crues depuis la fin du xix^e siècle, et au ralentissement des apports sédimentaires à l'embouchure. Le fleuve ne contribue plus que faiblement à l'alimentation littorale, avec un temps de rétention élevé des sables au sommet du prodelta. Quant aux inondations, elles sont localisées au niveau des brèches dans les digues in-subsersibles de 1860, essentiellement sur le Petit Rhône. L'apport d'alluvions dans le delta dépend donc pour l'essentiel d'entrées d'eau liées à une irrigation qui, réalisée au printemps et en été à partir d'un fleuve peu chargé, ne permet plus l'exhaussement naturel de la plaine. En outre, les aménagements pour la navigation ont rétréci le chenal de plus de 400 m et l'ont approfondi de 1 à 4 m, abaissant la ligne d'eau, ce qui favorise le drainage de la plaine, mais fragilise les digues.

En fait, le delta du Rhône subit depuis 150 ans une évolution, comparable à celle de la plupart des deltas méditerranéens, le fleuve ne lui apportant plus les sédiments dont il a besoin. Cependant, les crues récentes montrent que le Rhône est encore capable de transporter des charges solides abondantes, avec une fraction sableuse non négligeable. La question se pose donc d'améliorer les relations entre le bassin versant, le fleuve et le delta, jusqu'au trait de côte. Et les recherches doivent déterminer quelles menaces font peser une

accélération de la vitesse de montée du niveau marin et de la fréquence des tempêtes.

La défense côtière a privilégié jusqu'ici les enrochements artificiels, avec des impacts paysagers et écologiques peu compatibles avec l'image de marque de la Camargue. Devant l'efficacité très variable de ces ouvrages s'impose la nécessité d'innover, voire d'accepter un recul raisonné du littoral du delta.

Les zones riveraines des cours d'eau jouent-elles un rôle de filtre vis-à-vis des pollutions diffuses ? On l'admet pour l'azote, le phosphore et certains pesticides entraînés par ruissellement vers les cours d'eau des régions agricoles. Certains sites riverains jouent ce rôle, quand la production végétale y est forte, le temps de résidence de l'eau élevé, et les écoulements souterrains peu profonds. Mais il faut se garder de généraliser, et l'idée de restaurer la qualité des eaux des rivières grâce aux filtres riverains ne saurait être extrapolée sans réflexion à l'échelle d'un grand bassin versant, ni à toute pollution diffuse. Elle relève d'une ingénierie écologique des zones humides, prometteuse mais encore à développer.

5 | Un devoir de vision planétaire

Plus d'un milliard d'hommes dans le monde boivent une eau contaminée et des pays entiers vivent des pénuries dramatiques pour leur développement agricole et industriel. Dans les plus pauvres d'entre eux sévit une mortalité prématurée par manque d'eau ou par maladies liées à l'eau. Et cette situation risque de perdurer, exacerbée par la croissance démographique, les pollutions et le changement climatique. La crise mondiale de l'eau impose aux scientifiques un devoir de vision planétaire : pour comprendre la dynamique d'un système — le système hydrologique mondial — dont dépend l'avenir de l'humanité (§ 5.1), pour dégager, dans toute leur complexité, les causes des disparités régionales (§ 5.2), pour aider à résoudre les problèmes, notamment par un bon usage de l'écologie (§ 5.3).

5.1 Le système hydrologique global

Le cycle de l'eau dépend de nombreux facteurs humains et non humains, tous interdépendants, au sein du « système hydrologique global ». Les sociétés humaines dépendent de ce système, qu'elles contribuent à modifier de plus en plus. En outre, le système hydrologique global comprend deux autres composantes : l'une, physique, renvoie aux écoulements, à la géomorphologie, aux

processus d'érosion et de sédimentation ; l'autre, biologique et biogéochimique, renvoie aux organismes aquatiques et riverains, aux écosystèmes qui leur sont associés, à la biodiversité. À l'évidence, l'accroissement de la population mondiale (et les besoins liés à cet accroissement) transforme ce système. Il est urgent d'évaluer l'ampleur du changement qui affecte le système hydrologique global, ses causes, ses conséquences, ainsi que sa résilience (Framing Committee of the GWSP, 2004).

Le système hydrologique est en effet transformé à l'échelle de la planète, quantitativement avec les effets des barrages, les extractions d'eau ou les transferts, qualitativement avec les rejets ponctuels et diffus de substances polluantes diverses. Ainsi, 20 % des 11 000 espèces de poissons d'eau douce ont disparu ou ont été menacées de disparition au cours des dernières décennies (UN/WWAP, 2003). Et les peuplements présents ne correspondent plus aux mêmes assemblages, suite à la fragmentation du cours des rivières et à l'introduction d'espèces exotiques.

Le système hydrologique global est aussi caractérisé par sa connexité à l'échelle planétaire. Ces connexions se manifestent dans l'espace, des événements locaux ou régionaux se répercutant à des distances éloignées, avec parfois des effets en retour. Elles se manifestent aussi dans le temps, ces mêmes événements prolongeant leurs effets sur le long terme, avec des temps de latence entre causes et effets, et des héritages d'actions passées. La déforestation des plateaux chinois a ainsi multiplié par 10 la charge en sédiments du fleuve jaune, provoquant des transformations du lit du fleuve et favorisant des inondations à des centaines de kilomètres plus loin et des centaines d'années plus tard.

La connexité du système hydrologique oblige à repenser nos besoins d'information à une échelle mondiale (tableau 2.5). Ces besoins concernent par exemple la pollution des eaux continentales par voie atmosphérique, divers polluants volatils — composés organiques, mercure, nutriments — pouvant être transportés par l'air et contaminer des régions éloignées de leur lieu de production (Swackhamer *et al.*, 2004). Certaines bioaccumulations sont particulièrement préoccupantes : celle des organochlorés parvenant aux régions les plus froides de la planète, étant donné la physiologie des organismes en place, la dynamique des chaînes trophiques, et la longueur des cycles vitaux, celle aussi du mercure et de ses effets sur la santé humaine.

Comment les dégradations observées à une échelle locale se répercutent-elles aux échelles plus globales ? Comment se propagent-elles ? Quelles sont les régions sensibles, les seuils critiques ? Quels usages et quels besoins en pâtissent ? Quelles sociétés humaines en souffrent le plus et quelles mesures prendre ? Répondre à ces questions suppose la réunion de diverses perspectives, depuis celle

Forces de contrôle		
<ul style="list-style-type: none"> • Climat • Population • Couvert des terres • Extraction de l'eau • Développement économique • Gouvernance 		
Variables d'état		
Composantes physiques	Composantes biogéochimiques	Composantes humaines
<ul style="list-style-type: none"> • Débit des rivières • Régimes des débits • Volumes de stockage 	<ul style="list-style-type: none"> • Richesse spécifique • Habitat • Qualité de l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> • Accès à l'eau pure • Occurrence maladies liées à l'eau
Facteurs de santé humaine		
Entre composantes physiques et humaines	Entre composantes physiques et biogéochimiques	Entre composantes humaines et biogéochimiques
<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilité en eau par personne • Index de pauvreté en eau 	<ul style="list-style-type: none"> • Concentrations en polluants 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualité de l'eau d'origine

Tableau 2.5

Les forces de contrôle (climat, population, . . .) agissent sur les variables d'état du système hydrologique — composantes physiques, biogéochimiques, humaines dont les interactions définissent des facteurs de santé humaine (d'après Framing Committee of the GWSP, 2004).

des sciences de la nature jusqu'à celles des sciences de l'homme et de la société, de manière à comprendre les dynamiques en cause.

5.2 Disparités régionales

Le problème du système hydrologique global se décompose en une multitude de problèmes locaux et régionaux, obligeant à rechercher des solutions

pratiquement au cas par cas. Une vision planétaire doit rester attentive à ces défis régionaux. Le Global International Waters Assessment (GIWA), une évaluation des eaux internationales de la planète placée sous l'égide du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE), distingue ainsi 66 régions dans son analyse des socio-écosystèmes aquatiques de la planète (Hempel et Daler, 2004). Ces régions illustrent divers aspects de la crise de l'eau dans le monde. Elles montrent aussi à quel point cette crise dépend de problèmes de gouvernance, et donc la nécessité de mieux prendre en compte la dimension humaine de l'évolution des socio-écosystèmes.

Le bassin du lac Tchad connaît ainsi une sécheresse persistante depuis une trentaine d'années. Une désertification aux conséquences dramatiques pour 44 millions d'habitants affecte lourdement l'ensemble des activités économiques de la région — pêche, agriculture, élevage — et induit des tensions, des exodes, des conflits. La Commission du bassin du lac Tchad, agence intergouvernementale comprenant le Tchad, le Niger, le Nigeria, le Cameroun, la République Centrafricaine, auxquels s'est ajouté le Soudan, est à l'origine d'un plan d'action pour « renverser les tendances à la dégradation des terres et des eaux » dans le socio-écosystème du bassin du lac Tchad. Cette dégradation renvoie en effet à des questions de démographie, d'économie, de manque de formation, d'absence de cadres juridiques et de gouvernance — toutes causes qui empêchent de mettre en place une stratégie de gestion intégrée, raisonnée et équitable des ressources en eau.

Un même besoin de gouvernance en matière de gestion des ressources en eau marque d'autres régions de la planète : baie du Bengale, bassins de la mer d'Aral, de la mer de Chine, etc. De nombreux pays partagent en effet des bassins hydrographiques avec un ou plusieurs autres pays — des bassins dans lesquels vit plus de 40 % de la population mondiale, et dont dépendent les zones côtières qui devraient comprendre 75 % de la population mondiale en 2030.

Comment remédier aux pénuries qui frappent de nombreux pays de la planète, comment enrayer les pollutions, les surexploitations des ressources vivantes, les destructions d'habitats ? Comprendre les causes se révèle nécessaire mais insuffisant. Il faut encore s'engager dans des actions concrètes. D'où l'importance d'une participation active aux programmes internationaux qui, en Amérique du Sud, en Afrique, en Asie, mettent en place partenariats, réseaux et échanges pour tenter de relever les défis posés par la gestion des eaux continentales.

5.3 Du bon usage de l'écologie

Le devoir de vision planétaire s'accompagne d'un autre devoir face aux problèmes environnementaux — celui d'une approche pragmatique, réflexive,

éloignée des idéologies. Dans une telle perspective, l'écologie des eaux continentales est indispensable à la prévision des trajectoires possibles suivies par les écosystèmes aquatiques après perturbations, naturelles ou anthropiques. Elle est aussi indispensable dans toute tentative visant à influencer ces trajectoires. À une condition cependant : être insérée dans des ensembles allant des sciences de la Terre à celles de l'homme et de la société.

Les scientifiques sont de plus en plus interrogés sur l'avenir des eaux continentales, qu'elles soient superficielles ou souterraines et qu'il s'agisse de lacs, de réservoirs, de rivières ou de zones humides. Répondre à cette attente suppose des recherches organisées d'une manière cohérente, interdisciplinaire et pérenne, suppose aussi de tirer tout le parti possible de nouvelles technologies — cartographie, télédétection, visualisation, traçage — qui permettent de détecter comme jamais les changements dans les écosystèmes, et de les suivre. Le principal défi est désormais de mettre un savoir foisonnant au service de prévisions toujours améliorables.

Dans le domaine des eaux continentales, le bon usage de l'écologie est donc indissociable d'une approche multidisciplinaire des problèmes, d'un décloisonnement des connaissances acquises et à acquérir, d'une liaison plus étroite entre la recherche et la gestion. Il est surtout indissociable d'une participation active aux programmes développés dans les pays en développement — ceux dans lesquels les problèmes de l'eau se poseront avec le plus d'acuité dans les décennies à venir.

Conclusion

Les changements planétaires en cours modifient profondément nos façons de concevoir le fonctionnement écologique des eaux continentales. De nouveaux débats bousculent nos connaissances ; ils sont illustrés dans ce chapitre par 14 questions clés (*paragraphes en italique*) et 6 encadrés. Ces débats renouvellent les bases théoriques de la dynamique des écosystèmes et les pratiques de gestion. Nous devons par exemple tirer les conséquences des liaisons existant entre les milieux aquatiques et les territoires de leurs bassins versants, accepter l'idée que l'intégrité et la viabilité des écosystèmes aquatiques et riverains ne s'expriment que dans une dynamique de changements et de fluctuations, nous préoccuper de la capacité des socio-écosystèmes à s'adapter aux changements environnementaux à venir.

Cependant, en dépit des progrès accomplis dans la connaissance des écosystèmes aquatiques continentaux, ces derniers continuent à se dégrader, en

France et dans le monde. Cette dégradation, quantitative et qualitative, est pré-occupante car, inégalement répartie, elle est source d'inégalités et de conflits à venir. Or, la dégradation des milieux aquatiques continentaux n'est pas inéluctable, et les recommandations ci-après peuvent contribuer à renverser les tendances observées actuellement.

À la base de toute politique de développement durable, il est nécessaire de réserver — en quantité, en qualité et en temps voulu — la part de l'eau qui revient au fonctionnement des écosystèmes. Ces derniers sont en effet des utilisateurs légitimes de l'eau, et la part qui leur revient doit primer sur tout autre usage, une fois satisfaits les besoins humains de base. Ce fondement demande à être enseigné à tous niveaux, et *l'éducation du public* s'avère ici essentielle. Il faut faire savoir que les lacs, les rivières, les zones humides, et les eaux souterraines qui les alimentent ne rendront les services que nous pouvons en attendre que s'ils sont en bon état de fonctionnement écologique. Il faut aussi faire savoir que ceci impose de se soucier de la résilience de ces écosystèmes face aux changements.

Il est aussi nécessaire d'organiser le partage des connaissances entre scientifiques, gestionnaires et décideurs. À cet égard, une structuration des recherches sur les écosystèmes aquatiques continentaux dans le cadre d'un observatoire de type ORE (observatoire de recherche sur l'environnement)⁷ est vivement recommandée. Cette structuration pourrait être pilotée en liaison avec un réseau de sites-ateliers et des observatoires opérationnels tels que les agences de l'eau. Un tel groupement permettrait de combler le vide laissé par la disparition de l'ancien GIP Hydrosystèmes et de renforcer une démarche scientifique commune⁸.

Cette structure améliorerait notamment la cohérence des actions de surveillance, de protection et de recherche dans le domaine des eaux continentales, avec :

- une surveillance de l'état de santé des écosystèmes aquatiques basée sur : des indicateurs biologiques correctement identifiés (*systématique des espèces*), des situations de référence acceptables (*souhaits des parties prenantes*), une grande vigilance à l'égard des invasions biologiques (*traits biologiques des espèces susceptibles de devenir envahissantes*) ;

⁷<http://www.recherche.gouv.fr/recherche/fns/ore.htm>

⁸Contrairement à des craintes parfois exprimées, les observatoires de recherche tels que nous les concevons n'ont rien de refuges pour des travaux de suivi routinier. L'exemple du programme LTER (*Long Term Ecological Research*) montre qu'un dynamisme propice aux innovations et aux découvertes est au contraire favorisé par la durée, si cette dernière va de pair avec des évaluations rigoureuses.

- une protection des *habitats aquatiques*, étape indispensable pour enrayer les pertes de biodiversité des lacs, rivières et zones humides et, par suite, pour développer la résilience des socio-écosystèmes liés à l'eau ;
- une recherche visant à :
 - élaborer des scénarios à partir de *sites-ateliers pérennes* associant chercheurs, gestionnaires et décideurs,
 - associer l'état des eaux continentales à l'utilisation des territoires de leurs bassins versants, notamment par *l'usage des nouvelles méthodes d'observation de la Terre*,
 - identifier les *conditions propres au développement d'espèces toxiques* lors des phénomènes d'eutrophisation,
 - développer une ingénierie des zones humides.

Enfin, il est inacceptable que notre communauté scientifique nationale soit pratiquement absente d'actions internationales aussi importantes pour l'avenir des eaux continentales de la planète que « l'Évaluation des écosystèmes pour le Millénaire » ou « l'Évaluation globale des eaux internationales »⁹, toutes deux lancées dans le cadre du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) : par exemple, la France ne figure pas parmi les 27 pays représentés dans le conseil de direction de la première de ces actions et ne participe pas à la seconde.

La vitalité de la recherche française dans le domaine des eaux continentales dépend d'une action forte pour *assurer sa présence dans les programmes internationaux en cours et à venir*.

Références bibliographiques

- Balmford A. *et al.* (2002). Economic reasons for conserving wild nature. *Science*, **297** : 950-953.
- Bellwood DR. *et al.* (2004). Confronting the coral reef crisis. *Nature*, **429** : 827-833.
- Carpenter SR. *et al.* (2001). Trophic cascades, nutrients, and lake productivity : whole-lake experiments. *Ecological Monographs*, **71** : 163-186.
- Commission européenne. Décision 2000/60/CE établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. *Journal Officiel*, L 327 du 22/12/2000.

⁹GIWA : Global International Waters Assessment (Hempel et Daler, 2004).

- Costanza R. *et al.* (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, **387** : 254-260.
- Décamps H. (1996). The renewal of floodplain forests along rivers : a landscape perspective. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie*, **26** : 35-59.
- Folke C. *et al.* (2002). Resilience and sustainable development : building adaptive capacity in a world of transformation. *Ambio*, **31** : 437-440.
- Framing Committee of the GWSP (2004). The Global Water System Project : Science Framework and Implementation Activities. www.gwsp.org
- Gibert J., Mathieu J., Fournier F. (eds.) (1997). *Groundwater / Surface Water Ecotones : Biological and Hydrological Interactions and Management Options*. Cambridge University Press.
- Gunderson L., Holling CS. (eds.) (2002). *Panarchy : Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Island Press.
- Hempel G., Daler D. (2004). Why a global international waters assessment (GIWA)? *Ambio*, **33** : 2-6.
- Hering D. *et al.* (2004). Overview and application of the AQEM assessment system. *Hydrobiologia*, **516** : 1-20.
- Kalff J. (2002). *Limnology*. Prentice-Hall. Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Karr JR., Chu EW. (1999). *Restoring life in running waters*. Island Press.
- Lavabre J., Andréassian V. (2000). *Eaux et Forêts : la forêt, un outil de gestion des eaux ?* ECOFOR. Cemagref éditions.
- Lévêque C., Paugy D. (eds.) (1999). *Les poissons des eaux continentales africaines. Diversité, écologie, utilisation par l'homme*. IRD, Paris.
- Likens GE., Bormann FH. (1995). *Biogeochemistry of a forested ecosystem*. 2nd edition. Springer-Verlag, New York, USA.
- Loreau M. *et al.* (2001). Biodiversity and ecosystem functioning : current knowledge and future challenges. *Science*, **294** : 804-808.
- Lytle DA., Poff NL. (2004). Adaptation to natural flow regimes. *Trends in Ecology and Evolution*, **19** : 94-100.
- Mack RN. *et al.* (2000). Biotic invasions : causes, epidemiology, global consequences, and control. *Ecological Applications*, **10** : 689-710.
- Mitsch WJ., Gosselink JG. (2000). *Wetlands*. 3rd Edition. John Wiley and Sons, New-York, USA.

- Naiman RJ., Décamps H., McLain M. (2005). *Riparia : Ecology, Conservation, and Management of Streamside Communities*. Academic Press.
- Palmer TN., Räisänen J. (2002). Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate. *Nature* **415** : 512-514
- Parmesan C., Yohe G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, **421** : 37-42.
- Poff NL. *et al.* (1997). The natural flow regime : a paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, **47** : 769-784.
- Postel SA., Richter B. (2003). *Rivers for Life : Managing Water for People and Nature*. Island Press.
- Pourriot R., Meybeck M. (eds.) (1995). *Limnologie générale*, Masson, Paris.
- Sala OE. *et al.* (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, **287** : 1770-1774.
- Scheffer M. *et al.* (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* **413** : 591-596.
- Schindler DW. *et al.* (1990). Effects of climatic warming on lakes of the central boreal forest. *Science* **250** : 967-970.
- Swackhamer DL. *et al.* (2004). *Impacts of atmospheric pollutants on aquatic ecosystems*. Issues in Ecology N° 12. Ecological Society of America.
- UN/WWAP (United Nations/World Water Assessment Programme) 2003. *UN world water development report : water for people, water for life*. UNESCO and Berghahn Books.
- Walker B. *et al.* (2002). Resilience management in social-ecological systems : a working hypothesis for a participatory approach. *Conservation Ecology*, **6** : 14 (online) URL : <http://www.consecol.org/vol6/iss1/art14>
- Wasson JG. *et al.* (2004). Les hydro-écorégions : une approche fonctionnelle de la typologie des rivières pour la directive cadre européenne sur l'eau. *Ingénieries*, **40** : 3-10.

CHAPITRE 3

Eau et santé

JACQUES LABRE, JEAN-FRANÇOIS LORET ET OLIVIER SCHLOSSER

Le thème transversal « eau et santé » recouvre des enjeux qui peuvent sembler *a priori* différents selon qu'il s'agit de pays développés comme la France, ou de pays en développement. Cependant, on abordera les uns et les autres dans ce chapitre, pour deux raisons principales :

- l'accès à l'eau et la santé sont des déterminants essentiels, fortement liés entre eux, du développement dans les pays les moins avancés : en conséquence, la politique française d'aide au développement se doit de les considérer avec un haut niveau de priorité ;
- le flux des migrations, mais aussi du tourisme international, conduit *de facto* à une « mondialisation » de certains risques sanitaires ;
- sans oublier l'impact possible du changement climatique sur la répartition géographique de certains risques sanitaires.

Il est important de souligner dès l'introduction de ce chapitre que la contamination microbienne constitue le principal danger associé à l'eau de boisson. Si le développement des moyens d'assainissement des eaux usées et de traitement de l'eau de boisson a permis une très nette régression de ce risque infectieux dans les pays riches et industrialisés, il ne faut pas oublier que la gestion de ce risque reste d'une importance extrême, comme en témoigne la survenue d'épidémies en Amérique du Nord ou en Europe lors de défaillances techniques et/ou humaines.

1 | Risques émergents et nouvelles préoccupations

Une maladie est dite « émergente » lorsque son incidence humaine s'est accrue durant les deux dernières décennies, ou qu'elle est en passe de s'accroître dans un avenir proche. Cette définition purement épidémiologique prend ainsi en compte la mise en évidence de « nouvelles » maladies associées à de « nouveaux » agents pathogènes ou à des micro-organismes devenus pathogènes, mais également la réapparition, la « réémergence » de maladies connues, après une période de diminution de son incidence. Le développement des résistances bactériennes aux antibiotiques s'inscrit dans ce deuxième aspect.

Cette définition semble toutefois se limiter aux seules pathologies infectieuses. De fait, la notion d'émergence concerne également le développement de pathologies multifactorielles liées au milieu, à l'environnement socio-économique et aux comportements (par exemple pathologies respiratoires, saturnisme, infections nosocomiales, traumatologie du sport).

De nouvelles préoccupations apparaissent ainsi dans le champ « Eau et santé » pour des raisons diverses. Nous retiendrons ci-après les principales.

1.1 Pathologies infectieuses hydriques émergentes

Le développement socio-économique, grâce à l'amélioration des conditions d'hygiène, à un meilleur accès à des soins efficaces et à une prévention individuelle et collective performante par la vaccination, a permis la « transition épidémiologique » des pays riches depuis une mortalité marquée par la pression des maladies infectieuses, responsables de la moitié des décès dans les pays pauvres, vers une situation dans laquelle 50 % de la mortalité est due aux maladies cardiovasculaires. Néanmoins, plusieurs événements épidémiques ou endémiques sont venus contrarier la validité de cette approche et alimenter le dossier des maladies infectieuses émergentes. C'est le cas du sida, des fièvres hémorragiques, de l'hépatite C, de la légionellose, du Sras, etc.

L'eau de boisson n'échappe pas à ce constat : bactéries, virus et parasites ont été responsables d'épidémies d'origine hydrique parfois très importantes comme celle à *Cryptosporidium* à Milwaukee en 1993 où plus de 400 000 personnes ont été infectées (Cloete *et al.*, 2004). Parmi les bactéries entériques, l'émergence des épidémies d'origine hydrique associées à *Campylobacter*, à *Escherichia coli* O157:H7, à *Shigella*, à *Vibrio cholera* ou à *Helicobacter pylori* sont des exemples. Cette émergence est liée à l'apparition de nouveaux sérotypes plus virulents ou sécréteurs de toxines, à des résistances aux antibiotiques, au développement de populations fragiles immunodéprimées. Les virus entériques (calicivirus, adénovirus, astrovirus, entérovirus, ...) et les protozoaires (*Cryptosporidium*, *Giardia*, *Cyclospora*, etc.) ont en commun de présenter des doses infectantes faibles et une grande résistance dans l'environnement. Les protozoaires sont particulièrement résistants à la chloration de l'eau.

Les nouvelles techniques diagnostiques de laboratoire ont contribué à la reconnaissance de ces pathogènes émergents. Néanmoins, seuls les États-Unis disposent d'un système relativement fiable de détection et de notification des épidémies d'origine hydrique. Malgré cela, durant la dernière décennie, l'étiologie des épidémies de gastro-entérites aiguës aux États-Unis n'a été déterminée que dans la moitié des cas environ, avec toutefois la suspicion d'une cause virale dans beaucoup des épisodes. Par ailleurs, plusieurs auteurs estiment que le nombre réel d'épidémies d'origine hydrique est nettement supérieur au nombre rapporté, deux, trois peut-être dix fois plus élevé. L'incidence annuelle aux États-Unis pourrait être de 7 à 8 millions de cas dont 1 200 décès (Craun, 1990 ; Moris et Levin, 1995).

L'Europe ne dispose pas actuellement d'un système fiable de détection et de notification des épidémies d'origine hydrique, en soulignant toutefois les efforts réalisés au Royaume-Uni et dans les pays scandinaves. L'amélioration des investigations des épidémies d'origine hydrique fait actuellement l'objet d'un programme d'étude à l'InVS (encadré 3.2). L'objectif à court terme est de limiter l'extension d'une épidémie débutante, et, dans la durée, l'un des objectifs prioritaires sera d'aider à définir les facteurs de risque de ces épidémies.

Encadré 3.1

L'épidémiologie des maladies infectieuses

Olivier Schlosser, Suez Environnement

L'infection est le résultat de l'agression d'un organisme vivant par un micro-organisme vivant, bactérie, virus, parasite et champignon. Elle est ainsi différente du saprophytisme qui se caractérise par une coexistence pacifique entre l'individu hôte et le micro-organisme qui n'exerce aucun pouvoir pathogène. Néanmoins, le saprophytisme peut entraîner l'infection lorsque l'équilibre est rompu et permet au micro-organisme d'exercer son pouvoir pathogène. Dans le cas des déficits immunitaires, on parle alors d'infection opportuniste. L'infection est une maladie transmissible par l'intermédiaire d'un agent pathogène. Elle implique une source de contamination, un mode de transmission et une porte d'entrée dans l'organisme. Ensuite, l'issue du conflit entre la pathogénicité du micro-organisme et l'efficacité des moyens de défense de l'individu déterminera l'importance des conséquences de l'infection, depuis l'infection inapparente cliniquement jusqu'aux formes graves et létales.

La source de contamination est représentée par l'habitat habituel, le réservoir, du micro-organisme. Il peut s'agir de l'homme, d'animaux, ou de l'environnement. La contamination peut être directe, d'un individu à un autre (de la même espèce ou non), ou indirecte par l'intermédiaire d'un vecteur inanimé (eau, aliments, aérosols, objet) ou animé (moustiques, tiques, mouches, puces, poux, rongeurs, ...). L'accès à une porte d'entrée permet l'introduction dans l'organisme : par voie respiratoire, digestive, cutanée ou muqueuse. L'infection induit une réponse immunitaire qui apportera une protection spécifique plus ou moins prolongée contre le micro-organisme.

Lorsque la transmission du micro-organisme est épisodique et s'exprime par des cas d'infection isolés et sans rapport entre eux, nous parlons de cas sporadiques. Lorsque la transmission du micro-organisme est constante ou périodique dans la population conduisant à la persistance habituelle de quelques cas, nous parlons de situation d'endémie. Lorsque la transmission

du micro-organisme est facile avec une diffusion rapide conduisant à l'apparition subite de l'infection dans un groupe de personnes, nous parlons d'épidémie. Lorsque l'épidémie concerne un ou plusieurs continents, il s'agit d'une pandémie.

La prévention contre les maladies infectieuses fait appel à des actions aux différentes étapes de la transmission du micro-organisme :

- sur le réservoir lorsque c'est possible, pouvant conduire à l'éradication de la maladie, comme pour la variole ou prochainement la poliomyélite. Il est bien sûr plus aisé de contrôler un micro-organisme dont le réservoir est strictement humain qu'un micro-organisme présent chez de nombreux animaux ;
- sur la contamination par l'hygiène collective (l'importance de l'approvisionnement en eau potable et de l'assainissement est considérable), l'hygiène individuelle (soulignons l'efficacité du lavage régulier des mains), la lutte contre les vecteurs (démoustication), la désinfection et la stérilisation du matériel chirurgical, la protection individuelle (gants, masque filtrant, ...);
- sur les moyens de défense de l'organisme, non spécifiques (crèmes protégeant la peau des mains par exemple) ou spécifiques (vaccins et sérums, mais disponibles contre seulement quelques micro-organismes).

Il est important de souligner que, si le traitement de l'eau est essentiel, la prévention des maladies infectieuses d'origine fécale doit néanmoins correspondre à une approche holistique qui intègre l'éducation à l'hygiène et l'assainissement et s'adresse à l'ensemble des modes de transmission des micro-organismes.

Par ailleurs, le risque endémique, c'est-à-dire le « bruit de fond », des infections d'origine hydrique dans la population est mal connu. Les quelques études expérimentales randomisées publiées indiquent des résultats variables, entre 5 % et 40 % des gastro-entérites attribuables à l'eau de boisson (Cloete *et al.*, 2004). Cet aspect mérite certainement des travaux complémentaires, et les difficultés de caractérisation des expositions de la population soulignent l'intérêt de la méthode d'évaluation quantitative des risques.

Le risque infectieux lié à l'eau d'adduction ne se limite pas aux pathogènes fécaux et à la transmission par voie orale. D'autres micro-organismes sont

capables de se multiplier dans l'environnement et dans les canalisations, et l'homme se contamine notamment par inhalation d'aérosols. C'est le cas des légionelles (encadré 3.3) et des mycobactéries atypiques (Cloete *et al.*, 2004 ; Marre *et al.*, 2002). Le développement des installations génératrices d'aérosols dans l'environnement, y compris domestique et professionnel, a favorisé l'émergence de nouveaux risques pour la population. Des questions méritent d'être développées, et notamment : quels sont l'impact du biofilm et celui de la survie à l'intérieur des Protozoaires sur le pouvoir infectieux de ces micro-organismes ? Ces caractéristiques ont-elles une influence sur les voies de transmission ? Des travaux complémentaires sont nécessaires pour évaluer quantitativement le risque microbiologique par inhalation d'aérosol et en particulier élaborer des relations dose-réponse.

Encadré 3.2

Surveillance des pathologies infectieuses d'origine hydrique

Pascal Beaudeau, Institut de veille sanitaire

La surveillance des pathologies infectieuses d'origine hydrique, mise en place par l'Institut de veille sanitaire, repose sur deux programmes, l'un consacré aux épidémies l'autre à l'incidence des cas sporadiques de gastro-entérites aiguës (GEA).

Le programme d'amélioration des investigations d'épidémies d'origine hydrique s'appuie essentiellement sur les investigations d'épidémies réalisées par les Ddass. Le niveau de détection des épidémies devrait progresser en élargissant les signaux d'alerte. Actuellement les alertes reposent sur l'occurrence de cas pathologiques groupés ou d'analyses d'eau indiquant une menace d'épidémie. Un meilleur signalement aux autorités sanitaires des accidents d'exploitation significatifs et des pollutions accidentelles, ainsi que des plaintes groupées et inhabituelles des abonnés, permettrait le repérage précoce de situations à risque. Un deuxième objectif est l'amélioration des investigations microbiologiques en mettant à profit les diverses techniques d'analyse maintenant disponibles pour la recherche des pathogènes dans l'eau en situation épidémique. Enfin, il s'agit de recueillir des données sur les pollutions accidentelles et les épidémies pour cerner les facteurs naturels, techniques et humains qui préparent ou déclenchent les épidémies.

Le programme de surveillance des cas endémiques est réalisé sur onze sites principalement urbains (quatorze réseaux de distribution d'eau de consommation). Il vise à mieux caractériser le risque de GEA lié à la consommation d'eau du robinet et à identifier les facteurs techniques de ce risque. Il

bénéficie du concours des opérateurs de l'eau qui fournissent des données d'exploitation (turbidité, concentration en chlore dans l'eau distribuée...) ainsi que leur expertise pour utiliser ces données comme indicateurs d'exposition aux pathogènes. Les données relatives aux prescriptions médicamenteuses de l'Assurance maladie permettent d'estimer l'incidence des GEA.

Cette base de données et la base SISE-eau du ministère chargé de la Santé, rassemblant les résultats analytiques du contrôle exercé par les Ddass, devraient constituer le socle de la surveillance des pathologies hydriques. L'exploitation épidémiologique de ces bases est une priorité.

L'approche épidémiologique possède cependant des limites. Les difficultés de l'étude du risque endémique, lié à la médiocre qualité microbiologique de certaines petites unités de distribution d'eau desservant des populations en zone rurale, est exemplaire à cet égard. Ce risque a déjà été documenté chez les populations résidentes mais reste à caractériser chez les populations temporaires peu immunisées, comme les touristes. Ce sujet recèle cependant de nombreuses difficultés, en particulier l'accès à une population suffisante en taille pour mettre en évidence un risque statistiquement significatif, la traçabilité de cette population pour le recueil des données de morbidité et le contrôle des facteurs de confusion tels que l'hygiène, le contact avec les animaux, l'alimentation et la baignade.

Encadré 3.3

Les légionelles

Olivier Schlosser, Suez Environnement

Depuis l'épidémie de pneumonies survenue en 1976 lors d'un congrès de l'American Legion dans un hôtel de Philadelphie, les légionelles font l'objet d'une préoccupation certaine de la part des autorités sanitaires de la plupart des pays.

Bactéries de réservoir hydrique naturel, seules une vingtaine d'espèces sont pathogènes pour l'homme, et plus précisément *Legionella pneumophila* (Lp) qui est impliquée dans plus de 90 % des légionelloses. Les légionelles présentent des particularités écologiques qui expliquent les aspects épidémiologiques et les difficultés d'évaluation et de maîtrise du risque : ce sont des bactéries mobiles dont la croissance est optimale entre 30 et 40 °C, qui prolifèrent dans les canalisations et les ballons d'eau chaude, qui colonisent les biofilms à la surface interne des canalisations, et qui peuvent parasiter les

amibes. La transmission se fait par l'inhalation d'aérosols contaminés provenant de tours aéroréfrigérantes, de douches, de systèmes de climatisation, de bains à remous ou de fontaines décoratives. Il n'y a pas de transmission inter-humaine. La légionellose est une pneumopathie infectieuse, dont la létalité peut atteindre 25 %, qui survient par épidémies ou le plus souvent par cas sporadiques. Les facteurs de risques individuels sont fréquents mais non indispensables (au moins un facteur de risque dans 70 % des cas environ, limités au seul tabagisme dans 24 % des cas rapportés en 2001). Maladie à déclaration obligatoire, son diagnostic a été considérablement facilité par la mise au point d'un test de détection des antigènes urinaires (spécifique de Lp 1). Le nombre de cas déclarés est d'environ 1 000 par an en France, en augmentation régulière en raison notamment d'une meilleure sensibilisation des médecins praticiens. 129 décès ont été enregistrés en 2003 (Campès *et al.*, 2004).

Un plan gouvernemental de prévention des légionelloses a été présenté au Conseil des ministres le 7 juin 2004. Il prévoit notamment l'amélioration des connaissances, un renforcement de la réglementation sur la conception et le fonctionnement des tours aéroréfrigérantes, le recensement de ces tours, ainsi que des mesures de prévention liées aux réseaux d'eau chaude sanitaire.

La réduction de 50 % de l'incidence de la légionellose à l'horizon 2008 constitue l'une des actions prioritaires retenues dans le Plan national santé environnement 2004-2008.

1.2 Accroissement de la vulnérabilité de la population (Cloete *et al.*, 2004)

Le nombre de personnes souffrant de déficit immunitaire est en augmentation, associant maladies congénitales et déficit acquis (infection par le VIH en particulier) ou iatrogène (chimiothérapie anticancéreuse, immunodépression après transplantations, corticothérapie prolongée, etc.). Les âges extrêmes de la vie et la grossesse sont des situations également de plus grande fragilité aux infections.

Les épidémies à *Cryptosporidium* d'origine hydrique ont clairement montré la plus grande susceptibilité des malades du sida à ce parasite : chez ces patients, le risque de développer une cryptosporidiose est plus élevé que dans la population immunocompétente, et la maladie est plus grave. Lors de l'épidémie de Milwaukee, 69 décès ont été décrits parmi les personnes immunodéprimées. Pendant une épidémie d'origine hydrique à *Cryptosporidium* dans le Nevada

en 1994, 63 des 78 cas de cryptosporidiose confirmés par examen de laboratoire sont survenus chez des personnes infectées par le VIH, et 32 sont décédées. Plus récemment le sida a été associé à un risque plus important d'infection par d'autres protozoaires que pour la population générale : c'est le cas pour *Cyclospora*, *Isospora belli* et les microsporidies.

Certaines bactéries sont qualifiées d'opportunistes car profitant de l'opportunité offerte par une baisse des défenses de l'organisme pour se développer et entraîner des lésions dans l'organisme. Parmi les bactéries présentes dans les eaux brutes ou l'eau du robinet, nous pouvons citer *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Stenotrophomonas*, *Legionella* et les mycobactéries. L'infection par une bactérie opportuniste souligne le déséquilibre de la relation entre le micro-organisme et l'organisme hôte. Ce déséquilibre peut être de nature immunitaire, comme le sida ou les conséquences d'une chimiothérapie, ou non immunitaire. C'est le cas par exemple des lésions bronchiques provoquées par le tabagisme et du risque de légionellose, ou encore de la baisse de l'acidité gastrique induite volontairement par le traitement d'un ulcère de l'estomac ou d'une œsophagite et du risque de gastro-entérite.

Ces situations illustrent l'importance de l'évolution de facteurs de risque. Les données de prévalence et d'incidence de ces facteurs de risque sont des indices essentiels à prendre en compte pour la mesure de l'impact du risque associé à un micro-organisme dans l'eau du robinet, comme l'indiquent les taux de mortalité chez les malades du sida pendant les épidémies de cryptosporidiose.

1.3 Pollution des ressources en eau par des substances chimiques produites par l'activité humaine

Les risques chimiques de l'eau de boisson sont particulièrement préoccupants en raison des capacités de certaines substances à s'accumuler dans l'organisme ou des dangers de type cancérigène, mutagène ou toxique pour la reproduction.

Le risque est souvent associé au développement d'activités humaines polluantes, mais peut également être en rapport avec des caractéristiques hydrogéologiques locales ou avec des re-largages de matériaux défectueux ou des phénomènes de corrosion. En dehors de situations de pollution accidentelle non contrôlée, le risque lié aux substances chimiques dans l'eau est associé à des expositions prolongées.

Le risque chimique est émergent s'il est associé à de nouveaux dangers (de nouvelles molécules, des effets toxiques découverts récemment), à de nouvelles

conditions d'exposition (situations locales affectant la qualité des ressources), ou encore à une baisse des valeurs recommandées ou des normes, souvent à la suite d'une révision de la relation dose-réponse.

Des progrès analytiques ont été accomplis pour la détection des traces de pesticides, ce qui a permis de mettre en évidence les polluants majeurs puis d'aboutir depuis quelques années à des interdictions d'usage. Ainsi, sur les 834 molécules en usage en Europe jusqu'en 2000, moins de la moitié devraient être conservées à l'issue du processus de ré-homologation actuellement en cours, en application de la directive 91/414/CE. Malgré ces restrictions, la France reste le plus gros consommateur de ces produits en Europe, avec 100 000 tonnes de produits phytosanitaires utilisées chaque année jusqu'en 2000 dans l'agriculture (80 000 en 2002), et 3 000 tonnes utilisées pour l'entretien des voies de communication et par les jardiniers amateurs, (Ifen, 2002). Les pesticides génèrent des résidus, c'est-à-dire des pesticides non transformés, leurs métabolites, leurs produits de dégradation et de réaction qui constituent des mélanges complexes, dont les risques à long terme pour la santé sont encore mal connus. Une synthèse réalisée avec les données des Ddass des années 1993 à 1995 montrait que les pesticides étaient responsables d'un quart des causes de non-conformité des eaux servant à l'alimentation des populations (Communiqué de la prévention et de la précaution, 2002).

Les excès d'apports en azote par les engrais et les épandages de lisiers et de déjections animales sont responsables localement d'une augmentation depuis 20 ans de la teneur en nitrates dans les eaux de surface et les eaux souterraines. Les données scientifiques actuelles concernant le métabolisme des nitrates et celles issues d'études expérimentales et d'enquêtes épidémiologiques indiquent que le risque de toxicité pour l'homme des nitrates dans les eaux a été surestimé au niveau international, tant au sujet de la méthémoglobinémie du nourrisson qu'à celui du risque de cancer (Testud, 2004). Ce sujet fait actuellement l'objet d'une saisine de l'Afssa par la Direction générale de la Santé. Le problème lié aux nitrates et apports azotés est donc surtout celui du phénomène d'eutrophisation des eaux de surfaces. Notamment, les excès d'apport en azote et en phosphore favorisent le développement d'algues dans les eaux de surface, source de désagrément, et de cyanobactéries, dont la prolifération de certaines espèces qui produisent des toxines peut conduire à des risques sanitaires. Un groupe de travail est réuni sous l'égide de l'Afssa pour l'évaluation de la situation française face au risque des cyanobactéries et de leurs toxines. Des recherches sont nécessaires concernant la détection et la prévision de la formation des efflorescences d'algues et de la libération des toxines.

Ce sont également les progrès analytiques qui ont révélé les traces dans les milieux aquatiques de substances suspectes d'effet perturbateur endocrinien. Cette prise de conscience s'est brusquement accélérée au début des années

1990, en même temps que la diffusion de résultats faisant état d'une augmentation chez différentes espèces aquatiques de la fréquence de diverses anomalies affectant l'appareil génital et/ou les différentes fonctions contrôlées par les hormones. Par ailleurs, le concept de syndrome de dysgénésie testiculaire (SDT) est actuellement accepté comme une hypothèse solide à l'explication de l'augmentation des troubles de la fonction reproductive observée chez l'homme. Ce syndrome regroupe une mauvaise qualité du sperme, une augmentation du risque de cancer du testicule, de cryptorchidie (absence de descente du testicule) et d'hypospadias (malformation caractérisée par une ouverture anormale de l'urètre à la face antérieure de la verge). Des études expérimentales et épidémiologiques suggèrent que le SDT serait le résultat d'une perturbation de la programmation embryonnaire et du développement des testicules *pendant la vie foetale*, due à des facteurs environnementaux (incluant des perturbateurs endocriniens) et des défauts génétiques (Skakkebaek *et al.*, 2001 ; Cordier *et al.*, 2003).

Les perturbateurs endocriniens agissent en simulant des hormones naturelles, ou en bloquant leur action, ou encore en affectant leur synthèse, leur transport, leur métabolisme ou leur excrétion. Plus de 600 molécules possèdent un effet perturbateur endocrinien reconnu. Ces molécules sont soit des hormones naturelles sécrétées par les humains et les animaux ou certaines plantes, soit des substances fabriquées par l'homme. Ces dernières comprennent les hormones synthétiques, des pesticides, des additifs de matière plastique, des composés de détergents, des retardateurs de flamme. . . Les rejets de l'activité industrielle, agricole et domestique sont ainsi des sources de pollution de l'environnement. Si la présence de composés perturbateurs dans l'environnement est une réalité, l'existence d'une relation de causalité entre les expositions à ces substances et des pathologies chez l'homme n'est toutefois pas formellement établie et cette problématique mobilise de nombreux chercheurs dans une approche internationale multidisciplinaire.

L'évolution des techniques analytiques permet également de mettre en évidence aujourd'hui une pollution diffuse de l'environnement, et notamment des eaux de surface, par les résidus de médicaments. La présence de médicaments dans l'environnement est principalement liée aux rejets humains après consommation. Les substances actives sont rejetées par l'organisme sous forme brute ou métabolisée, en fonction des propriétés pharmacologiques des composés. Ces rejets sont essentiellement véhiculés par les eaux usées. Parmi plus de 4 000 principes actifs employés aujourd'hui par l'industrie pharmaceutique, certains sont particulièrement résistants aux traitements en stations d'épuration, ainsi qu'aux traitements de potabilisation, si bien qu'une présence de ces molécules à l'état de traces a pu être détectée dans certaines eaux potables (projet européen Poséidon, www.eu-poseidon.com). C'est le cas notamment de produits tels que la carbamazépine (anti-épileptique), et de plusieurs agents de contraste iodés.

Compte-tenu du faible nombre de données écotoxicologiques disponibles sur ces molécules, les conséquences pour l'environnement sont difficiles à estimer, et des travaux sont à mener notamment vis-à-vis des substances anticancéreuses et des perturbateurs endocriniens agissant à très faibles doses. Concernant les antibiotiques, il est nécessaire de réduire la pression sélective pouvant exister du fait de leur dispersion dans l'environnement, laquelle peut induire l'apparition de souches bactériennes résistantes. Pour ce qui concerne l'eau potable, bien que les concentrations mesurées soient extrêmement faibles (l'apport journalier par l'eau potable étant de plusieurs ordres de grandeur inférieur à celui d'un traitement thérapeutique minimal), la question du risque à long terme lié à une ingestion cumulée de mélanges de composés, même à très faibles concentrations, reste sans réponse. Des mesures préventives destinées à traiter la pollution à la source mériteraient d'être étudiées. Les rejets hospitaliers, par exemple, qui contribuent aujourd'hui pour environ 20 % de la charge en produits pharmaceutiques des eaux usées, pourraient ainsi être traités avant entrée dans le réseau collectif d'assainissement. Le traitement séparé des urines, qui véhiculent l'essentiel de la contamination, avant mélange aux eaux usées, est une piste également étudiée par certaines équipes de recherche.

Les désinfectants autorisés pour la production d'eau potable peuvent générer des sous-produits de désinfection. Plus de 500 sous-produits, potentiellement formés à partir des désinfectants les plus utilisés dans le monde (chlore, dioxyde de chlore, chloramines, ozone) ont été identifiés à ce jour. La demande récente de la Direction générale de la Santé à l'Institut de veille sanitaire d'investiguer l'impact sanitaire de la surchloration des réseaux de distribution d'eau potable vise à alimenter la réflexion sur la pertinence de la mise en place d'un dispositif d'observation des effets sanitaires dus aux sous-produits de chloration (Vandentorren *et al.*, 2004).

1.4 Pollution des ressources en eau par des substances chimiques d'origine naturelle

Parmi les éléments minéraux, l'attention doit être toute particulière sur deux éléments : l'arsenic (As) et le fluor (fluorures).

La concentration maximale admissible de l'As, substance cancérogène, a été diminuée de 50 $\mu\text{g/l}$ à 10 $\mu\text{g/l}$ par la directive 98/83/CE. En France, en 1996, plus de 200 000 personnes étaient desservies par des eaux dont la concentration en As dépassait 10 $\mu\text{g/l}$ (Institut de veille sanitaire, octobre 2002). L'Institut de veille sanitaire a réalisé en Auvergne une étude d'évaluation quantitative du risque, publiée en 2002. Cette étude indique, pour les populations exposées à des concentrations d'As hydriques supérieures à 10 $\mu\text{g/l}$, des excès de

risque individuels de cancers cutanés élevés et supérieurs à l'excès de risque dit « acceptable » de 10-5 retenu par l'OMS. Cette étude ne s'adressait pas aux cancers de la vessie et du poumon, dont le risque a été associé dans certaines études à des concentrations d'As hydrique supérieures à 50 $\mu\text{g/l}$, mais pour lesquels nous ne disposons pas de valeur toxicologique de référence. Une étude épidémiologique de type écologique sera mise en œuvre par l'InVS en 2005 pour évaluer ces risques.

Concernant les fluorures, c'est le développement de l'offre d'eaux en bouteille et du comportement sélectif de consommation d'eau de certaines personnes qui peut représenter un risque émergent. En effet, certaines eaux minérales en bouteille ont des concentrations élevées en fluorures, jusqu'à six fois la concentration maximale admissible dans l'eau d'adduction (1,5 mg/l). L'OMS rapporte que le risque de fluorose dentaire peut s'observer pour des concentrations de 0,9 à 1,2 mg/l de fluorures (WHO, 2004). Le risque d'effet adverse sur les tissus osseux existe de par la seule consommation d'eaux minérales à teneur élevée en fluor (6 mg/l ou plus). Ce risque lié au comportement individuel souligne toute l'importance de l'information du public, y compris en matière d'étiquetage (Bligny et Hartemann, 2003).

1.5 Risques liés à la pratique des loisirs aquatiques

Le développement des loisirs aquatiques est une autre cause d'émergence de risques, associés à de nouveaux types d'installations, à de nouvelles activités sportives ou ludiques, ou encore à de nouveaux types de services, s'adressant à des populations particulières comme les handicapés, les femmes enceintes ou les bébés. Les installations regroupent les bassins artificiels tels piscines, parcs aquatiques, spas, etc., où la qualité de l'eau est assurée par la mise en œuvre en continu d'un certain nombre de traitements dont la désinfection, et les sites naturels regroupés sous le terme générique de baignades, parfois aménagés, mais où l'eau n'est pas traitée.

Les dangers qui guettent le baigneur ou le sportif sont soit de nature accidentelle, soit de nature environnementale, biologique, chimique ou physique (Festy *et al.*, 2003). Le risque de noyade est évalué depuis 2001 par l'Institut de veille sanitaire et appréhendé par la mise en œuvre de mesures de prévention techniques et organisationnelles, et d'information et d'éducation.

Les risques liés à l'environnement sont associés à des modes de contact (ingestion, inhalation, contact cutané) qui diffèrent selon l'installation du site, l'activité du pratiquant, son équipement et son comportement.

Concernant les piscines, il convient d'insister sur deux points :

- celui du développement de parcs aquatiques dans lesquels le public dispose de nombreux équipements ludiques. Ces centres se caractérisent par une circulation complexe de l'eau et par des installations de type bains bouillonnants avec circulation rapide de l'eau sous pression, avec un générateur d'air pulsé, et une température de l'eau élevée (35 à 37 °C). La gestion technique de ces grands établissements est complexe, et le risque microbien (légionelles, *Pseudomonas aeruginosa*) est augmenté. Dans une étude du Laboratoire d'hygiène de la ville de Paris en 1996, si la conformité microbiologique des piscines classiques était supérieure à 95 %, celle des bains bouillonnants n'était que de 76,7 %. *Pseudomonas aeruginosa* était la cause de non-conformité dans 58 % des cas pour les bains bouillonnants. Ce risque microbien dans les parcs ludiques aquatiques mérite une meilleure évaluation ;
- celui de la pollution de l'air par les sous-produits de chloration volatils (chloramines et en particulier le trichlorure d'azote, haloformes). Le public connaît bien les sensations d'irritation des yeux, du nez et de la gorge lors de la fréquentation de certaines piscines couvertes. La question qui mérite attention est celle du risque respiratoire lors de l'exposition habituelle ou répétée à ces polluants dans l'air des piscines couvertes. Des études récentes chez le personnel des piscines et chez des enfants d'âge scolaire suggèrent une possible relation entre l'exposition répétée aux sous-produits de chloration dans l'air des piscines et le risque d'asthme (Nemery *et al.*, 2002 ; Bernard *et al.*, 2003). Des travaux complémentaires sont nécessaires, et ce d'autant plus que la population considérée est importante.

La pratique des loisirs aquatiques en baignades (eau douce) expose avant tout à des risques microbiologiques (risque fécal, leptospirose, dermatite à cercaires), et à des risques toxiques et allergiques en rapport avec les cyanobactéries. Une revue des études épidémiologiques publiées a été conduite en 1998 par l'OMS (Prüss, 1998), dans le but d'établir des valeurs guides pour la qualité microbiologique des eaux de baignades. Dans la majorité des études, il existait une relation dose-réponse entre la qualité microbienne de l'eau (*Escherichia coli* pour les eaux douces) et le taux de symptômes gastro-intestinaux. Ces symptômes apparaissaient pour des valeurs bien inférieures aux normes de qualité microbiologique relative aux eaux de baignade à l'intérieur de l'Union européenne. Une révision de la directive 76/160/CE, nécessaire également pour assurer une cohérence avec la directive cadre sur l'eau (2000/60/CE), est en cours. Une réflexion s'impose par ailleurs sur les risques sanitaires associés à la pratique d'autres activités aquatiques en fort développement (canyoning,

rafting, hydrospeed, . . .), dans des eaux qui ne répondraient pas aux critères admis pour la baignade.

1.6 Influence du climat et de ses variations

Les facteurs climatiques ont une influence importante sur diverses maladies infectieuses. Les changements climatiques observés ainsi que les phénomènes extrêmes qui pourraient les accompagner s'associent aux facteurs démographiques, environnementaux, sociaux et techniques pour expliquer l'émergence ou la réémergence de certaines maladies infectieuses (Cloete *et al.*, 2004 ; Mc Michael *et al.*, 2003).

La hausse des températures favorise la reproduction des insectes vecteurs et réduit la durée de maturation de l'agent pathogène dans l'organisme du vecteur. Le phénomène El Niño/oscillations océaniques (El Niño/*Southern Oscillations*, ENSO) augmente par exemple le risque de paludisme dans les régions en bordure de désert ou en altitude, où la transmission du parasite est instable en raison de périodes sèches. L'augmentation des températures et/ou des pluies associées à ENSO favorise la reproduction des moustiques vecteurs anophèles et ainsi la transmission du paludisme. Les populations ayant une faible immunité à cause de la diminution de la transmission du paludisme pendant plusieurs années de faible pluviométrie sont alors exposées à un risque d'épidémie et de formes graves plus fréquentes. Au Venezuela et en Colombie, l'incidence du paludisme est augmentée de plus d'un tiers dans les suites de périodes de sécheresse liées à ENSO. En Afrique du Sud, des régions ont récemment subi des épidémies de paludisme à la suite de chutes de pluies inhabituelles. Rappelons que plus de 40 % de la population mondiale vit dans une zone de transmission du paludisme, et que 700 000 à 2,7 millions de personnes meurent du paludisme chaque année, dont 75 % d'enfants africains.

La dengue, maladie virale transmise par une autre espèce de moustique, *Aedes*, est devenue un problème majeur de santé publique dans les régions tropicales et subtropicales (www.cdc.gov/ncidod/dvbid/dengue/index.htm). Les vingt dernières années ont été marquées par une extension des zones d'endémie et une explosion du nombre d'épidémies de dengue et de personnes infectées. L'OMS estime qu'actuellement 2,5 milliards de personnes, soit les deux cinquièmes de la population mondiale, sont exposées au risque de dengue dans plus de 100 pays, avec 50 à 100 millions de cas par an, dont plusieurs centaines de milliers de formes hémorragiques. L'absence de contrôle de la prolifération des moustiques, une urbanisation incontrôlée et galopante accompagnée d'une gestion au domicile insuffisante des réserves d'eau, des effluents et des déchets explique en grande partie cette explosion endémo-épidémique de la dengue, favorisée par l'accroissement des transports par voie aérienne. La relation entre

les conditions météorologiques et l'incidence de la dengue n'est pas encore clairement évaluée, mais des études ont toutefois montré une association entre le phénomène ENSO et l'incidence de la dengue dans des pays où l'effet météorologique d'ENSO est important, comme par exemple dans les îles du Pacifique et en Indonésie.

L'impact de chutes de pluie importantes et d'inondations sur la survenue d'épidémies a été constaté avec d'autres micro-organismes : c'est le cas de la fièvre de la Vallée du Rift en Afrique de l'Est et de l'encéphalite de la Vallée Murray en Australie, transmises par la piqûre de moustiques, de la leptospirose, de la tularémie et de fièvres hémorragiques virales associées à la prolifération des rongeurs. La maladie de Lyme et l'encéphalite à tique d'Europe centrale sont d'autres maladies vectorielles influencées par la variabilité du climat.

Le risque de transmission de maladies infectieuses féco-orales est également augmenté par les fortes pluies et inondations qui favorisent le transport et la dissémination des pathogènes. Les conséquences des fortes pluies, de la fonte des neiges et des phénomènes de ruissellement sur les concentrations des eaux de surface en Protozoaires (*Cryptosporidium*, *Giardia*) ont bien été étudiées. Il a été démontré qu'un simple orage violent pouvait contribuer pour environ 4 % de la charge annuelle d'une ressource en eau en *Cryptosporidium* et *Giardia*. Par ailleurs, des températures basses favorisent la survie des micro-organismes dans l'environnement. Sur le plan épidémiologique, de nombreuses épidémies ont été rapportées aux États-Unis et au Royaume-Uni dans des périodes faisant suite à des chutes de pluie importantes.

Le choléra mérite une attention toute particulière en raison de l'importance de la menace en termes de santé publique, mais également pour les enseignements tirés de l'histoire de sa diffusion pandémique et des connaissances acquises de ses relations avec le climat. En effet, *Vibrio cholerae* peut vivre et se multiplier dans le plancton qui lui offre un réservoir protecteur. La migration du plancton qui remonte dans les estuaires entraîne la contamination des ressources en eau des villages avoisinants. La relation entre ENSO et l'incidence du choléra dans certaines régions dans le monde, comme au Bangladesh, a clairement été établie.

L'influence d'ENSO sur la pollution fécale humaine de l'eau a également été démontrée dans le sud de la Floride. La relation entre les inondations et les épidémies d'hépatite E en zone intertropicale est actuellement bien connue.

En conclusion, les changements climatiques à venir, prévus et imprévus, vont avoir un impact sur les maladies associées à l'eau (vectorielles et féco-orales) qu'il convient d'appréhender de façon pluridisciplinaire. Un objectif essentiel sera de développer une démarche pro-active de prévision d'épidémies d'origine

hydrique en fonction des données d'alerte climatique, afin de mettre en place rapidement une stratégie efficace.

1.7 Nécessité de hiérarchiser les dangers

Face à la multiplication de ces préoccupations nouvelles, un travail de hiérarchisation des dangers devient désormais nécessaire, afin d'établir les priorités en matière d'orientation de la recherche, et en matière de maîtrise et de gestion des risques. Aux États-Unis, cette mission a été confiée à l'Environmental Protection Agency (EPA). L'agence doit établir et mettre à jour tous les cinq ans une liste de contaminants (*Contaminant Candidate List*) pour lesquels des actions sont requises. Une première liste, comportant 50 contaminants chimiques et 10 contaminants biologiques, a été publiée en 1998. Cette liste distingue trois catégories de contaminants :

- ceux considérés comme prioritaires pour la recherche ;
- ceux pour lesquels l'acquisition de données d'occurrence est nécessaire ;
- ceux qui devront être pris en considération dans les réglementations sur l'eau potable.

Il n'existe aujourd'hui aucun équivalent européen ni français de cette procédure.

La hiérarchisation des dangers et l'évaluation des risques fait appel à des compétences scientifiques de différentes natures. En France, ces compétences existent, mais sont très dispersées, entre les nombreux laboratoires de contrôle des eaux, les laboratoires des instituts de recherche publics et privés, et les organismes institutionnels (DGS, MEDD, InVS, Afssa, Afsse, CSHPF, Drass, Ddass, Drire, agences de l'eau...). Aucune structure française ne permet aujourd'hui de dégager la synergie nécessaire, en réunissant l'ensemble des compétences couvrant les domaines de l'environnement, des traitements de potabilisation et d'assainissement, et de la santé publique, alors que de telles structures existent déjà dans certains États européens (KIWA aux Pays-Bas, DVGW en Allemagne, WRC en Grande-Bretagne), et permettent à ces États, grâce à leurs experts, de bénéficier d'une bien meilleure représentation dans les instances de décision internationales (OMS, Commission européenne).

Encadré 3.4

Eau et santé : orientations définies dans le Plan national santé environnement, février 2004¹

Olivier Schlosser, Suez Environnement

En France, les risques liés à l'eau destinée à la consommation humaine ont fait l'objet d'un chapitre Diagnostic dans le rapport de la Commission d'orientation du Plan national santé environnement publié en février 2004. La commission souligne en conclusion de ce chapitre que la gestion des risques sanitaires liés à l'eau doit être abordée dans la globalité du cycle de l'eau, et qu'actuellement, la préoccupation majeure concerne la dégradation des ressources. Elle attire également l'attention sur les enjeux liés à la maîtrise de la fiabilité des petites installations de traitement et des réseaux de distribution, sur la nécessité d'améliorer les méthodes analytiques et les connaissances concernant certains micro-organismes et contaminants chimiques et leurs impacts sanitaires, ainsi que sur l'insuffisante préoccupation au sujet de la consommation croissante d'eaux embouteillées fortement minéralisées.

Dans sa conclusion générale, la commission retient comme enjeux prioritaires concernant l'eau :

- l'impérieuse nécessité de protéger les ressources en eau ;
- la prévention contre la légionellose ;
- et, en commun avec les autres milieux considérés, le renforcement des dispositifs de surveillance environnementale et épidémiologique, leur meilleure exploitation, et leur mise en relation.

Toutefois, la méthodologie qui a permis d'aboutir à ces priorités n'est pas clairement expliquée dans ce rapport, et aucune méthodologie n'est proposée pour les versions futures du PNSE. La démarche mise en œuvre depuis 1998 par l'Institut de veille sanitaire pour établir les priorités de travail de son département Santé Environnement pourrait cependant constituer une référence intéressante dans ce domaine. Elle repose sur un classement des problématiques selon cinq critères : importance de l'exposition, importance de l'effet adverse, pertinence méthodologique, pertinence politique et sociale, et pertinence d'intervention.

¹www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/pnse/sommaire.htm

Il est important de rappeler cependant que, face à ces risques émergents, l'eau n'est pas le seul vecteur. L'établissement de priorités nécessite donc de prendre en compte également les apports possibles par d'autres sources.

Par ailleurs, si l'amélioration du niveau de l'hygiène est une hypothèse possible pour expliquer l'augmentation constatée de l'incidence des maladies auto-immunes et allergiques dans les pays industrialisés (encadré 3.5), ce concept doit néanmoins être utilisé avec grande prudence dans une démarche de santé publique, et ne saurait remettre en question les objectifs de qualité microbiologique de l'eau.

Encadré 3.5

Un effet inattendu de la décontamination de l'eau potable

Jean-François Bach, membre de l'Académie des sciences

On assiste depuis une trentaine d'années dans les pays industrialisés à une augmentation régulière de la fréquence des affections immunitaires, notamment des maladies allergiques et auto-immunes (comme la sclérose en plaques ou le diabète insulino-dépendant). Des corrélations ont été établies au niveau collectif mais aussi au niveau individuel entre la survenue de ces maladies et le niveau socio-économique et plus particulièrement les conditions sanitaires de l'habitat. La question s'est posée de la relation qui pourrait exister entre l'amélioration de la qualité de la médecine et de l'hygiène dans les pays développés et l'augmentation de la fréquence des maladies immunitaires. L'étude des modèles animaux de ces maladies a démontré que de très nombreuses infections, notamment bactériennes ou virales, pouvaient prévenir la survenue de ces maladies. L'étude de populations migrant de pays peu développés vers des pays industrialisés, qui montre l'augmentation immédiate de la fréquence de ces maladies dans les familles d'immigrés, a confirmé le rôle de l'environnement au-delà de celui plus marginal de la génétique. L'analyse des facteurs contribuant à la diminution des infections dans les pays développés indique clairement le rôle essentiel joué par la réduction de la contamination microbienne des eaux de boisson. On sait en effet qu'un grand nombre d'agents infectieux à l'origine de maladies étaient véhiculés par l'eau de boisson. C'est notamment le cas des agents responsables des infections intestinales particulièrement graves dans l'enfance et du virus de l'hépatite A. Il est important de noter, dans ce contexte, le rôle central joué par les infections intestinales dans la protection des maladies immunitaires. Il est également intéressant de mentionner le rôle protecteur direct de l'infection par le virus de l'hépatite A vis-à-vis des maladies allergiques. Il a été récemment démontré que le récepteur de ce virus était

exprimé à la surface des lymphocytes impliqués dans la pathogénie de ces maladies.

L'ensemble de ces observations, qui suggèrent un rôle favorable inattendu d'une pollution microbienne de l'eau, ne remet en rien, bien sûr, en question les efforts réalisés pour assurer la décontamination de l'eau potable. La persistance d'un nombre élevé d'infections intestinales chez les très jeunes enfants reste un problème majeur de santé publique dans les pays en développement. Ces observations éclairent d'un jour nouveau l'évolution de l'épidémiologie des maladies immunitaires. Elles doivent inciter à la recherche active de stratégies de vaccinothérapie qui pourraient remplacer les infections issues de la consommation d'eau polluée, avec l'espoir de contribuer à la prévention des maladies immunitaires.

2 | Enjeux spécifiques aux pays en développement

Les risques émergents cités précédemment s'appliquent autant — parfois plus — aux pays du Sud qu'à ceux du Nord, mais leur poids sur la santé de la population est minime au regard de celui des maladies hydriques « classiques », en particulier les maladies diarrhéiques (2 000 000 de décès par an, en majorité des enfants de moins de 5 ans).

Cette situation résulte plus du défaut d'accès à des infrastructures appropriées d'eau potable et d'assainissement, et de l'insuffisance des pratiques d'hygiène, que d'un déficit de connaissances scientifiques. Néanmoins, on peut citer à titre d'exemple trois thèmes qui nécessiteraient un effort de recherche accru : améliorer l'information statistique, évaluer les bénéfices de l'accès à l'eau potable et à l'assainissement et promouvoir une réutilisation contrôlée des eaux usées.

2.1 Améliorer l'information statistique

L'information disponible sur l'accès effectif aux services essentiels d'eau potable et assainissement, sur le niveau de ceux-ci, sur la contamination des ressources, est souvent médiocre. Les données communiquées par beaucoup de gouvernements aux organisations internationales ne peuvent en l'état constituer des indicateurs de progrès crédibles et mobilisateurs vers les « Objectifs du Millénaire pour le Développement » établis pour l'eau et l'assainissement par les Nations unies (encadré 3.6).

Les outils et méthodes statistiques employés par l'OMS et l'Unicef pour mesurer et rendre compte des progrès de l'accès aux services essentiels d'eau/assainissement (Joint Monitoring Programme²) doivent bénéficier de moyens renforcés. La France a introduit des propositions dans ce sens au troisième Forum mondial de l'Eau (Kyoto, 2003), suggérant la création d'un « Observatoire Mondial de l'eau potable et de l'assainissement ». Il s'agirait d'un dispositif cohérent, articulé aux niveaux national, régional, et mondial, visant à améliorer les capacités des organismes chargés de recueillir, auditer et rendre publiques les données sur l'accès à l'eau potable et à l'assainissement de base.

Encadré 3.6

Eau et santé, un thème transversal des Objectifs du Millénaire pour le Développement

Jacques Labre, Suez Environnement

En septembre 2000, l'Assemblée générale de l'ONU adoptait les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD)³. Pour la première fois, la communauté internationale se donnait ainsi des objectifs de développement comportant des indicateurs de progrès quantifiés et déclinés dans le temps. L'eau est explicitement mentionnée dans le cadre de l'objectif N° 7 (« assurer un environnement durable ») ; le but visé est une réduction de moitié, entre 1990 et 2015, de la proportion de la population mondiale n'ayant pas accès à une eau potable sûre.

Le Sommet du développement durable de Johannesburg (août 2002) a étendu cet objectif de manière analogue à l'accès à l'assainissement de base. Mais la mise à disposition de services appropriés d'eau potable et d'assainissement est aussi un prérequis pour d'autres OMD qui visent la santé :

- Objectif n° 4 : réduire des deux tiers la mortalité infantile ;
- Objectif n° 5 : réduire de trois quarts le taux de mortalité maternelle ;
- Objectif n° 6 : combattre le sida, le paludisme et d'autres grandes maladies.

L'eau joue également un rôle critique dans au moins deux autres OMD, et pas uniquement à travers des enjeux sanitaires :

²<http://www.wssinfo.org>

³<http://www.un.org/french/millenniumgoals/>

- réduire l'extrême pauvreté et la faim. Les maladies hydriques ont un coût direct élevé pour les familles pauvres (dépense en médicaments, etc.) mais aussi un coût indirect lié à la perte de journées de travail ou de soin des enfants. En outre, elles se traduisent — tout particulièrement les vers intestinaux — par une mauvaise assimilation des nutriments. Enfin, le temps passé à se procurer l'eau qui n'est pas disponible à proximité de la maison, ou les ressources consacrées à l'acheter à des vendeurs à domicile, affectent plus encore le temps ou le revenu disponible ;
- promouvoir l'égalité des sexes et l'autonomie des femmes. Les femmes sont les premières touchées par l'astreinte de la corvée d'eau, par l'atteinte à leur dignité et leur sécurité liée à l'absence de latrines, etc.

La fixation d'un objectif quantifié par un indicateur unique pour rendre compte des progrès dans l'accès à l'eau potable et à l'assainissement pose de délicats problèmes de méthode :

- comment définir objectivement le caractère « approprié » de l'accès à l'eau potable et à l'assainissement ? L'Organisation mondiale de la santé a proposé une nomenclature de niveaux de services, fondée sur les infrastructures en place, avec une dichotomie entre services dits « améliorés » (par exemple, une borne-fontaine située à moins d'un km du domicile) et « non améliorés ». Les indicateurs publiés par l'ONU se réfèrent au pourcentage de la population ayant accès à des services « améliorés ». Mais, dans la réalité, l'adéquation du service dépend beaucoup du mode d'habitat (urbain dense, périurbain, rural...); en outre, des informations pertinentes comme la qualité de l'eau, les quantités employées, le temps passé à se la procurer... ne sont pas prises en compte ;
- les moyens statistiques employés sont limités. Il s'agit d'enquêtes auprès d'échantillons de ménages, dont les résultats peuvent différer fortement des statistiques nationales affichées par les gouvernements ;
- les OMD sont définis pour le monde entier, mais les progrès effectifs sont très contrastés selon les pays.

Les résultats intermédiaires publiés à mi-parcours de la période de référence (2003)⁴ montrent que les progrès mondiaux sont en ligne avec les objectifs pour l'eau potable. Cependant, 3 milliards d'hommes n'ont pas de branchement d'eau à leur domicile, et 1,1 milliard n'ont pas encore accès à un service dit « amélioré ». La performance moyenne, imputable surtout aux

⁴http://www.wssinfo.org/en/40_MDG2004.html

progrès de la Chine et de l'Inde, ne doit pas masquer que l'Afrique subsaharienne est très en retard sur les OMD. En ce qui concerne l'assainissement, 2,6 milliards d'habitants (la moitié de la population des pays en développement) ne disposent pas encore d'un système « amélioré » et les OMD ne seront globalement atteints que si une accélération significative survient au cours des prochaines années.

Même s'il reste économiquement possible à l'échelle mondiale, le défi posé par les OMD pour l'eau est considérable : compte tenu de la croissance démographique, il suppose qu'entre 2003 et 2015, 340 000 personnes supplémentaires puissent accéder à l'eau potable chaque jour, et 460 000 à l'assainissement de base.

2.2 Évaluer les bénéfices de l'accès à l'eau potable et à l'assainissement

Le bénéfice macro-économique correspondant à l'amélioration de la santé au sein d'une communauté ayant accès à des services appropriés d'eau potable/assainissement reste très difficile à évaluer. Dans les PED, la « valeur de l'eau » mesurée par le coût sanitaire du nonaccès à l'eau est très certainement supérieure au consentement à payer pour l'accès au service. Mais faute d'une méthode reconnue d'évaluation des « externalités positives », le secteur de l'eau/assainissement conserve souvent un trop faible niveau de priorité dans les décisions budgétaires des gouvernements et des bailleurs de fonds.

De premiers efforts de recherche ont été engagés dans ce sens sous l'égide de l'OMS en 2003 (Hutton et Haller, 2004) ; ils montrent que les investissements dans les systèmes d'eau potable et d'assainissement ont des effets macro-économiques variables selon les situations locales, mais offrent dans toutes les hypothèses une rentabilité collective élevée si l'on valorise les effets en termes de coûts évités⁵. Ces estimations macro-économiques contrastent avec l'analyse micro-économique pour l'organisation gestionnaire, qui dégage le plus souvent une rentabilité faible ou négative : le revenu qu'elle perçoit (tarif payé par l'utilisateur), ne représente qu'une fraction de l'« utilité collective » du système.

⁵Selon l'étude citée, 1 dollar investi (en coût global) dans l'amélioration des services d'eau et/ou d'assainissement produit, selon les régions et les actions, un bénéfice actualisé pour la collectivité de 5 à 28 dollars. Une part significative de ce bénéfice réside simplement dans le gain de temps dans la vie quotidienne.

Encadré 3.7

Les leçons du retour du choléra en Amérique latine

Jacques Labre, Suez Environnement

En 1991, le Pérou fut frappé d'une épidémie de choléra qui s'est par la suite propagée dans la plupart des pays voisins, dans un continent où cette maladie avait disparu depuis la fin du XIX^e siècle. On a estimé à 1 000 000 le nombre de personnes affectées, et à 10 000 celui des décès. Les pertes économiques du Pérou, calculées uniquement sur le manque à gagner en termes de commerce extérieur (consécutivement à l'interdiction d'exportation de certains produits alimentaires comme les coquillages, et à la baisse des flux touristiques) ont été évaluées à environ un milliard de dollars.

Les causes initiales de l'épidémie n'ont pas été totalement élucidées : a été évoquée la consommation de mollusques contaminés par les eaux usées d'un cargo en provenance de Chine, conjuguée avec des conditions climatiques exceptionnelles propices à la survie des vibrions cholériques (pluies diluviennes associées à une occurrence d'El Niño).

Mais l'épidémie n'a pu se transmettre rapidement à diverses provinces du pays que par contamination fécale de l'eau de boisson. Les enquêtes ont mis en évidence le manque de continuité dans la chloration de l'eau potable dans beaucoup de collectivités. À cette époque, certains responsables péruviens auraient douté des vertus de la chloration, à la suite de la parution d'un rapport de l'EPA des États-Unis, mettant en garde contre les risques de cancers liés aux THM (sous-produits de chloration). En outre, le service étant souvent intermittent, les réseaux de distribution pouvaient se trouver en dépression et être contaminés par des infiltrations d'eaux usées. Cet épisode est riche en enseignements :

- la bataille contre les maladies hydriques n'est jamais définitivement gagnée ;
- certaines craintes qui se sont fait jour dans les pays développés au sujet des « effets secondaires » des techniques traditionnelles de génie sanitaire comme la chloration, peuvent avoir des effets très dangereux dans les pays en développement en conduisant à « baisser la garde » vis-à-vis des maladies hydriques ;
- les pertes économiques enregistrées en quelques semaines ont représenté plus de trois fois l'investissement du Pérou dans les infrastructures d'eau potable et assainissement, au cours de toute la décennie 1980

(300 millions de dollars). Si elles avaient été valorisées en termes de coûts évités, ces infrastructures auraient certainement bénéficié d'un plus grand degré de priorité.

2.3 Promouvoir une réutilisation contrôlée des eaux usées

La réutilisation des eaux usées est de plus en plus perçue comme un élément important de la gestion intégrée des ressources. Cette pratique peut constituer à la fois un risque sanitaire lorsqu'elle est incontrôlée, et une solution vertueuse pour l'économie de la ressource et la réduction des rejets aux milieux naturels lorsque ces mêmes risques sont maîtrisés. Dans de nombreux pays en développement, les agriculteurs utilisent trop souvent des effluents bruts non traités pour irriguer leurs cultures. Cette pratique est à l'origine de maladies entériques et parasitoses pour la population locale et les touristes ; elle constitue également un risque sanitaire pour les travailleurs agricoles.

La contrainte majeure pour le développement de la réutilisation des eaux usées en Europe est le manque de législation claire au niveau européen avec des recommandations de niveaux de qualité raisonnables, pragmatiques et économiquement accessibles pour les différents types de réutilisation. La même situation prévaut dans les pays en développement où, faute de doctrine claire, la tendance des autorités régulatrices est d'imposer des normes sécuritaires qui rendent en fait très difficile la sécurisation progressive des pratiques de réutilisation incontrôlée. La réutilisation des eaux usées en agriculture constitue l'usage le plus répandu, particulièrement dans les pays en développement situés dans les zones arides ; mais il n'y a pas encore de consensus quant aux normes de qualité bactériologique et chimique à exiger pour les eaux d'irrigation.

Un besoin pressant de recherche existe pour le développement de méthodes et d'outils d'évaluation des risques sanitaires microbiologiques et chimiques liés à la réutilisation de l'eau usée. Pour simplifier et rendre réellement possible le contrôle de la qualité bactériologique des eaux recyclées, il est impératif d'identifier de nouveaux indicateurs plus fiables et plus représentatifs de la présence potentielle de bactéries pathogènes, de parasites et de virus.

Un deuxième axe de recherche est nécessaire pour établir de bonnes pratiques de réutilisation en agriculture, visant à protéger la santé publique, l'environnement et la qualité des produits. Même si l'irrigation constitue en elle-même une étape de traitement des eaux usées grâce à la capacité épuratrice du sol, un niveau minimum de traitement est requis avant toute utilisation agricole, comme

pour l'irrigation d'espaces verts. Le niveau de traitement à appliquer dépend du degré de risque toléré pour la santé des agriculteurs et des consommateurs, du niveau de prévention souhaité face aux dommages potentiels sur les sols et les cultures, et doit également prendre en compte la dégradation de la qualité de l'eau pendant le stockage. Pour assurer la compétitivité économique des projets, il est indispensable d'envisager d'autres moyens de protection de la santé publique en complément de la filière de traitement tels que la restriction de la nature des cultures autorisées à recevoir des eaux réutilisées, le choix de la méthode d'irrigation, le contrôle de l'accès public, la communication et l'éducation du public.

En plus de la demande d'innovations technologiques, la réutilisation des eaux usées nécessite des efforts importants de recherche dans le domaine des sciences humaines pour bien comprendre et maîtriser les phénomènes sociopsychologiques et culturels de la perception du public et des attitudes des usagers.

L'analyse de la situation globale de la réutilisation dans le bassin méditerranéen a mis en évidence le manque d'études économiques sérieuses du coût réel de la réutilisation des eaux usées (traitement, irrigation, rendements agricoles, coûts de fonctionnement). Par conséquent, beaucoup de décideurs hésitent à se lancer dans une aventure dont ils n'appréhendent pas les coûts réels. Des recherches scientifiques sérieuses et approfondies sont indispensables pour mettre en évidence également les avantages macroéconomiques de la réutilisation des eaux usées.

2.4 Systèmes alternatifs d'assainissement

En raison du coût considérable des systèmes d'assainissement conventionnels, beaucoup pensent que les pays en développement devront recourir à des systèmes alternatifs d'assainissement décentralisés qui incluent la possibilité de réutilisation des effluents à proximité du lieu de leur production, après traitement approprié (et éventuellement séparation à la source). Garantir un niveau convenable de protection de la santé avec ces systèmes alternatifs exigera une grande rigueur dans les pratiques, et des innovations en matière de technologie et de normes.

3 | Évolution des outils méthodologiques et normatifs

3.1 Analyse et gestion du risque sanitaire

Depuis leur apparition en Europe au XIX^e siècle, les réglementations sur la qualité de l'eau potable ont pour objectif principal de protéger la santé du

consommateur. Depuis cette époque, ces réglementations reposent sur un principe simple : c'est la conformité à une liste de paramètres qui définit la potabilité. Pour protéger le consommateur du risque infectieux notamment, le concept d'indicateur fécal utilisé jusqu'à nos jours a contribué à lutter efficacement contre les grandes épidémies de maladies infectieuses transmises par l'eau de boisson, telles que le choléra ou la fièvre typhoïde, qui ont sévi jusqu'au début du XX^e siècle.

Aujourd'hui cependant, il est reconnu que cette approche de la gestion de la qualité de l'eau a atteint ses limites d'efficacité, pour plusieurs raisons :

- les listes de paramètres ne reflètent pas la diversité des polluants et pathogènes présents dans l'environnement, susceptibles de traverser les filières de production d'eau potable ;
- la vérification de la conformité de l'eau repose sur un échantillonnage qui ne peut être représentatif des volumes produits ;
- enfin, la vérification de la conformité est un processus essentiellement réactif. En effet, quelle que soit la méthode d'analyse utilisée, et quelle que soit sa rapidité, lorsque le résultat de l'analyse est connu, l'eau est déjà distribuée au consommateur.

La nouvelle approche proposée depuis septembre 2004 par l'Organisation mondiale de la santé, introduit un cadre réglementaire totalement différent, permettant d'éviter ces inconvénients (WHO, *Guidelines for Drinking Water Quality, third edition*, septembre 2004). Cette nouvelle approche, basée sur les méthodologies d'évaluation et de gestion des risques, repose sur trois principes :

- la fixation d'objectifs de santé publique, par les autorités sanitaires ;
- la mise en place, par les producteurs d'eau potable, d'une démarche d'évaluation des risques spécifiques à chaque installation, de la ressource jusqu'au robinet du consommateur, et de plans de prévention de ces risques (*Water Safety Plans*) ;
- l'organisation, par les autorités sanitaires, d'une surveillance des plans de prévention des risques, et de l'état de santé des populations.

Cette approche ne se substitue pas à l'approche classique basée sur la vérification *a posteriori* de la qualité de l'eau, mais la complète utilement en permettant une meilleure prévention des risques. Elle a reçu l'approbation de la Commission européenne, et son introduction progressive dans la réglementation européenne de l'eau potable est d'ores et déjà envisagée au cours des

dix prochaines années (DG Environnement, Drinking Water Seminar, octobre 2003). Sa mise en application générera de nouvelles responsabilités et de nouveaux besoins pour les autorités sanitaires et les producteurs/distributeurs d'eau potable. Il faudra notamment :

- *pour les autorités sanitaires :*
 - définir les indicateurs de santé publique à utiliser,
 - fixer des objectifs de santé publique à l'aide de ces indicateurs,
 - mettre en place les moyens de mesure des niveaux d'endémie, et de détection des épidémies générées par l'eau de boisson. Les actions engagées récemment dans ce domaine par l'Institut de veille sanitaire méritent d'être soutenues ;

- *pour les producteurs d'eau potable :*
 - mettre en œuvre des méthodologies d'analyse et gestion du risque, telles que HACCP (*Hazard Analysis, Critical Control Points*), et analyse quantitative du risque microbiologique, et ceci pour chaque installation de production,
 - renforcer les moyens de surveillance de leurs ressources en eau (ce qui suppose une amélioration des techniques analytiques existantes, celles-ci ayant été développées essentiellement pour une application sur des eaux potables),
 - mettre en place les moyens de traitement adaptés,
 - mettre en place les moyens de contrôle en ligne adaptés.

Cette approche pourra s'appliquer aux risques liés aux pollutions environnementales chroniques, aux catastrophes naturelles (inondations, notamment) et technologiques, aussi bien qu'aux risques découlant des conflits armés, ou encore d'actes terroristes.

On peut remarquer que la France a déjà partiellement intégré ce type d'approche dans sa réglementation, puisque le décret 2001-1220 du 20 décembre 2001, relatif à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine, comportait déjà une incitation forte au recours à l'analyse et la gestion des risques. Les plans HACCP déjà développés sur quelques sites pilotes, par les producteurs d'eau potable, devront être validés par les autorités sanitaires en vue d'un déploiement de la démarche à l'ensemble des installations.

Encadré 3.8

Les difficultés d'évaluation et de gestion des risques chroniques liés aux mélanges de micropolluants

Yves Lévi, faculté de pharmacie, université Paris-Sud

L'eau est un excellent solvant et sert, par ailleurs, de réceptacle terminal aux traces de la plupart de nos déchets, ce qui conduit à y détecter des mélanges plus ou moins complexes de molécules organiques et minérales. Les problématiques sanitaires les plus souvent évoquées portent sur les risques liés aux effets mutagènes, cancérogènes ou perturbateurs endocriniens de ces molécules appartenant, entre autres, aux différentes familles de pesticides, de plastifiants, de résidus de médicaments, de détergents, d'hydrocarbures ou de solvants.

Les laboratoires de contrôle ne pourront jamais analyser, dans les eaux, avec une fréquence et un coût acceptable, le panel complet de toutes les molécules suspectées d'effets sanitaires. Il est donc majeur de poursuivre le développement de méthodes d'analyse de trace multirésidus au meilleur coût. La recherche et la technologie doivent tenter de développer des analyseurs automatiques pour garantir la surveillance de la qualité des ressources en temps réel ou semi-réel puisque la pollution, très liée aux variations de la pluviométrie, peut être très variable sur un cycle de 24 heures.

En parallèle, les laboratoires devraient disposer de nouvelles méthodes d'approche des risques mutagènes et reprotoxiques basées sur des modèles biologiques permettant, même en l'absence d'identification de la nature exacte des dangers (les molécules et leurs mélanges), de donner un signal interprétable en matière de risque pour l'homme. Le développement de ces outils permettra une avancée significative dans l'évaluation des risques potentiels mais n'est pas suffisante pour calculer avec précision les risques chez l'homme à moyen ou long terme. Si les extrapolations sont parfois possibles pour des molécules très bien étudiées par les toxicologues sur de nombreux modèles, il n'en est pas de même des effets suspectés sur des mélanges complexes ingérés et métabolisés par nos organismes. Les molécules doivent franchir des barrières et peuvent induire des effets synergiques ou antagonistes qui rendent probablement irréaliste la modélisation des phénomènes observés.

L'objectif est donc majeur et ambitieux de permettre l'évaluation des différents risques sanitaires après une mesure des expositions. La multidisciplinarité est un facteur critique dans cette problématique puisque les progrès scientifiques et technologiques doivent être accomplis dans les domaines de la chimie analytique, la toxicologie, la biologie du développement, l'épidémiologie et l'analyse du risque.

3.2 Indicateurs d'impact sanitaire

L'évaluation de l'impact sanitaire d'un problème de santé dans la population nécessite la définition d'un ou de plusieurs indicateurs. Cette évaluation est indispensable pour comparer les poids respectifs des différentes pathologies et, considérant la charge économique, le défi technologique et l'engagement institutionnel, pour définir les priorités en matière de politique de santé publique.

L'évaluation du risque et la mesure de l'impact sanitaire ne sont pas des fins en soi ; elles sont destinées à améliorer la gestion du risque pour diminuer l'incidence des maladies. La gestion du risque nécessite la définition d'objectifs sanitaires, qui doivent pouvoir s'appuyer sur des indicateurs adaptés auxquels sont rattachées des valeurs de référence définies par les pouvoirs publics. Ainsi, la définition des valeurs recommandées et de normes en matière de qualité de l'eau devrait être fondée sur les résultats de cette évaluation du risque et sur la notion de niveau de risque de référence, et non pas sur celle de performances analytiques.

L'OMS, dans la troisième édition des *Directives de qualité pour l'eau de boisson* (2004), décrit la nouvelle approche pour définir un niveau de risque de référence, fondée sur l'application du DALY (encadré 3.9). L'établissement des valeurs recommandées par l'OMS pour les différents contaminants de l'eau est fondée sur un niveau de risque de référence de 10^{-6} DALY par personne-année, ce qui est approximativement l'équivalent du niveau de risque de référence de 10^{-5} cancers en excès sur la vie entière retenu dans les éditions précédentes des *Directives de qualité pour l'eau de boisson* pour déterminer les valeurs recommandées concernant les substances cancérigènes génotoxiques. Concernant les micro-organismes pathogènes responsables de diarrhées aqueuses avec un faible taux de mortalité, ce niveau de risque de référence est l'équivalent d'un risque de maladie de 1/1 000 par individu et par an, soit 1/10 sur la vie entière. L'OMS souligne que le niveau de risque de référence peut être adapté aux circonstances locales sur la base d'une approche de type bénéfice-risque, considérant notamment le pourcentage de risque attribuable à l'eau de boisson dans le poids que représente la maladie dans le pays.

Encadré 3.9

Le DALY

Olivier Schlosser, Suez Environnement

Le DALY (*Disability Adjusted Life Years* ; AVCI : Année de Vie Corrigée du facteur Invalidité), indicateur présenté par la Banque mondiale dans son

rapport de 1993 conjointement avec l'Organisation mondiale de la santé, est destiné à mesurer l'impact global de la maladie dans le Monde. À la différence des indicateurs classiques et très utilisés se basant sur le décès, comme l'espérance de vie, le DALY prend également en compte la morbidité, responsable d'une perte de qualité de vie et de la charge des services de santé. Le principe est de transformer la perte qualitative due à une maladie en une perte quantitative en utilisant un coefficient chiffrant la gravité de l'invalidité. Cent neuf maladies ont ainsi été examinées, couvrant toutes les causes de décès et 95 % des invalidités, et classées en 6 catégories recevant chacune un coefficient de gravité. Le DALY est ainsi la somme des années de vie perdues par un décès prématuré, et des années de vie en bonne santé perdues à cause d'une invalidité, pondérées par le coefficient de sévérité de la maladie.

Le DALY fournit un moyen de mesure pour comparer les impacts sanitaires des différents dangers dans l'environnement. Considérant les taux d'incidence des maladies en fonction de l'âge, du sexe et de la région du Monde, il permet de définir les priorités en santé publique, et d'évaluer la charge sanitaire associée aux expositions environnementales.

3.3 Les normes de qualité de l'eau

Les décisions en matière de normes (sur la qualité de l'eau potable, des eaux de baignade, de celles utilisées en agriculture) peuvent avoir une lourde incidence économique, comme le montre par exemple la nouvelle directive européenne sur le plomb (encadré 3.10). Objectiver les décisions en matière de normes sanitaires est une tâche difficile mais nécessaire ; il s'agit d'allouer rationnellement les ressources économiques disponibles pour une politique de santé publique.

Encadré 3.10

Concentrations maximales admissibles dans l'eau potable : le cas du plomb

Jacques Labre, Suez Environnement

La concentration limite en plomb dans les eaux d'alimentation a été abaissée de 50 à 25 $\mu\text{g/l}$ à compter de 2002, et doit être portée à 10 $\mu\text{g/l}$ en 2013. Cette nouvelle norme fait suite à une directive européenne de 1998.

Elle repose sur une recommandation de l'OMS en date de 1991 fixant à $3,5 \mu\text{g}$ par kg de poids de l'individu, la dose journalière tolérable (DJT) pour le plomb ingéré par les diverses voies possibles. L'eau de boisson ne représente en effet que l'une des sources de plombémie avec :

- l'air (exposition en voie de réduction depuis l'interdiction de l'usage du plomb dans les carburants automobiles) ;
- les aliments solides ;
- les poussières (en particulier dans des logements anciens dégradés où les enfants peuvent ingérer des écailles de peintures au plomb utilisées jusque vers 1950).

Ces différents facteurs d'exposition dépendent beaucoup du type d'habitat ; le dernier est la seule cause, en France, des cas avérés de saturnisme.

Les hypothèses conduisant à fixer à $10 \mu\text{g/l}$ la concentration maximale admissible se réfèrent à la population la plus vulnérable, celle des nouveau-nés.

La phase transitoire de 15 ans, accordée aux États membres pour parvenir au seuil de $10 \mu\text{g/l}$, s'explique notamment par l'ampleur des investissements à réaliser : garantir cette valeur limite nécessitera le remplacement des canalisations en plomb utilisées jusque dans les années 1980 pour les branchements au réseau et dans les installations intérieures des immeubles. Le coût correspondant pour la France est estimé à douze milliards d'euros pour les particuliers et 3 milliards d'euros pour les collectivités locales.

4 | Prévenir les risques par une meilleure gestion de la ressource

4.1 Contrôler les pollutions d'origine agricole

Lors d'une utilisation dans l'environnement, les pesticides se répartissent rapidement entre le sol, l'air et l'eau. Des phénomènes de volatilisation, solubilisation, adsorption et désorption permettent la migration, la rétention ou la transformation des molécules. Celles qui entrent en contact direct avec le sol peuvent, par infiltration ou ruissellement, se retrouver ensuite dans les eaux. Dans le cas des pesticides fortement retenus par les sols, cette migration dans l'eau peut s'étaler sur de nombreuses années. Ainsi, dans le cas du DDT, il a été démontré que la présence de la molécule dans des eaux de ruissellement pouvait encore être détectée 10 ans après l'application d'un seul épandage.

En France, l'Institut français de l'environnement (www.ifen.fr) réalise depuis 1998 la synthèse des données disponibles relatives à la pollution de l'eau par les pesticides. Les bilans annuels établis depuis cette date décrivent une situation préoccupante. Le bilan de 2002 par exemple, indique que sur 3 000 points de surveillance suivis en France métropolitaine sur des eaux superficielles et souterraines, 90 % des eaux de surface et 58 % des eaux souterraines sont touchées par la présence de pesticides. On retrouve 148 pesticides différents dans les eaux de surface (sur 320 recherchées), et 62 dans les eaux souterraines (sur 292 recherchées), mais les substances les plus fréquentes sont en majorité des herbicides de la famille des triazines. Leur présence chronique a conduit le ministère de l'Agriculture à prononcer l'interdiction de la plupart des triazines à partir de 2003. D'autres substances, bien que déjà interdites, comme le lindane (depuis 1998), le dinoterbe ou le dinosèbe, sont encore présentes, notamment dans les eaux souterraines, illustrant ainsi les délais parfois très longs de renouvellement de ces milieux.

Dans près de 10 % des cas, les pesticides se retrouvent à des concentrations telles que les milieux aquatiques peuvent être perturbés, ou les seuils admissibles pour la production d'eau potable dépassés. 25 % des captages d'eaux souterraines et 55 % des captages d'eaux de surface produisent d'ores et déjà une eau nécessitant un traitement spécifique contre les pesticides.

Dans son rapport de mars 2002, le Comité de la prévention et de la précaution du ministère de l'Environnement reprend les conclusions de l'Ifen et attire l'attention sur les dommages découlant de la dégradation lente de la qualité des milieux naturels par accumulation des pesticides et produits dérivés.

Le rapport du Commissariat général du plan de septembre 2001 (*La politique de préservation de la ressource en eau destinée à la consommation humaine*, F. Villey-Desmeserets et al., <http://www.plan.gouv.fr/publications/fiche.php?id=43>) insiste également sur l'importance du facteur temps, en rappelant que la pollution de demain des ressources en eau est déjà partiellement inscrite dans les sols, aujourd'hui. Il note que l'amélioration de la qualité des eaux potables distribuées, constatée depuis vingt ans, est due aux techniques de traitement, alors que la ressource n'a cessé de se dégrader, en raison de la persistance des pollutions diffuses d'origine agricole. Il rappelle donc, parmi ses propositions, la nécessité d'associer actions préventives et actions curatives, qui sont complémentaires, à la fois pour répondre aux attentes immédiates des consommateurs et pour prendre en compte les délais nécessaires à la restauration de la ressource, en indiquant toutefois qu'il est préférable de faire porter les efforts sur l'amélioration de la qualité de la ressource en eau, plutôt que sur les normes relatives à l'eau potable. Ces efforts concernent notamment l'infléchissement des pratiques de culture et d'élevage, et la protection des captages. Le rapport souligne également que la directive cadre communautaire

2000/60/CE qui demande aux États membres de garantir la qualité de toutes les masses d'eau d'ici 2015, peut être l'occasion de lancer des plans d'action bien ciblés. On peut noter que la préservation des ressources et la maîtrise des pollutions à la source font l'objet d'un ensemble de textes législatifs européens, dont les plus significatifs sont listés (Union européenne, législation).

4.2 Réduire l'impact des eaux résiduaires

La collecte des eaux résiduaires urbaines avait initialement pour vocation de répondre à des impératifs sanitaires (« assainissement » des villes). Cependant, la conception moderne des outils épuratoires est désormais plutôt guidée par des considérations environnementales (abattement de la pollution organique globale, diminution des flux de nutriments rejetés au milieu). D'ailleurs, la désinfection de l'effluent avant rejet n'est pas fréquente.

Le concept de gestion des ressources hydriques comme outil de prévention des risques sanitaires remet en perspective les relations entre assainissement et santé. Les enjeux de ce thème couvrent les sujets déjà évoqués précédemment :

- la teneur des eaux résiduaires en micro-organismes pathogènes en conditionne le pouvoir infectieux et reflète l'état sanitaire de la population. Dans les pays du Sud, les concentrations élevées en pathogènes et l'assainissement souvent déficient accroissent les risques d'exposition de la population ;
- les éléments potentiellement toxiques (traces métalliques) et les nombreuses substances chimiques de synthèse à usage domestique ont pour seuls exutoires les ordures ménagères et les eaux usées. En la matière, on connaît à peine la toxicité individuelle des composés pour de fortes expositions. Le risque associé à des mélanges de composés à faibles doses est insuffisamment documenté (encadré 3.8) ;
- les eaux résiduaires sont aussi le principal vecteur des résidus médicamenteux ou des perturbateurs endocriniens (17β -œstradiol, œstrone ainsi que stéroïdes synthétiques dont l'éthinylœstradiol). Jusqu'à présent, seuls les effets de ces composés vis-à-vis de l'environnement ont été assez bien documentés.

In fine, la nécessité de réinscrire les objectifs de santé publique comme priorité de l'assainissement, en plus des enjeux environnementaux, permet de décliner des axes de recherche cohérents :

- il apparaît indispensable d'intégrer les systèmes épuratoires dans la démarche d'analyse de risque évoqué au paragraphe 3.1. L'approche HACCP (*Hazard Analysis, Critical Control Points*) doit alors intégrer les déversements des réseaux de collecte (notamment les surverses de temps de pluie), la pollution diffuse des installations de traitement autonomes, le rejet des stations d'épuration et les sous-produits de l'assainissement (notamment les boues qui peuvent faire l'objet d'une valorisation agricole) ;
- la compréhension et l'analyse du risque demandent alors une meilleure connaissance des concentrations et du devenir des différents polluants au sein des filières de traitement ainsi que des voies d'exposition des populations ;
- la caractérisation des dangers devrait pouvoir s'appuyer sur des indicateurs de qualité sanitaire des effluents. Il y a là un besoin de méthodes de mesures opérationnelles, intégratrices des différents risques sanitaires, qui complèteraient efficacement les analyses parfois controversées de l'éco-toxicité ;
- la maîtrise des risques, enfin, nécessitera sans doute l'amélioration de l'efficacité des traitements actuels à l'égard de polluants émergents ou le développement de procédés de traitement appropriés : traitement tertiaire des effluents, conditionnement complémentaire des boues. En la matière, la définition d'indicateurs de qualité sanitaire permettant d'apprécier l'efficacité globale des procédés est aussi un facteur clé (on pense, par exemple à l'évaluation des bénéfices réels d'un traitement de désinfection occasionnant la formation de sous-produits nocifs).

4.3 Recourir au génie écologique

Une gestion appropriée des milieux aquatiques artificialisés comme les plans d'eau, canaux d'irrigation, systèmes de drainage, etc., peut minimiser l'impact des maladies hydriques. C'est particulièrement vrai pour les maladies à vecteurs (paludisme, schistosomiase, onchocercose, encéphalite japonaise. ...) qui peuvent être efficacement contrôlées par une gestion saisonnière adaptée des systèmes d'irrigation, visant à limiter la multiplication du vecteur par des mises à sec aux périodes critiques pour le développement des larves. Des expériences concluantes en ont apporté la démonstration au Sri Lanka.

4.4 Utiliser les processus hydrogéochimiques naturels

La nature met à notre disposition des réacteurs naturels d'auto-épuration des eaux qui, lorsqu'ils sont bien identifiés, peuvent être utilisés pour remplacer en partie le traitement en usine des eaux destinées à la consommation humaine.

C'est le cas des berges de rivière, qui, suivant leur nature lithologique et les conditions biogéochimiques qui y prévalent, peuvent constituer des filtres efficaces contre certaines pollutions présentes dans les eaux de surface. L'intensité des phénomènes d'élimination des polluants dépend principalement de la vitesse d'infiltration des eaux et du potentiel d'oxydoréduction du milieu, lui-même gouverné par la quantité de matière organique biodégradable disponible.

Le premier rôle connu de la filtration sur berges est son rôle dans la protection des eaux souterraines contre les pollutions microbiologiques des eaux de surface. Son efficacité a également été démontrée pour lutter contre la présence des nitrates dans les eaux de surface lorsque l'environnement de la berge est anoxique (absence d'oxygène) ou contre la présence d'ammonium lorsque cet environnement est du type suboxique (présence d'oxygène). De même le comportement de nombreux métaux est influencé par le passage des berges. Plus récemment des études ont montré que la filtration sur berges pouvait jouer un rôle significatif dans l'élimination de certains perturbateurs endocriniens (œstrogènes) ou médicaments tels que les antibiotiques.

Le pompage des eaux souterraines en berges de rivière peut donc constituer, si le terrain le permet, un prétraitement économique et durable des eaux de surface. Il constitue pour cela une alternative plus sûre au pompage direct des eaux de surface à l'aval des agglomérations.

La morphologie des cours d'eau peut nous renseigner sur la qualité potentielle de la filtration sur berges au droit d'un bief donné. Les zones d'accumulation de sédiments dans la rivière généreront des eaux d'infiltration de qualité différente de celles s'infiltrant au droit de zones d'érosion. L'ensemble de ces connaissances peut aider à la localisation des ouvrages sur berges et à la recherche de conditions géochimiques mieux adaptées à la problématique rencontrée.

Enfin, certaines des conditions de filtration sur berges peuvent être reconstituées artificiellement comme dans le cas de la réalimentation des nappes avec des eaux de surface lorsque des bassins de grande extension sont utilisés comme percolateurs des eaux vers la nappe. Suivant les processus biochimiques qui peuvent se développer dans ces bassins et les vitesses de percolation de l'eau, il est possible de favoriser l'élimination de substances indésirables.

La recherche doit s'attacher à analyser les expériences de ce type, en évaluer le potentiel de généralisation (et en particulier de transposition dans les régions rurales ou les pays du Sud), et estimer les avantages environnementaux et économiques de ces technologies « extensives » et durables.

5 | Améliorer le traitement des eaux de distribution

5.1 Optimiser les procédés

L'objectif du traiteur d'eau est de mettre en œuvre dans des conditions maîtrisées les procédés les plus adaptés aux pollutions (chroniques ou épisodiques, quantifiées ou estimées) contenues dans les ressources, pour produire en permanence une eau conforme aux critères de potabilité, et restant potable jusqu'au robinet du consommateur.

La multiplication des polluants identifiés dans l'environnement, ajoutée à des critères de potabilité de plus en plus contraignants, obligent le traiteur d'eau à fournir un effort permanent d'adaptation consistant, d'une part, à optimiser les procédés existants et, d'autre part, à développer de nouveaux procédés.

Dans le domaine de l'optimisation des procédés, les besoins sont de différentes natures :

- développer des outils analytiques utilisables en ligne pour la surveillance des ressources ou le suivi des performances des procédés (compteurs de particules, capteurs soniques, analyseurs de chlorophylle, hydrocarbures, métaux...);
- développer des outils de modélisation, ou adapter des modèles existants aux spécificités de l'eau (incluant hydraulique, transfert de masse, cinétique chimique, séparation liquide/solide, mélange triphasique air/eau/particules...) pour la conception et l'optimisation des installations;
- développer des techniques avancées d'analyse et traitement de données (adaptation d'outils statistiques et mathématiques aux données générées en continu ou ponctuellement, pour développer des modèles de simulation, de prédiction, d'aide à la décision, d'asservissement des procédés de traitement);
- rechercher et sélectionner de nouveaux réactifs plus performants et spécifiques dans le traitement de certains polluants (coagulants et floculants pour une élimination poussée des particules, des colloïdes et des pollutions organiques dissoutes, adsorbants et échangeurs d'ions pour le traitement de micropollutions organiques et de métaux, oxydants pour la transformation des matières organiques avec maîtrise des métabolites, désinfectants pour l'inactivation des micro-organismes et le maintien de la qualité en réseau);

- améliorer l'élimination des matières organiques naturelles (MON), et en particulier les matières organiques bio-éliminables (MODB) et hydrophiles, afin de limiter la formation de sous-produits de désinfection, pour accroître la stabilité de l'eau en réseau et éviter l'apparition de goûts et odeurs (ce qui suppose également de développer les méthodes analytiques permettant de mieux caractériser les MON, d'identifier les mécanismes moléculaires et macroscopiques en jeu dans les traitements d'élimination des MON par coagulation, floculation, séparation, adsorption, échange d'ions, oxydation, et biodégradation);
- maîtriser et valoriser les rejets générés par les filières de production d'eau potable, dans un objectif de respect de l'environnement et de maîtrise des coûts d'exploitation (contrôle des boues de décantation, des eaux de lavage des filtres, du concentrat des traitements par membranes. . .).

5.2 Principales innovations attendues

Le potentiel d'innovation réside principalement dans les procédés suivants :

- filtration sur membranes : cette technologie est aujourd'hui maîtrisée pour les applications conventionnelles en clarification/désinfection (ultrafiltration), en dessalement partiel (nanofiltration) ou poussé (osmose inverse). Les principaux avantages de ces procédés sont leur fiabilité et leur souplesse, permettant la production d'une eau de qualité constante pour une ressource de qualité variable. Les développements en cours de nouvelles membranes plus résistantes, plus spécifiques et moins énergivores, la standardisation croissante des procédés de mise en œuvre, ouvrent le champ d'application de ces procédés au traitement de ressources qui étaient considérées jusqu'à présent comme difficiles à traiter. La combinaison de traitements conventionnels (clarification, oxydation, adsorption, biodégradation) et membranaires peut apporter une solution innovante, « multi-barrières », pour la production d'eau potable à partir de ressources à forte charge organique ou minérale (eaux de surface, eaux saumâtres, eau de mer. . .);
- flottation : ce procédé est bien adapté au traitement d'eaux peu turbides et avec une forte teneur en algues. Sa mise en œuvre, souple et adaptable aux variations de la ressource, permet en particulier de fiabiliser les filières de traitement d'eaux de surface en zones chaudes;
- décantation/adsorption : de nouveaux réacteurs combinant de façon optimale les procédés de coagulation, de décantation et d'adsorption (circulation de boues de décantation, lit fluidisé avec matériau adsorbant. . .) doivent être conçus. Cette solution serait bien adaptée au traitement des eaux de surface chargées en pollutions à la fois particulières et dissoutes;

- filtration catalytique : la filtration sur matériaux à propriétés catalytiques, régénérables sur place, constituerait une solution efficace pour l'élimination de métaux tels que l'arsenic, le manganèse, ou le sélénium ;
- désinfection par rayonnement ultraviolet : ce procédé de désinfection, performant et générant peu de sous-produits, peut constituer une alternative aux procédés oxydants conventionnels (ozonation, chloration). La recherche d'effets synergiques avec les oxydants conventionnels pourrait également conduire à une désinfection plus efficace, générant moins de sous-produits, et à une meilleure stabilité de l'eau en réseau de distribution. Cependant, ce procédé ne permettra pas de remplacer totalement le chlore en désinfection finale avant distribution, puisqu'il ne produit pas de résiduel rémanent. Par ailleurs, la conception et l'exploitation de ces nouveaux réacteurs doivent encore être optimisées.

6 | Contrôler la qualité de l'eau : outils analytiques et de modélisation

6.1 Transfert des micropolluants dans le sol et l'hydrosystème

Le devenir des micropolluants toxiques dans le sous-sol et les eaux souterraines est souvent très complexe à déterminer. Il est fonction de nombreux facteurs, dont la nature pédologique des sols, les conditions biochimiques et géochimiques qui prévalent dans les eaux souterraines. Les micropolluants peuvent interagir avec d'autres substances présentes dans la phase solide ou liquide du sous-sol et s'associer avec elles pour former des composés parfois plus toxiques que la molécule de départ. Parallèlement, la biodégradabilité des micropolluants présente des cinétiques variables qui peuvent être accélérées ou freinées suivant les conditions biogéochimiques de l'environnement.

La connaissance du devenir des micropolluants dans le sous-sol apparaît donc déterminante pour définir les risques sanitaires associés et pour en favoriser l'épuration industrielle ou naturelle.

La recherche s'attache aujourd'hui à suivre dans leur dynamique les micropolluants toxiques ainsi que les sous-produits de leur dégradation grâce à l'usage de traceurs. À titre d'exemple, l'usage d'un traceur isotopique incorporé à des micropolluants donnés permet grâce à la mesure de la radioactivité de différentes fractions du sol ou de l'eau souterraine, de retrouver la trace des molécules de départ et de leurs éventuels sous-produits de dégradation. D'autres techniques utilisent des traceurs dits « réactifs » qui, injectés à un point dans

une nappe, par exemple, vont fixer dans leurs différentes formes les micropolluants recherchés. Repompés dans la nappe à un autre point plus en aval, ils permettront d'identifier les formes du micropolluant étudié et sa dynamique de dégradation.

Ces nouvelles technologies, qui nécessitent des moyens analytiques très poussés, permettront à terme de mieux circonscrire les risques sanitaires liés à l'utilisation industrielle de nouvelles molécules toxiques, ou à la présence dans le sous-sol d'anciens résidus de micropolluants toxiques.

6.2 Contrôle de la qualité microbiologique de l'eau

Les méthodes d'analyses microbiologiques qui font référence sur le plan réglementaire sont encore de nos jours des méthodes héritées du XIX^e siècle, basées sur la culture des micro-organismes sur des milieux spécifiques. Elles présentent généralement un rendement de récupération faible (typiquement de l'ordre de 1 % des micro-organismes présents), souffrent d'interférences possibles entre les différents micro-organismes présents, et exigent des temps d'incubation longs (un à plusieurs jours). De plus, des milieux de culture ne sont pas disponibles encore aujourd'hui pour tous les micro-organismes. Ces difficultés analytiques sont particulièrement pénalisantes pour l'évaluation et la gestion des risques liés à certaines bactéries (notamment, légionelles, mycobactéries), et plus généralement, les virus. C'est plus particulièrement le cas des *norovirus*, soupçonnés d'être à l'origine de la majeure partie des cas de gastro-entérites transmises par l'eau de boisson, mais pour lesquels il n'existe aujourd'hui aucune méthode de culture permettant leur détection dans l'eau.

Les progrès technologiques accomplis dans le domaine de la biologie moléculaire au cours des vingt dernières années ont permis d'aboutir récemment à la mise au point de méthodes basées sur la reconnaissance de marqueurs cellulaires spécifiques (par exemple, antigènes de surface, ADN, ARN, ou activités enzymatiques). Elles présentent l'avantage d'être plus rapides (temps de réponse typiquement de quelques heures), sont applicables *a priori* à tout micro-organisme, et présentent une meilleure spécificité, en comparaison des méthodes de culture. Des progrès sont cependant encore nécessaires pour donner à ces méthodes la capacité de distinguer les cellules viables des non viables, mesurer ou prédire le caractère infectieux des micro-organismes (notamment des virus), et pour limiter les inhibitions observées avec certaines qualités d'eaux. Une validation de ces nouvelles méthodes par rapport aux méthodes de référence actuelles sera également nécessaire, notamment pour évaluer les conséquences que leur application pourrait éventuellement entraîner sur les référentiels réglementaires.

Enfin, quelle que soit la méthode de détection utilisée (culture ou biologie moléculaire), les techniques d'échantillonnage restent également à améliorer afin d'augmenter le rendement de récupération des micro-organismes, et améliorer les seuils de détection, notamment à partir des eaux brutes ou des eaux usées.

6.3 Contrôle des paramètres chimiques

La multiplication des sources de pollutions environnementales par des substances issues de l'activité humaine (pesticides, médicaments, perturbateurs endocriniens, sous-produits de désinfection) engendre des efforts permanents de développement et de mise en œuvre de méthodes d'analyses, à des fins d'évaluation des risques et de contrôle qualité. La grande diversité des polluants se traduit par une grande diversité, également, des méthodes d'analyses et des équipements, que seuls quelques laboratoires très spécialisés sont capables de maîtriser, à un coût incompatible avec une utilisation en routine. Pour certains composés (organostanneux par exemple), la toxicité n'étant pas liée uniquement à la présence de l'élément métallique, des techniques de spéciation permettant de caractériser le degré d'oxydation du métal et la structure organique associée doivent être mises en œuvre.

Le développement de méthodes d'analyses globales, multimolécules, serait souhaitable, pour une application plus routinière ou pour une utilisation en ligne. Qu'elles reposent sur une mesure chimique ou biologique, l'intérêt de ces méthodes serait de fournir rapidement une information sur le caractère toxique, cancérigène, mutagène ou reprotoxique de l'eau. Les méthodes d'analyses spécifiques n'interviendraient ainsi que pour caractériser plus précisément la nature du danger, en cas de réponse positive d'un test global.

6.4 Évolution de l'eau dans les réseaux de distribution

Les réseaux de distribution eux-mêmes peuvent être à l'origine d'une recontamination de l'eau. Plusieurs phénomènes peuvent intervenir au cours de la distribution (qui concerne aussi bien le réseau public que les réseaux intérieurs des bâtiments au sein desquels les temps de séjour peuvent être très longs, et les contaminations non négligeables notamment avec les matériaux de mauvaise qualité).

En fonctionnement ordinaire :

- la prolifération de biofilms et la recroissance microbienne, favorisées par la diminution du résiduel de désinfectant au cours du transit (notamment,

dans les réseaux intérieurs, où l'augmentation de la température et du temps de séjour de l'eau favorisent également le développement des légionelles);

- le relargage de substances à partir des matériaux en contact (cuivre, plomb, hydrocarbures aromatiques polycycliques. . .);
- la mobilisation de dépôts dans le réseau (résidus de corrosion ou de traitement);
- les décrochages de biofilm consécutifs à des variations de régime hydraulique.

Lors d'un événement exceptionnel :

- contamination lors de travaux (par des eaux usées ou par des germes portés par les intervenants);
- déversement de produit toxique au-dessus d'une canalisation perméable;
- pénétration de bactéries (issues du réseau d'assainissement. . .) lors d'une baisse de pression (arrêt d'eau ou casse);
- actes malveillants;
- retour d'eau depuis un réseau intérieur qui n'est pas protégé par un dispositif approprié.

L'exploitation, la maintenance, et le renouvellement des réseaux constituent donc des facteurs importants de maîtrise de la qualité de l'eau distribuée. En effet, ces risques de dégradation de la qualité de l'eau peuvent être progressivement maîtrisés grâce au respect d'un certain nombre de règles de conception et d'exploitation des réseaux (par exemple, la mise en place systématique de protection contre les retours d'eau, la maîtrise des temps de séjour de l'eau dans les réseaux, le choix de matériaux disposant systématiquement d'une attestation de conformité sanitaire. . .).

Néanmoins, certains domaines restent à ce jour encore inexplorés, en particulier :

- Quelle est l'influence des matériaux constitutifs du réseau sur la prolifération du biofilm ? Vaut-il mieux utiliser des matériaux plastiques ou métalliques ? Que se passe-t-il lorsque les canalisations métalliques ont subi une corrosion interne liée à une eau agressive, dans le passé ?

- Quel est le comportement dans le temps des matériaux plastiques ? Quelle sera leur durée de vie en fonction de leurs conditions de pose et d'utilisation ?
- Quelles sont les canalisations dont le risque de défaillance est le plus élevé en fonction de leurs matériaux, leur âge et leur environnement ? Quelle gestion patrimoniale d'un réseau doit être mise en œuvre pour maintenir ses performances à long terme sans renouveler de manière inconsidérée des canalisations qui ne présentent pas de risque important ?

Autant d'axes de travail qui permettront dans le futur de mieux maîtriser la qualité de l'eau en réseau.

7 | Anticiper et gérer les crises hydriques et sanitaires

L'impact sanitaire des catastrophes naturelles et technologiques, des conflits armés, des actes terroristes, peut être aggravé ou limité selon :

- leurs effets sur les ressources et les systèmes hydrauliques ;
- les outils de gestion de crise mis en œuvre par les acteurs de l'eau.

7.1 Sécurité des systèmes d'eau potable

La sécurité de l'alimentation en eau potable des grandes agglomérations, souvent tributaires de ressources en eau de surface, face aux pollutions accidentelles, repose sur :

- l'efficacité de systèmes d'alerte à l'amont, et de veille sanitaire sur la population ;
- l'emploi de modèles de simulation ;
- la transmission rapide d'une information pertinente aux usagers finaux.

Des améliorations technologiques restent nécessaires sur ces outils, qui peuvent s'appliquer aussi pour parer à d'éventuels actes terroristes.

7.2 Secours d'urgence

L'accès à l'eau potable et à des conditions acceptables d'assainissement est une composante majeure des secours d'urgence aux populations en détresse à la suite de catastrophes naturelles, et aux réfugiés fuyant les conflits (12 millions de personnes déplacées dans le monde). Le développement d'équipements mobiles, utilisant les nouvelles technologies compactes de traitement de l'eau, doit être poursuivi.

Encadré 3.11

Un exemple de crise sanitaire : une épidémie de gastro-entérite en Isère en 2002

Olivier Schlosser, Suez Environnement

Le 19 novembre 2002, la Ddass de l'Isère a été alertée de la survenue d'un nombre élevé de cas de gastro-entérites dans quatre communes desservies par le même réseau d'eau. La consommation d'eau étant rapidement suspectée d'être à l'origine de l'épidémie, la Ddass a fait passer le même jour un avis recommandant la non-consommation d'eau du robinet et une augmentation de la chloration de l'eau est mise en œuvre. L'enquête épidémiologique menée auprès des médecins et des pharmaciens des quatre communes a indiqué un taux d'incidence de 41 % de gastro-entérites dans la population et a confirmé la relation avec la consommation d'eau du robinet. Les analyses microbiologiques ont montré la présence d'un *norovirus* dans les selles des malades et dans les prélèvements d'eau du réseau. L'enquête environnementale a permis de conclure que la contamination du réseau était probablement le résultat de l'inondation du périmètre de protection du captage par les eaux de la rivière voisine, très chargées en micro-organismes d'origine fécale humaine provenant d'un dysfonctionnement de la station d'épuration située en amont, à la suite de fortes précipitations les jours précédant l'épidémie. Cet événement a souligné la nécessité de mettre en œuvre dans les plus brefs délais des travaux indispensables pour protéger ce captage (InVS, 2004).

8 | Former et informer le public

Dans son rapport publié en février 2004, la Commission d'orientation du Plan national santé environnement (PNSE) souligne la nécessité d'une promotion de

la santé environnementale en France, et émet notamment la recommandation de sensibilisation et de formation du grand public.

Elle appuie cette recommandation sur le constat suivant :

- il n'existe pas en France de véritable culture de l'environnement qui soit suffisamment diffuse au sein de la population pour influencer notablement les comportements individuels et collectifs ;
- le grand public est soumis à un flot d'informations inadéquates qui le gêne pour distinguer l'essentiel. Il en résulte un manque de confiance envers les pouvoirs publics, les entreprises, les experts, . . . à l'origine de revendications susceptibles de conduire à des situations de crises et à un gaspillage de moyens humains et financiers.

Les expériences de crises sanitaires récentes confirment que l'incertitude face un risque émergent est génératrice d'insécurité dans l'opinion publique. La perception du risque est ainsi souvent en décalage face aux données scientifiques en raison d'un manque d'information claire et facilement accessible. Elle est par ailleurs vécue avec d'autant plus d'inquiétude ou d'anxiété que l'histoire récente a été marquée de crises et de scandales sanitaires qui ont ébranlé la confiance de l'opinion publique.

Par ailleurs, l'opinion publique, et parfois même les professionnels de santé, sont mal préparés à la notion même de risque. La confusion est fréquente entre la notion de danger et celle de risque, c'est-à-dire entre celle de la propriété intrinsèque d'un agent et celle de la probabilité que le potentiel de nuisance de cet agent soit atteint dans les conditions d'exposition. De gros effort, d'information et de formation restent nécessaires pour que le public perçoive que le risque s'exprime en termes de probabilité, c'est-à-dire d'une donnée quantitative et mesurable. Cette condition est indispensable pour que la société s'engage efficacement dans un débat constructif et consensuel sur les objectifs de gestion du risque, acceptant alors une hiérarchisation de ces risques et la définition de priorités dans les actions à mener.

Face à ce constat, le rapport du PNSE préconise de consolider la formation et de développer l'information et la communication en matière d'environnement et de santé. Le thème « santé-environnement » sera ainsi intégré à la formation initiale des professionnels de santé et des professions à caractère environnemental, et à celle des enseignants pour l'éducation des élèves dès l'école primaire. La formation continue des professionnels de santé sera enrichie des questions santé-environnement, et il est prévu de développer une formation diplômante de haut niveau pour créer en France un corps de spécialistes trop insuffisant actuellement.

Le PNSE propose de favoriser l'information du public par la mise à disposition par l'Afssse d'un site portail développé sur Internet qui intégrera très probablement le thème « eau et santé ». Il souligne l'intérêt du débat public au plus près du citoyen et évoque les aides qui pourraient être apportées à son organisation.

Plusieurs questions méritent d'être soulevées :

- le développement de compétences chez le personnel de santé et celui d'experts, et la mise à disposition du public d'un site d'information sur Internet sont certes nécessaires, mais l'expérience montre que ce n'est pas suffisant pour développer l'information et l'éducation du public. Il faut réfléchir aux moyens à mettre en œuvre pour apporter cette information au public, et pas seulement la mettre à sa disposition, et s'entourer de professionnels de la pédagogie et de la communication ;
- ces aspects soulèvent la question de la dimension et du champ d'activité d'un partenariat établissements publics — traiteurs d'eau dans le cadre de l'information et de l'éducation du public, et dans celui de la participation à des programmes de formation et d'enseignements.

Il est intéressant à ce sujet de noter que le sondage Sofres/CI Eau, réalisé en 2004, met en évidence un profond clivage entre les perceptions du rôle et de la confiance attribués aux différents émetteurs d'information : les pouvoirs publics sont désignés comme ayant le plus grand devoir d'informer sur la qualité de l'eau (41 % des sondés) mais sont placés en dernière position concernant leur crédibilité (qui reste néanmoins élevée, avec 64 %) ; inversement, les associations de consommateurs et les médecins recueillent le plus grand crédit (87 % et 84 %), alors qu'ils ne sont pas perçus comme ayant un devoir d'information (2 % et 3 % respectivement).

Enfin, il est essentiel de garder à l'esprit que l'information sur les risques d'origine hydrique doit être intégrée dans une approche globale concernant l'éducation à l'hygiène, l'accès à un service d'eau potable de bonne qualité n'étant pas suffisant à la prévention de nombreuses maladies, en particulier à transmission féco-orale.

Synthèse des recommandations

Quelques recommandations émergent particulièrement de cet état des lieux sur les enjeux « eau et santé ». On se bornera ici à rappeler les principales d'entre elles.

- **Fixer des objectifs** de santé publique à atteindre à travers la qualité de l'eau potable, et définir les indicateurs d'impact sanitaire à utiliser à cet effet.
- Progresser dans **l'analyse économique des enjeux** « eau et santé », afin de disposer d'outils pour objectiver les décisions :
 - sur l'évolution des normes en matière de qualité sanitaire de l'eau ;
 - sur les investissements dans les services d'eau potable et assainissement dans les pays en développement.
- Améliorer les systèmes d'observation :
 - mécanismes d'alerte et de surveillance des épidémies d'origine hydrique ;
 - mesure du risque endémique d'origine hydrique, en favorisant une meilleure exploitation des bases de données nationales existantes (par exemple, base Sise-eau de la Direction générale de la Santé, bases de données de l'Assurance maladie).
- Favoriser les politiques de **maîtrise des pollutions à la source** et de protection des ressources en eau, notamment vis-à-vis des mélanges complexes de micropolluants organiques induisant des effets perturbateur endocrinien, génotoxique ou cancérigène, et fiabiliser les unités de traitement d'eaux usées et de potabilisation vis-à-vis de ces mélanges.
- Développer la **surveillance de la qualité des ressources en eau** destinées à la production d'eau potable et les moyens de mesure adaptés, notamment :
 - pour le risque infectieux, les méthodes d'analyse microbiologiques adaptées aux eaux brutes ;
 - pour les risques mutagène, cancérigène, et reprotoxique, des analyseurs ou modèles biologiques permettant de donner un signal interprétable en matière de risque pour l'homme.
- Privilégier la protection des ressources et la production d'eau potable à partir de zones de production protégées.
- Favoriser la sensibilisation et la formation du grand public aux questions « eau et santé » et aux objectifs de gestion des risques sanitaires ; promouvoir le développement d'un débat public au plus près du citoyen.
- Assurer une meilleure **cohérence** des actions des différents acteurs des domaines eau, santé et environnement, et une meilleure représentation française dans les instances de décision internationales, par la création d'un pôle de compétences scientifique public « eau et santé ».

Références bibliographiques

- Bernard A., Carbonelle S., Michel O. *et al.* (2003). Lung hyperpermeability and asthma prevalence in schoolchildren : unexpected associations with the attendant at indoor chlorinated swimming pools. *Occup Environ Med*, **60** : 385-94.
- Bligny JC., Hartemann P. (2003). Les eaux minérales et les eaux de source : cadre réglementaire et technique. In : *Eaux continentales. Numéro thématique des Comptes Rendus de l'Académie des sciences. C.R. Geoscience*, **337** : 279-284.
- Campèse C., Jarraud S., Decludt B. *et al.*, (2004). Les légionelloses déclarées en France en 2003. *Bull Epidemiol Hebd*, **36-37** : 174-176.
- Cloete TE., Rose J., Nel LH., Ford T. (2004). *Microbial waterborne pathogens*. Editors IWA Publishing, London.
- Comité de la prévention et de la précaution, sur les risques sanitaires liés à l'utilisation de produits phytosanitaires, avis du 27/02/02 (www.ecologie.gouv.fr).
- Cordier S., Ayotte P., De Wals P. *et al.* (2003). Reproduction. In : *Environnement et santé publique*, Gérin M., Gosselin P., Cordier S. *et al.* (eds.). Edisem et Tec et Doc, pp. 641-667.
- Craun GF. (1990). *Methods for the investigation and prevention of water borne disease outbreaks*. USEPA.
- Festy B., Hartemann P., Ledrans M. *et al.* (2003). Qualité de l'eau. In : *Environnement et santé publique*, Gérin M., Gosselin P., Cordier S. *et al.* (eds.). Edisem et Tec et Doc, pp. 352-363.
- Hutton G., Haller L. (2004). Evaluation of the Costs and Benefits of Water and Sanitation Improvements at Global Level, WHO.
- Ifen, *Les pesticides dans les eaux, Sixième bilan annuel, Données 2002*. Études et travaux N° 42, <http://www.ifen.fr/publications/ET/et42.htm>
- Institut de veille sanitaire (2002). Exposition chronique à l'arsenic hydrique et risques pour la santé. Bilan des données épidémiologiques ; Évaluation quantitative des risques sanitaires en Auvergne.
- InVS (2004). Épidémie de gastro-entérite en Isère, novembre 2002.
- Mc Michael AJ., Campbell-Lendrum DH. *et al.* (2003). *Climate change and human health — Risks and responses*. WHO.

- Marre R., Abu Kwaik Y., Bartlett C. *et al.* (eds.) (2002). *Legionella*. American Society of Microbiology Press, Washington.
- Morris RD., Levin R. (1995). Estimating the incidence of waterborne infectious disease related to drinking water in the United States. *In : Assessing and managing health risks from drinking water contamination : approaches and applications*, Reicharg EG., Zapponi GA. (eds.). Wallingford, UK : International Association of Hydrological Sciences, pp. 75-88.
- Nemery B., Hoet PHM., Nowak D. (2002). Indoor swimming pools, water chlorination and respiratory health. *Eur Respir J*, **19** : 790-793.
- Prüss A. (1998). Review of epidemiological studies on health effects from exposure to recreational water. *Int J Epidemiol*, **27** : 1-9.
- Skakkebaek NE., Rajpet-De Meyts E., Main KM. (2001). Testicular dysgenesis syndrome : an increasingly common disorder with environmental aspects. *Hum Reprod*, **16** : 972-8.
- Testud F. (2004). Engrais minéraux. *In : Encyclopédie Médico-Chirurgicale*. Elsevier, Paris, Toxicologie-Pathologie professionnelle, 16-060-A-10.
- Union européenne : principaux textes législatifs européens, accessibles sur <http://europa.eu.int/eur-lex/fr/index.html>, visant à améliorer l'état des ressources en eau, et à maîtriser les pollutions à la source : Directive cadre 2000/60/CE ; Directive sur les produits phytopharmaceutiques 91/414/CE ; Directive sur les substances dangereuses 76/464/CE.
- Vandentorren S., Dor F., Bonvallot N. (2004). *Évaluation des risques sanitaires des sous-produits de chloration de l'eau potable*. Partie 1 — Caractérisation des dangers. Institut de veille sanitaire.
- WHO (2004). Fluoride. *In : Guidelines for drinking-water quality*. 3rd ed. Volume 1 — Recommendations, pp. 375-377.
- www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/pnse/sommaire.htm

CHAPITRE 4

Eau et climat

HERVÉ DOUVILLE, KATIA LAVAL, DANIEL CARIOLLE, SERGE PLANTON
ET JEAN-CLAUDE ANDRÉ

Introduction

Bien que ne représentant qu'une très faible partie de la quantité totale d'eau présente sur la planète, l'eau atmosphérique, principalement sous forme vapeur et liquide, joue un rôle déterminant dans le cycle énergétique de l'atmosphère, et à ce titre représente une des composantes majeures à prendre en compte pour l'étude du climat et de son évolution. Ce rôle climatique 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, que ce soit 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.

Maillon déterminant de la dynamique du climat et de son évolution, le cycle de l'eau est en retour très largement influencé et modifié par les fluctuations et les évolutions du climat, tant pour sa composante atmosphérique que pour ce qui concerne les eaux continentales. Le changement climatique annoncé, c'est-à-dire le réchauffement de la planète résultant de l'augmentation de la concentration atmosphérique des autres GES émis par l'homme¹, principalement par déstockage de carbone fossile, est donc de nature à modifier assez significativement la façon dont les ressources en eau sont distribuées, avec les conséquences inévitables sur l'habitabilité de la Terre.

L'objet de cette présentation est d'offrir une vision synthétique, et donc par nature assez générale, de ces différents aspects, vision basée sur une revue des principaux travaux conduits récemment, tant en France qu'au niveau international, et qui font l'objet d'un large consensus au sein de la communauté scientifique.

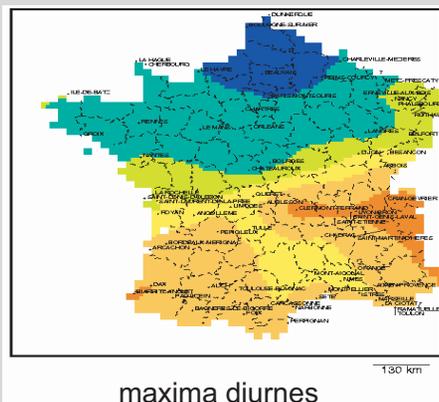
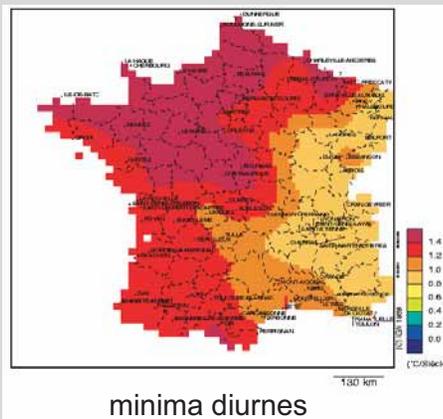
¹L'homme émet aussi de la vapeur d'eau directement à l'altitude de vol des avions, c'est-à-dire autour de la tropopause, et cette émission dans une partie de l'atmosphère habituellement sèche peut avoir des conséquences climatiques (cf. la fin § 3.3).

Encadré 4.1

Tendances actuelles et climat futur sur la France

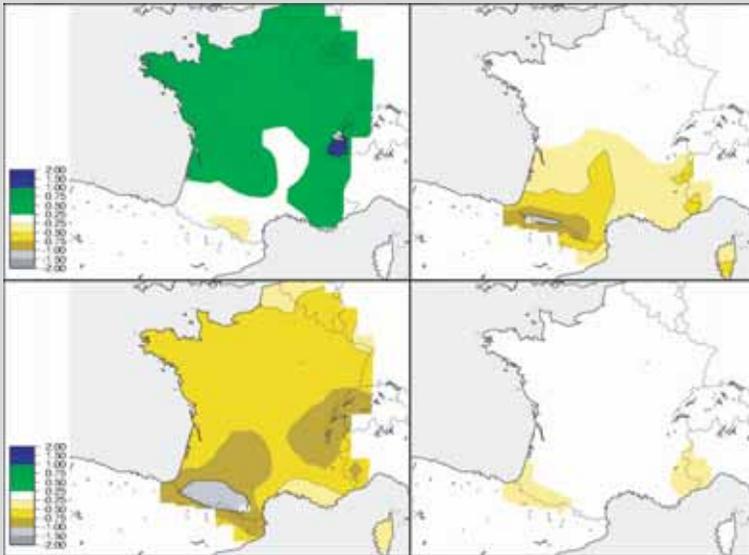
Hervé Douville, Jean-Marc Moisselin, Joël Noilhan, Météo-France, Toulouse
et Jean-Claude André, Cerfacs, Toulouse

Si les mesures météorologiques font apparaître une élévation de la température moyenne d'environ $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ sur l'ensemble de la planète depuis le début de l'ère industrielle, les températures en France ont connu quant à elles au cours du XX^{e} siècle un réchauffement de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ des minima diurnes, avec une augmentation plus marquée vers l'ouest du pays, tandis que les maxima diurnes connaissent une augmentation plus limitée, le plus souvent inférieure à $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ et surtout marquée sur le sud du pays (Moisselin *et al.*, 2002 ; Spagnoli *et al.*, 2002).



Ces caractéristiques, et particulièrement l'augmentation plus marquée des températures minimales, sont compatibles avec un changement climatique lié à l'augmentation de la concentration atmosphérique des GES.

Les expériences de régionalisation climatique du CNRM réalisées selon un scénario d'émission B2 (Gibelin et Déqué, 2003) indiquent par ailleurs pour la France, à l'horizon de la fin du XXI^e siècle, un accroissement pluviométrique hivernal (en haut à gauche) et un déficit estival (en bas à gauche), les intersaisons (printemps, en haut à droite, et automne, en bas à droite) étant marquées par un déficit plus modéré.



1 | Cycle énergétique et cycle de l'eau, de l'échelle globale vers l'échelle régionale

1.1 Le cycle énergétique global

Le tableau 4.1 récapitule les ordres de grandeur des principaux réservoirs énergétiques de l'atmosphère et des flux qui mettent ces différents réservoirs en communication. Si l'énergie interne et potentielle représente bien le plus important réservoir (mais seule une petite partie de cette énergie est utilisable pour l'alimentation de la dynamique), les deux formes d'énergie les plus directement concernées par le problème de l'eau et du climat sont l'énergie cinétique (environ 100 Wh m^{-2}), alimentée par des phénomènes d'instabilité (au taux d'environ 2 W m^{-2}), et l'énergie latente de la vapeur d'eau atmosphérique

(environ 15 kWh m^{-2}), alimentée par le flux d'évaporation (au taux d'environ 78 W m^{-2}).

Quelques premières remarques peuvent être faites à partir de ces ordres de grandeur :

- le flux d'évaporation de 78 W m^{-2} (énergie récupérée ultérieurement par l'atmosphère lors de la condensation nuageuse), soit l'équivalent une ampoule électrique pour chaque m^2 de la surface terrestre, correspond ainsi environ, en moyenne annuelle, à un flux évaporé de 20 millions de $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour l'ensemble de la planète ;
- l'échelle temporelle caractéristique de la partie atmosphérique du cycle de l'eau est ainsi d'environ huit jours ($= 15 \text{ kWh m}^{-2} / 78 \text{ W m}^{-2}$), à comparer à l'échelle caractéristique du mouvement, de l'ordre de deux jours seulement ($= 100 \text{ Wh m}^{-2} / 2 \text{ W m}^{-2}$), montrant ainsi toute l'importance de la régulation climatique qui est associée aux processus hydriques.

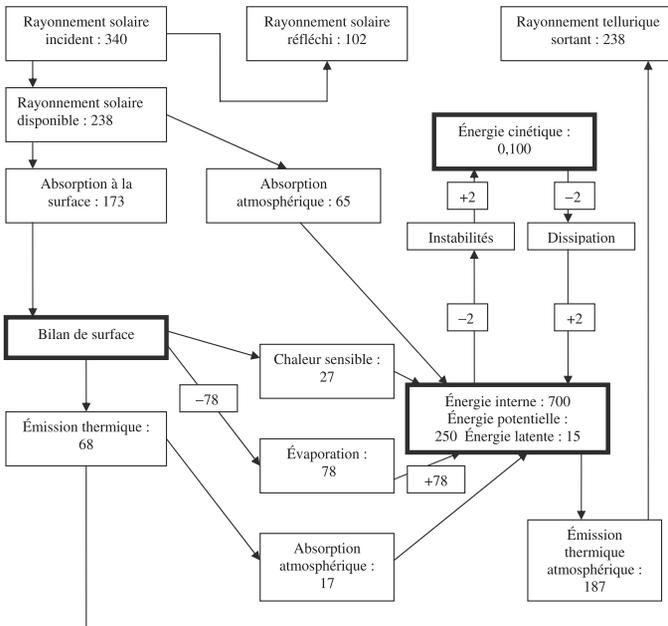


Tableau 4.1
Le cycle énergétique de l'atmosphère, flux (en W m^{-2}) et réservoirs (en kWh m^{-2}).

Le tableau 4.1 fait aussi apparaître que l'équilibre radiatif de la planète est largement piloté par le rayonnement atmosphérique sortant, pratiquement trois fois plus important que l'émission des surfaces elles-mêmes (187 W m^{-2} contre

68 W m^{-2}). Or, le rayonnement atmosphérique 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 l'émission des nuages, que ceux-ci soient à basse altitude et rayonnent donc 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 donc moins, et contribuant ainsi à l'effet de serre.

1.2 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.

La quantité d'eau contenue dans l'atmosphère ne représente qu'une toute petite partie des ressources en eau de la planète (figure 4.1). Si l'on pouvait condenser toute la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère à un moment donné, le volume ainsi occupé ne représenterait que celui d'une petite mer intérieure d'une surface d'à peine plus de $80 \times 80 \text{ km}^2$ et profonde de 2 000 m, soit environ $13\,000 \text{ km}^3$ ou « seulement » 75 fois les réserves maximales du barrage d'Assouan ! Malgré ces faibles réserves en eau, la vapeur d'eau atmosphérique est l'élément prépondérant du cycle hydrologique car elle permet les changements de phase et les échanges énergétiques associés, en plus du rôle essentiel qu'elle joue dans le bilan radiatif.

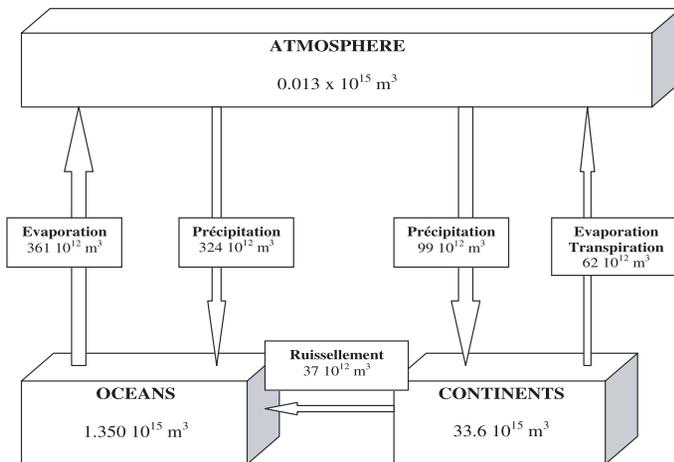


Figure 4.1
Le cycle global de l'eau (d'après Peixoto et Kettani, 1973).

Encadré 4.2

Cycle de l'eau : rétroaction continentale évapotranspiration-pluie

Alain Perrier, INAPG et Katia Laval, LMD Paris VI

L'évaporation au-dessus des océans (71 % de la planète qui apportent $361 \text{ Tm}^3 \text{ an}^{-1}$ de vapeur d'eau, cf. figure 4.1) se fait au voisinage de la valeur potentielle EP (valeur sans restriction d'eau, d'une part en quantité et d'autre part en potentiel thermodynamique, voisin de zéro ou eau libre). Au-dessus des continents (29 % des surfaces, soit $62 \text{ Tm}^3 \text{ an}^{-1}$, cf. figure 4.1) elle se fait au taux ET de l'évapotranspiration, où ET est en moyenne plus faible ($ET_{\text{cont}} \cong 0,4EP_{\text{océan}}$, réduction due à la fois au manque d'eau dans le temps et l'espace et à la forte rétention de l'eau, avec abaissement des potentiels de surface). Le bilan fait apparaître sur les océans un surplus d'eau évaporée qui est naturellement transportée (on dira advectée) sur les continents. **Ce bilan montre que les pluies continentales proviennent pour deux tiers de l'évaporation des continents et d'un tiers de l'advection**; or elles représentent le point majeur du devenir des éco- et agrosystèmes et déterminent les apports nets (pluie moins évaporation) et donc les possibilités d'utilisation anthropique (disponibilité et accessibilité).

Deux vieilles questions demeurent : En quoi la déforestation, l'aridification puis la désertification de surfaces ont-elles à grande échelle un impact sur le devenir moyen à long terme des pluies ? En quoi le développement des éco- et agrosystèmes avec un fort apport d'eau (70 % de l'eau prélevée par l'homme allant à l'irrigation) peut favoriser un retour sous forme de pluies ? Pas de réponse claire mais une convergence de faits recherchés depuis plus d'une décennie à travers simulations et expériences (HAPEX, Rowntree, 1991, ou AMMA, Lebel et Vischel, 2005). Aux États-Unis, des résultats semblent assez probants ; au Sahel, des observations montrent une tendance d'une année sur l'autre à constater des pluies sur les mêmes zones. Des simulations faites au Laboratoire de Météorologie Dynamique sur l'Inde et sur la Chine puis sur les États-Unis (forte irrigation sur certaines zones) tendent à montrer cet effet d'accentuation du retour sous forme de pluies (Laval *et al.*, 2005). Cette tendance montre aussi que cette augmentation des pluies couvre des zones plus vastes que celles irriguées et que, globalement, le retour sous forme de pluie représente deux à trois fois les apports en irrigation.

Le poids anthropique devient de plus en plus certain ; cet effet apparaît aussi bien au niveau de la désertification qu'au niveau inverse du rôle à grande

échelle de l'irrigation et surtout de l'amélioration de l'évapotranspiration des surfaces continentales par une meilleure valorisation des pluies par les couverts végétaux.

Encadré 4.3

Ressources en eau et couvert végétal

Alain Perrier, INAPG et Suzanne Mériaux, Académie d'agriculture de France

En France, la couverture végétale dépend essentiellement de l'agriculture (60 %), de la forêt (28 %) et des parcs et jardins (3 %). La végétation couvre donc plus ou moins 90 % de l'espace et joue sur les termes du bilan hydrique par interception des précipitations, régulation de l'évaporation, modification de l'infiltration et du ruissellement : la ressource en eau et sa qualité en dépendent. Le reste est imperméabilisé car anthropisé (10 %), collectant les pluies et les pollutions présentes accélérant le transfert dans le milieu, souvent sans traitement.

L'influence sur le cycle de l'eau : Les ressources en eau dépendent de ce qu'on appelle les **apports nets** [$AN = \sum_1^n P_i - \sum_1^n \alpha_i \cdot EP_i$], ressources potentielles pour les activités anthropiques qui résultent du bilan climatique entre **les apports** (pluies P) et **les pertes** induites (évapotranspiration ET) par la demande climatique ou l'évaporation potentielle (EP). Cette demande climatique est déterminée par les paramètres du climat et la structure du couvert. Dans le temps et dans l'espace, les apports nets sont donc très variables et sous la dépendance de la nature de l'interface (continuum sol-végétation-atmosphère). Par rapport au climat (P et EP), c'est le coefficient α ($ET = \alpha EP$) qui modulera les apports nets selon la couverture végétale et les réserves en eau du sol qu'elle peut mobiliser.

Les apports nets ne sont donc pas un dû climatique, mais le résultat de la gestion humaine de l'interface : (1) roche mise à nue ($\alpha \approx 0$), soit AN maximum ; (2) sol nu ($\alpha \approx 0,2 - 0,4$), soit $AN < AN_{max}$; (3) végétation selon son développement, sa couverture et la réserve en eau du sol disponible ($\alpha \approx 0.3$ à $0,7-0,8$, soit AN_{min}). Les ressources en eau dépendent bien de la gestion et de l'exploitation anthropique des espaces. Cependant cette approche ne tient pas compte des rétroactions qu'induit l'évaporation (ET) à l'échelle régionale. En effet toute réduction de ET : (1) augmente la demande climatique et l'aridité du milieu ; (2) augmente les besoins en eau sur les zones irriguées (proportion de EP) ; (3) augmente le déficit hydrique et la température de

l'air ainsi que les températures des végétaux accroissant les contraintes physiologiques (xérophytisme, échaudage); (4) réduit l'effet de retour sur les pluies à plus grande échelle (voir encadré : 4.2).

Généralement la forêt recycle (évaporation) au mieux les apports d'eau liquide en se protégeant contre la demande climatique ($\alpha \approx 0,5$), en jouant sur les réserves biologiques (15 à 20 j possibles), en explorant mieux les réserves profondes du sol et en améliorant l'infiltration aux dépens du ruissellement, ce qui réduit et régularise les cours d'eau. Les prairies recyclent de façon moins permanente (enracinement moins profond : 40 à 60 cm de sol); elles épuisent à certaines périodes leurs réserves du sol, arrêtent l'évaporation, gardent leur potentiel de redémarrage et couvrent toujours le sol (ruissellement réduit). Pour les cultures, l'épuisement des réserves (0,6 à 2 m de sol et $\alpha \approx 0,7$) est fréquent d'où les pratiques qui induisent l'irrigation et de grandes périodes de sol nu (érosion et aridification du milieu). Les systèmes mixtes d'espaces arbres-cultures avec strate arborée éparse (savane) ou organisée (bocage) réduisent par écran radiatif et convectif la demande climatique (EP), améliorant et régularisant les bilans; leur fonctionnement se rapproche de celui de la forêt. Les connaissances actuelles se développent par l'intégration de modèles allant de la physiologie à la plante et du continuum local au régional (Hapex-Mobily par exemple, Lebel et Le Barbé, 1997; Bouchet *et al.*, 2004). Par contre, il reste à étudier les rétroactions à plus grande échelle et le poids des changements globaux sur le long terme.

Les effets de la couverture végétale sur la qualité de l'eau dépendent de l'intensité des précipitations qui conditionne drainage (entraînement dans les sols) et ruissellement (entraînement de surface ou subsurface) selon la composition du sol, du sous-sol et des actions anthropiques. La forêt reste globalement peu polluante, alors que l'apport excessif de fertilisants et de pesticides en agriculture donne lieu à une pollution très médiatisée que les actions volontaristes des exploitants devraient permettre de maîtriser à long terme. Mais des recherches sont nécessaires pour mieux maîtriser les types de pollution (ponctuelle, diffuse) et les normes en relation avec le risque réel pour l'homme et l'environnement.

1.3 Quelques remarques sur les circulations atmosphériques, le recyclage local de l'eau, et le climat local

Un calcul élémentaire d'ordre de grandeur montre qu'un système nuageux précipitant, dont la durée de vie est de l'ordre de 2 à 3 jours, ne se déplace pendant ce temps que d'une distance de l'ordre du millier de kilomètres (en

supposant une vitesse de déplacement moyenne d'environ 10 ms^{-1} , ordre de grandeur de la vitesse du vent dans l'atmosphère). En considérant que la durée de vie de ce système nuageux est peu différente de l'intervalle de temps séparant les dates d'évaporation et de précipitation de l'eau qu'il contient, on en déduit donc que l'eau atmosphérique pilote des mécanismes particulièrement efficaces pour induire des corrélations spatiales entre zones géographiques proches. Le précédent argument est d'ailleurs encore plus fort si l'on considère des systèmes atmosphériques convectifs, pour lesquels le déplacement des nuages est beaucoup moins important, et pour lesquels la portée des corrélations spatiales induites est donc beaucoup plus courte. De façon plus quantifiée, Chahine *et al.* (1997) ont montré que l'eau atmosphérique était recyclée environ trois fois par mois, une estimation confirmée par Trenberth (1998) qui, par une méthode différente, arrive à un temps moyen de résidence (au sens du « *e-folding time* ») tout juste supérieur à huit jours.

Ceci fournit en particulier un cadre explicatif pour nombre de phénomènes climatiques locaux (en prenant toutefois en compte l'influence simultanée de l'orographie) et permet de comprendre pourquoi le cycle de l'eau atmosphérique présente de nombreuses boucles de rétroaction positive : 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 (cas de la vague de chaleur de l'été 1976 en France et en Europe du Nord), ou encore les cas où un sol inondé réalimente les précipitations, *via* à la fois 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 (cas des inondations de l'été 1993 aux États-Unis ; Betts *et al.*, 1994).

1.4 L'hétérogénéité spatiale des phénomènes

Les moyennes climatiques et les arguments généraux présentés plus haut 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 sur 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, comme ceci sera discuté plus bas.

2 | Eau, chimie et climat

Les trois états de la molécule d'eau, vapeur, liquide ou glace, jouent un rôle direct ou indirect dans la chimie de l'atmosphère. Les interférences directes ont

lieu par l'intermédiaire de la chimie en phase hétérogène (aqueuse ou solide) dans les nuages liquides ou formés de particules de glace, ou bien encore sur les surfaces enneigées ou la banquise. Les interférences indirectes proviennent de la source de radical OH que constitue la vapeur d'eau en altitude, ou des interférences du flux actinique avec les particules des nuages. L'ensemble de ces interactions est détaillé ci-après.

2.1 Chimie en phase homogène

La vapeur d'eau est la principale source du radical OH dans la haute atmosphère au-dessus de 20 km. En effet, à ces altitudes, la réaction $O(^1D) + H_2O \rightarrow 2 OH$ domine (figure 4.2). À plus basse altitude, la chaîne d'oxydation du méthane constitue généralement la source prédominante, bien que dans les masses d'air humides équatoriales la réaction ci-dessus puisse rester une source importante.

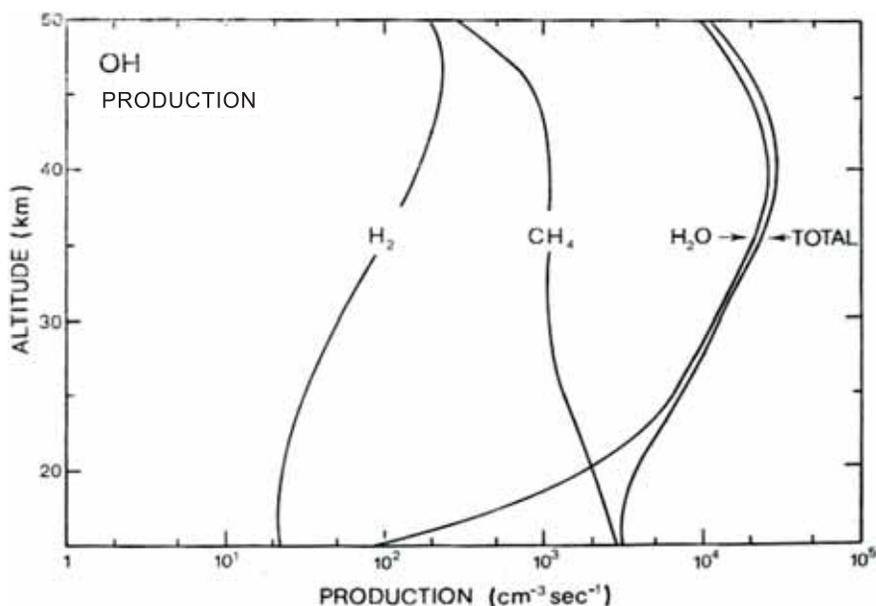


Figure 4.2

Répartition de la production du radical OH pour les distributions verticales de H_2O , CH_4 et H_2 .

Le radical OH joue un rôle primordial dans la chimie de l'atmosphère car il initie l'oxydation ou la formation de nombreuses espèces « réservoir » de la chimie de l'atmosphère (CH_4 , CH_2O , HNO_3 , HCl , etc.), et régule la concentration d'ozone et la durée de vie de nombreuses espèces, notamment le méthane, puissant GES. Toute variation de la concentration de la vapeur d'eau peut donc

avoir de l'influence sur la concentration d'espèces mineures dont certaines ont un effet de serre important.

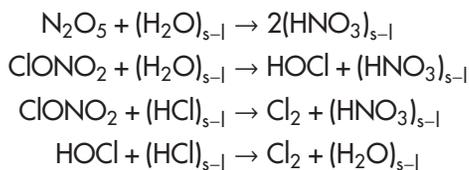
Les mesures de H₂O disponibles dans la haute atmosphère ont récemment mis en évidence une augmentation de sa concentration, dont les causes ne sont pas connues. Une des origines possibles pourrait être un changement dans la circulation générale de l'atmosphère à ces altitudes, ou une variation de la température de la tropopause équatoriale, ou bien encore l'effet cumulatif des émissions des aéronefs lorsque ceux-ci volent au-dessus de la tropopause.

2.2 Chimie en phase hétérogène

C'est notamment l'étude des processus de formation du « trou d'ozone » dans la stratosphère qui a mis en évidence l'importance de la chimie atmosphérique hétérogène. Deux mécanismes principaux doivent être pris en compte.

Le premier résulte de la captation et de l'inclusion d'espèces hydrophiles dans les particules d'eau ou de glace. C'est notamment le cas des acides HNO₃, HCl et H₂SO₄. Le deuxième mécanisme accompagne le premier, une fois les espèces hydrophiles captées par les particules : des réactions à leur surface peuvent avoir lieu, agissant ainsi sous forme de catalyseur.

On a pu ainsi identifier un certain nombre de réactions importantes pour la chimie de l'atmosphère :



Ces réactions peuvent rentrer en compétition avec les réactions en phase homogène et conduire à des cycles de production ou destruction de l'ozone. En phase aqueuse, cette chimie peut contribuer également à l'acidification des gouttelettes des nuages et au phénomène appelé « pluie acide ».

À noter également que la composition chimique des masses d'air affectées par la formation d'un nuage change même dans le cas où le nuage s'évapore sans précipiter, ce qui fait que, dans la troposphère, l'influence de la chimie hétérogène est omniprésente. Des perturbations de la composition chimique existent aussi au niveau des couches limites atmosphériques en contact avec la neige et la glace, mais les mécanismes en sont encore mal connus.

3 | Le changement climatique d'origine anthropique

3.1 Augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (GES)

Depuis le début de l'ère industrielle, l'homme déstocke le carbone contenu dans les combustibles fossiles (charbon, puis pétrole et gaz naturel). Cette combustion dégage, entre autres, du gaz carbonique, un GES très actif contribuant à modifier l'équilibre radiatif et thermique de la planète, en le déplaçant vers le réchauffement. D'autres effets viennent s'ajouter à cette combustion pour augmenter les émissions de CO₂, dont la déforestation. Ce sont actuellement environ 7×10^9 tonnes de carbone qui sont annuellement déstockées, et dont un peu moins de la moitié fait augmenter, année après année, la concentration atmosphérique du CO₂ (figure 4.3). D'autres GES sont par ailleurs émis par les activités humaines (méthane, oxydes d'azote, ozone, hydrofluorocarbures, ...), contribuant à augmenter encore l'effet de serre additionnel d'origine anthropique. Les projections² réalisées par l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) conduisent, selon les scénarios, à des concentrations

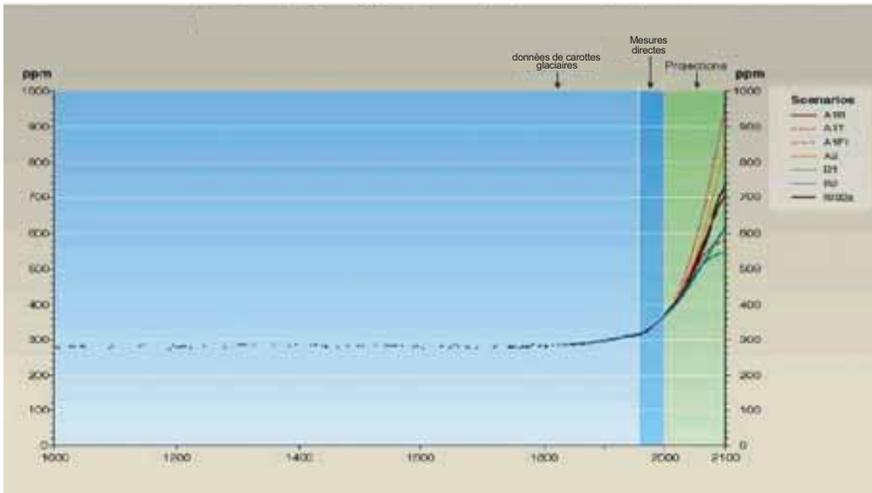


Figure 4.3

Évolution passée de la concentration atmosphérique de gaz carbonique, et scénarios pour l'évolution future (IPCC, 2001).

²Ces projections sont établies sur la base d'hypothèses vraisemblables d'évolution de la démographie, de la rapidité et du mode de développement des divers pays.

en « CO₂ équivalent » pouvant atteindre près de 1 000 ppm³ à l'horizon de la fin du siècle, valeur à comparer à 180 ppm pour les périodes glaciaires, 280 ppm pour les périodes interglaciaires sans influence humaine, et 380 ppm actuellement.

Encadré 4.4

El Niño et le réchauffement climatique

Pierre Ribstein, université Paris VI

À l'échelle interannuelle, le phénomène ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) est considéré comme la plus importante fluctuation naturelle du climat (IPCC, 2001). Il a un impact sur les précipitations et sur le régime hydrologique des rivières d'une grande partie du globe (Dettinger *et al.*, 2000). Or, il semble y avoir une augmentation des événements El Niño depuis le milieu des années 1970 et les deux plus forts El Niño du XX^e siècle se sont produits en 1982 et 1997. Existe-t-il un lien entre ces événements ENSO plus fréquents et plus intenses et le réchauffement climatique actuel ? Certains auteurs, en analysant différentes chroniques observées, ont avancé l'idée qu'une augmentation rapide de température pouvait induire, à court terme, des événements El Niño plus fréquents (Herbert et Dixon, 2003). C'est une question qui préoccupe d'autant plus la communauté scientifique que les modèles donnent des résultats parfois contradictoires (Nyenzi et Lefale, 2006). Dans un article récent, Guilyardi (2005) compare différents modèles couplés océan-atmosphère et en déduit que la réponse à une augmentation des gaz à effets de serre pourrait se traduire vraisemblablement par une augmentation de l'amplitude des événements ENSO mais pas de leur fréquence. Il ne faut pas conclure trop rapidement car les simulations sont réalisées en mode transitoire (ce qui est le monde réel !) avec d'importantes difficultés liées à un forçage à variation lente dans un système présentant une variabilité naturelle très grande.

3.2 L'eau, principal GES

La problématique du réchauffement climatique lié à l'**augmentation** de l'effet de serre ne doit pas faire oublier que l'effet de serre lui-même est un facteur primordial pour l'existence de la vie sur Terre : sans effet de serre naturel, la température d'équilibre de la planète serait en effet d'environ -15 °C, empêchant la présence d'eau liquide à la surface. Cet effet de serre naturel résulte

³Parties par million.

pour la plus grande partie de l'action de l'eau atmosphérique, tant sous forme vapeur que *via* les nuages, et permet à la planète d'atteindre une température d'équilibre plus chaude d'approximativement 33 °C.

Dans ces conditions, il est clair que la réponse du climat à l'augmentation des concentrations de GES émis par l'homme va être très largement influencée par la façon dont le cycle de l'eau va être ou non perturbé par, et va rétroagir avec, le réchauffement climatique. Cette question, dite de la « sensibilité climatique » (c'est-à-dire, quelle est l'augmentation de température moyenne liée à une perturbation radiative donnée ?), est encore très largement ouverte du point de vue scientifique, et explique pour près de 50 % la dispersion du réchauffement moyen simulé par les modèles climatiques à l'horizon de la fin du siècle (IPCC, 2001).

3.3 Les nuages, leurs rôles vis-à-vis de l'effet de serre

Il semble toutefois, d'un point de vue simplement qualitatif, que le climat perturbé par l'effet de serre additionnel d'origine anthropique soit le siège d'une intensification du cycle hydrologique. Cette intensification (au sens d'une amplification) est illustrée à la figure 4.4, montrant le lien entre accroissement des précipitations globales et réchauffement global, tel qu'estimé au cours d'une simulation du climat passé et futur (1860 à 2100) selon le scénario dit « A2 » pour l'augmentation des GES (voir aussi Douville *et al.*, 2002, et Yang *et al.*, 2003). Il faut cependant noter que l'on n'a pas encore observé de tendance vers une intensification du cycle hydrologique : à l'aide d'observations sur les 53 dernières années, Ngo-Duc *et al.* (2005a) ont étudié l'évolution des réserves en eau continentales et montré que lorsque, pour certaines décennies, cette intensification avait existé, elle avait ensuite été suivie de périodes de ralentissement du cycle (figure 4.5).

La détermination quantitative de l'amplitude du changement climatique et de la modification concomitante du cycle hydrologique dépend crucialement de la façon dont les systèmes nuageux évolueront :

- si c'est la couverture en nuages bas (donc « chauds ») et brillants (donc avec une plus forte capacité à réfléchir le rayonnement solaire incident par effet d'albédo) qui augmente, ceci aura un effet modérateur sur le réchauffement d'origine anthropique ;
- si c'est la couverture en nuages hauts (donc « froids ») et semi-transparents qui augmente, ceci aura l'effet contraire, c'est-à-dire conduira à une amplification du réchauffement.

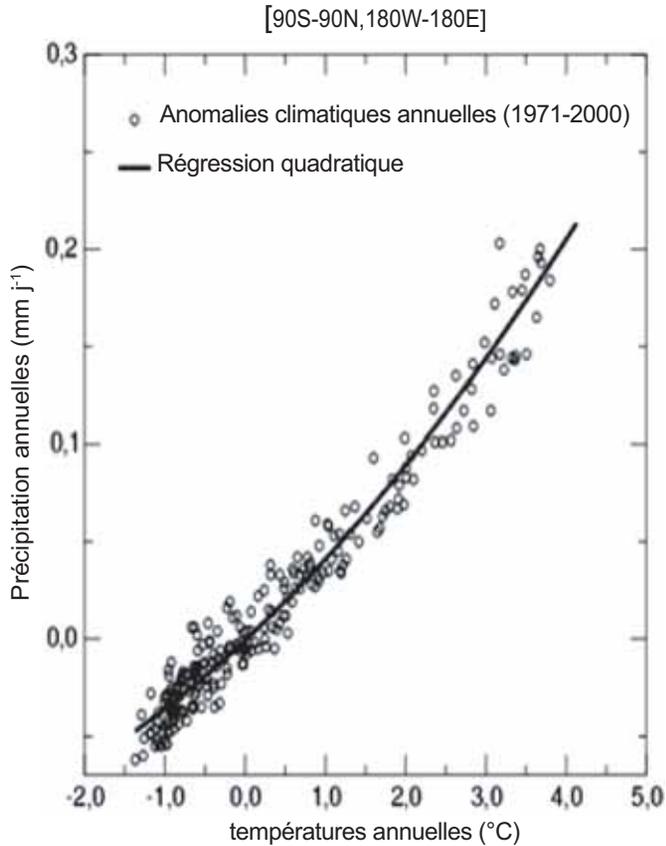


Figure 4.4

Variations concomitantes des précipitations globales et de la température atmosphérique globale près du sol (2 m).

La présence de nuages dans l'atmosphère ne modifie pas seulement l'équilibre d'ensemble entre apport solaire (albédo) et rayonnement dans l'infrarouge thermique (effet de serre), mais elle influe aussi sur la répartition du flux radiatif solaire dans les parties du spectre visible et ultraviolet qui sont à l'origine de la photodissociation de nombreuses espèces atmosphériques : O_3 , NO_2 , NO_3 , Cl_2 , CH_2O , HNO_3 , etc. En effet, dans sa traversée de l'atmosphère, le flux solaire peut être réfléchi à la surface des nuages (albédo élevé des nuages) ou subir des diffusions multiples dans les nuages. Le flux actinique variera donc en fonction de la taille des particules et leur composition (eau ou glace) et des épaisseurs optiques rencontrées. Il est donc nécessaire de procéder à des calculs radiatifs précis (grande dépendance en fonction de la longueur d'onde) pour obtenir une bonne évaluation des flux radiatifs efficaces pour la photodissociation (§ 2).

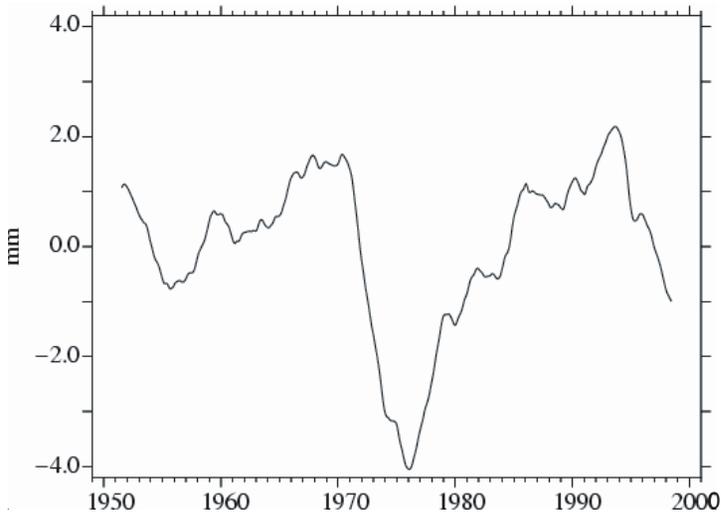


Figure 4.5

Variation du volume du réservoir des eaux continentales (exprimée en variation équivalente du niveau de la mer exprimé en millimètres) au cours des cinq dernières années.

Au-delà des effets sur le cycle hydrologique *via* l'augmentation de la concentration atmosphérique des GES, des perturbations régionales peuvent affecter directement ou indirectement la couverture nuageuse. C'est le cas notamment du trafic aérien dont les effluents particulaires (suies, particules métalliques) augmentent la concentration des noyaux de condensation et donc la fréquence des nuages élevés de type cirrus. Ces nuages sont issus des traînées qui apparaissent derrière les avions en vol de croisière et peuvent, en fonction des conditions météorologiques, s'étaler pour former des cirrus, augmentant l'effet de serre de façon importante. L'effet radiatif dans les couloirs aériens est significatif et demande à être quantifié à l'échelle globale. Une étude récente (Minnis *et al.*, 2004) attribue notamment une large part du réchauffement observé durant les dernières décennies au-dessus de l'est des États-Unis à l'augmentation du trafic aérien sur ces zones.

4 | Le cycle hydrologique en climat perturbé

4.1 Les précipitations

Une étude récente (Räisänen, 2002) a permis de comparer les simulations de 19 modèles pour un doublement de la concentration de GES : les modèles simulent un accroissement des précipitations moyennes presque partout (zones

équatoriales, zones de moyennes et hautes latitudes), même s'il est possible de noter des réductions sur les zones subtropicales. L'ordre de grandeur de ces variations est localement de 5 à 15 %, voire plus (cf. par exemple les figures 4.6 et 4.7), avec une valeur globale de 2,5 %, ce qui correspond à 0,07 mm/jour. Cette valeur moyenne est comprise entre -0,2 % et 5,6 % pour l'ensemble des modèles. Bien que ces variations globales ne soient pas négligeables, on constate qu'elles restent limitées.

Le doublement de la quantité de GES s'accompagne dans les simulations d'une augmentation de la variabilité, et les extrêmes peuvent être amplifiés (cf. aussi § 5). L'écart quadratique de la précipitation varie de 3 % à 11 % (un seul modèle simule une variation négative), avec une moyenne de 4 %, correspondant à 0,04 mm/jour. Dans ce cas aussi, les variations régionales sont plus importantes et peuvent atteindre 15 % localement. Cet accroissement est maximum vers les tropiques et vers les régions de hautes latitudes.

Les figures 4.6 et 4.7 montrent, pour un modèle particulier, la répartition globale des changements de précipitations absolus et relatifs simulés dans un scénario B2 (expérience SG1) entre la seconde moitié du XX^e siècle et la seconde moitié du XXI^e siècle. En hiver boréal (décembre à mars), les précipitations augmentent généralement aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère Nord et sur la zone de convergence intertropicale (ITCZ), mais diminuent dans les régions subtropicales de part et d'autre de l'ITCZ. En été boréal (juin à septembre), on obtient une réponse relativement symétrique sous les tropiques (migration de l'ITCZ dans l'hémisphère Nord), avec une intensification des pluies de mousson sur l'Afrique de l'Ouest et le sud de l'Asie, un assèchement partiel des moyennes latitudes de l'hémisphère Nord, tandis que les hautes latitudes restent en général plus humides.

Toutefois, si les modèles climatiques actuels sont capables de reproduire les grands traits de la répartition zonale des précipitations, ils ne sont pas encore assez précis pour reproduire la localisation exacte des zones de convergence (fortes précipitations) et de subsidence (déserts subtropicaux), comme ceci apparaît à la figure 4.8, où des variations d'environ 10 °C de latitude existent entre modèles pour la localisation des maxima et minima de précipitations⁴.

⁴Ceci est probablement l'une des raisons pour lesquelles les modèles climatiques, qu'ils soient couplés ou non, mis en situation de reproduire le climat de l'Holocène par prescription des conditions d'ensoleillement qui régnaient il y a 6 000 ans, n'y parviennent pas réellement : s'ils réussissent bien, par exemple, à simuler une migration vers le nord de la mousson africaine et une augmentation des précipitations liées à celle-ci (Joussaume *et al.*, 1999 ; Braconnot *et al.*, 2000), ces modifications restent trop faibles pour expliquer les conditions beaucoup plus humides qui régnaient alors sur le nord de l'Afrique (Lac Tchad, Tassili, . . .). Il est possible qu'une bien meilleure prise en compte des interactions entre le climat et la végétation soit nécessaire avant de parvenir à une amélioration notable de la performance des modèles climatiques pour la reproduction de ces changements hydrologiques.

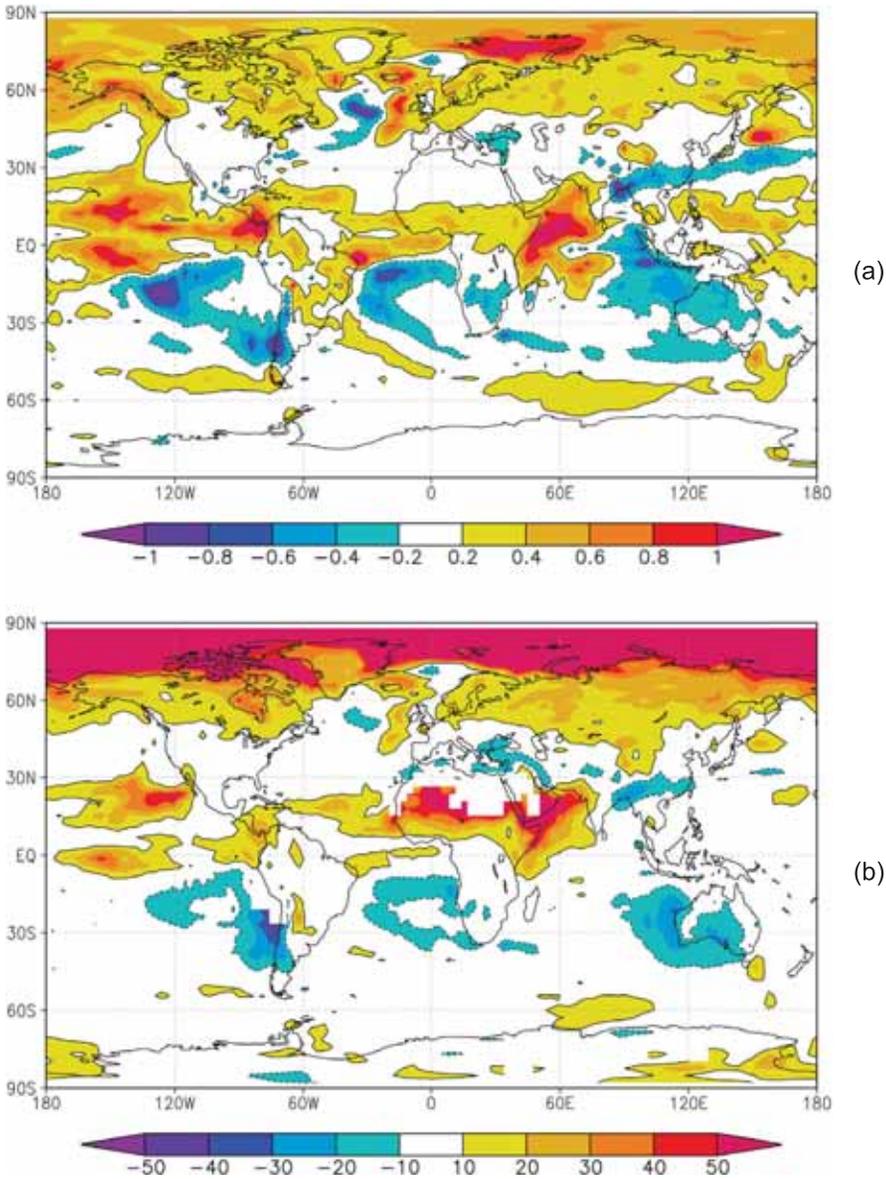


Figure 4.6

Cartes globales d'anomalies de précipitations (en mm/jour en haut, en % en bas) simulées de décembre à mars dans un scénario B2 du CNRM entre les périodes (2050-99) et (1950-99).

Ceci implique en particulier qu'il soit très délicat de préciser de façon nette la modulation climatique du devenir des ressources en eau dans les régions subtropicales africaines (figure 4.9, cf. IPC, 2001).

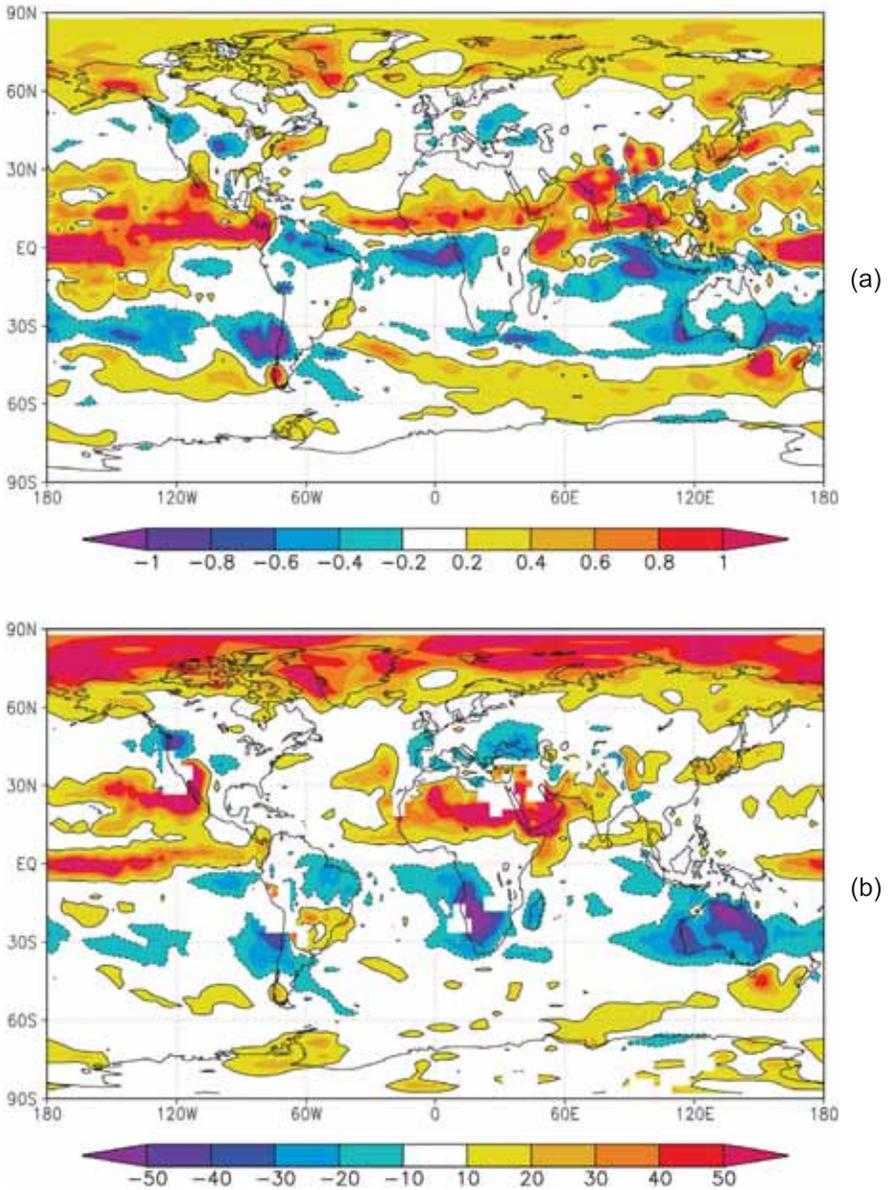


Figure 4.7
 Cartes globales d'anomalies de précipitations (en mm/jour en haut, en % en bas) simulées de juin à septembre dans un scénario B2 du CNRM entre les périodes (2050-99) et (1950-99).

4.2 L'eau du sol

Une autre conséquence, source de répercussions importantes sur l'économie, est l'état de plus grande sécheresse qui peut affecter certaines régions semi-

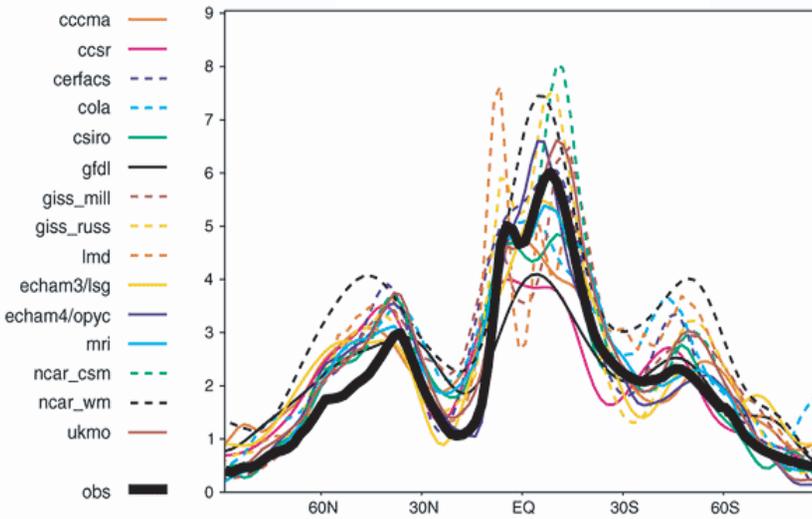


Figure 4.8
Répartition zonale des précipitations moyennes (en mm/jour) d’hiver (décembre à février), pour le climat actuel, telles que simulées par les modèles engagés dans l’expérience d’intercomparaison CMIP1. Les valeurs mesurées sont représentées par la courbe en trait fort (d’après Lambert et Boer, 2001).

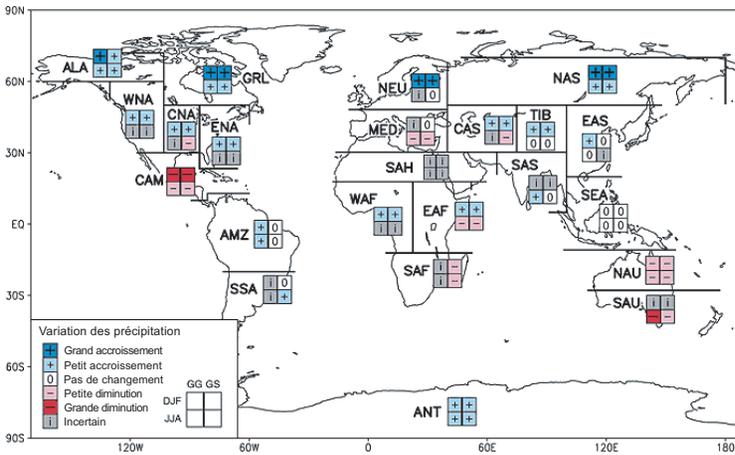


Figure 4.9
Analyse de la consistance des modèles en terme de précipitations régionales : « Grand(e) accroissements/diminitions » signifie un accord sur des accroissements/diminitions de plus de 20 %, « Petit(e) accroissement/diminitions » un accord sur des accroissements/diminitions compris entre 5% et 20 %, « Pas de changement » un accord sur des changements compris entre -5 % et +5 %, et « Incertain » un désaccord entre les modèles.

arides. Des intégrations suffisamment longues (300 ans) ont montré que si, en hiver, le contenu en eau des sols augmente sous les moyennes et hautes latitudes, en été, l’eau des sols peut diminuer fortement. Par exemple, les simulations

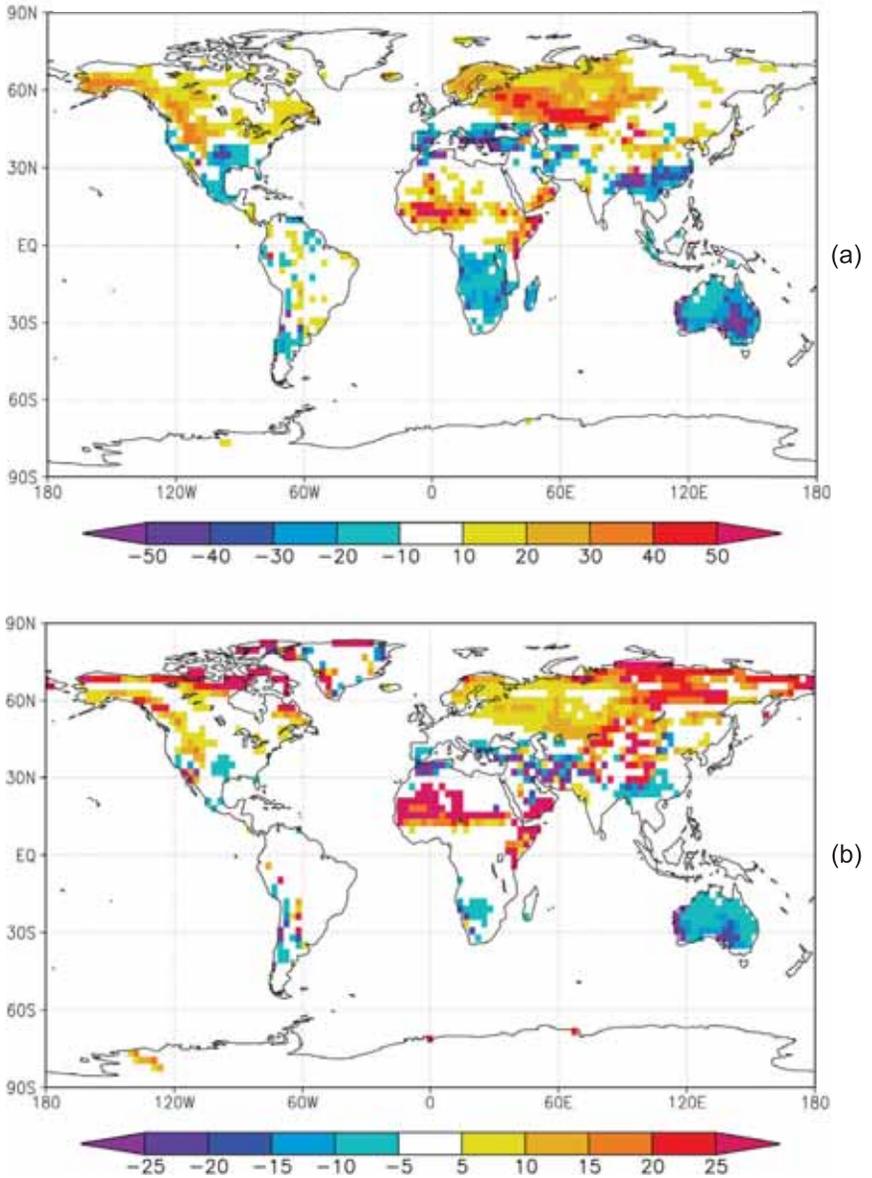


Figure 4.10

Cartes globales d'anomalies d'humidité du sol (en kg/m^2 en haut, en % en bas) simulées de décembre à mars dans un scénario B2 du CNRM entre les périodes (2050-99) et (1950-99).

réalisées avec le modèle ISBA (Douville *et al.*, 2002; Spagnoli *et al.*, 2002) montrent (figures 4.10 et 4.11) un assèchement estival sur l'Europe, tandis que les anomalies d'hiver présentent un gradient nord-sud avec une humidification

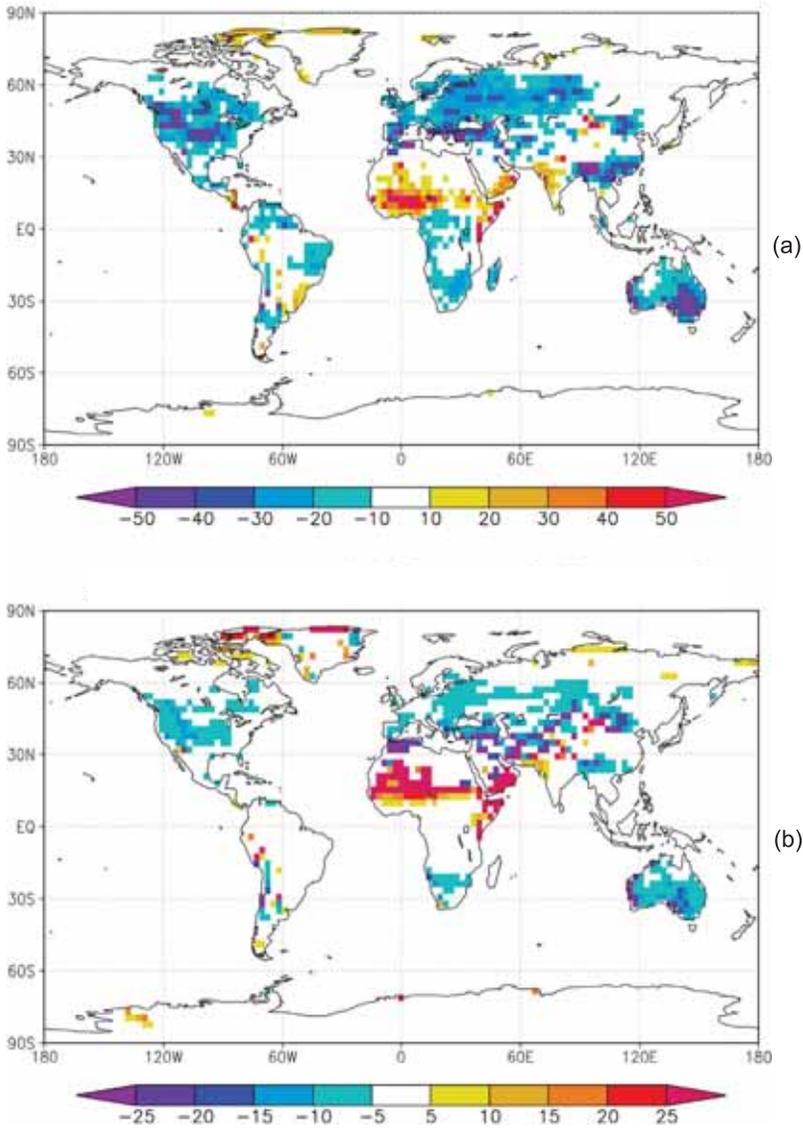


Figure 4.11

Cartes globales d'anomalies d'humidité du sol (en kg/m^2 en haut, en % en bas) simulées de juillet à septembre dans un scénario B2 du CNRM entre les périodes (2050-99) et (1950-99).

des hautes latitudes, mais un assèchement du pourtour méditerranéen, pouvant conduire dans ces régions à des sécheresses d'été suffisamment intenses pour réduire la disponibilité de l'eau continentale pendant la plus grande partie de l'année.

Ces anomalies restent malheureusement très incertaines puisqu'on ne dispose d'aucune véritable climatologie pour valider l'humidité du sol simulée sur la période actuelle. Elles sont toutefois importantes autrement que *per se*, dans la mesure où elles déterminent en partie le réchauffement continental simulé en surface, notamment sous les tropiques, ainsi qu'aux moyennes latitudes en été. Les simulations montrent néanmoins que ces variations de contenu en eau des sols liées au changement climatique ne seront probablement détectables sans ambiguïté, c'est-à-dire avec un niveau supérieur à celui des fluctuations climatiques naturelles, que vers le milieu du XXI^e siècle, soit assez significativement plus tard que pour l'augmentation de la température (cf. aussi § 5).

4.3 Le manteau neigeux

Dans les scénarios globaux à basse résolution, le modèle ISBA prévoit un retrait progressif de la couverture neigeuse de l'hémisphère Nord, qui est en accord avec le retrait constaté dans les observations spatiales de la NOAA⁵ sur la période 1979-1999 (diminution de l'ordre de 60 000 km²/an en hiver), et se renforce au cours du XXI^e siècle pour atteindre un déficit final de l'ordre de 10 millions de km² en hiver (soit environ 20 % de la surface actuelle). Le stockage hydrique *via* le manteau neigeux en montagne est important à deux titres : d'une part, il influence largement les activités touristiques liées à la pratique des sports d'hiver, et, d'autre part, il détermine l'alimentation de nombreux fleuves et rivières *via* la fonte nivale. Il participe enfin aux transformations chimiques en phase hétérogène (cf. *supra*).

4.3.1 Influence sur l'enneigement

Le réchauffement climatique influencera doublement l'enneigement : d'une part les précipitations seront plus souvent sous forme liquide que sous forme solide, et, d'autre part la fonte interviendra plus tôt en saison. Ces effets seront particulièrement sensibles en moyenne montagne, là où les conditions sont les plus proches de la fonte. Des études d'impact ont été menées par Martin *et al.* (1996) en utilisant des anomalies mensuelles de température (à 2 m) et de précipitation (à l'exclusion de modifications de la variabilité à l'échelle inframensuelle) pour perturber le forçage atmosphérique observé. Il en résulte une diminution moyenne d'environ 1 mois de l'enneigement annuel en moyenne montagne (1 500 m), la diminution de l'enneigement étant toutefois plus réduite, de l'ordre de 2 semaines, pour des altitudes supérieures (3 000 m).

⁵National Oceanic and Atmospheric Administration (USA).

4.3.2 Influence sur la fonte nivale

Concernant par exemple les fleuves du territoire métropolitain, des études d'impact du même type ont été menées par Etchevers *et al.* (2002) en associant à des anomalies mensuelles de température des anomalies de précipitation issues de différents modèles climatiques pour perturber le forçage atmosphérique observé. Les résultats obtenus indiquent que les débits futurs dépendent évidemment du modèle climatique utilisé (quatre modèles globaux à basse résolution et deux modèles globaux étirés sur l'Europe) pour fournir les anomalies sur le bassin considéré. Cependant, certains changements climatiques simulés sont suffisamment robustes pour avoir un effet systématique sur les résultats. La grande sensibilité du manteau neigeux sur les Alpes (Etchevers *et al.*, 2002) et les Pyrénées (Caballero *et al.*, 2004 ; Morel, 2003) conduit à une modification importante des régimes hydrologiques des rivières à caractère nival (par exemple l'Ariège à Foix ou la Durance à La Clapière), avec une augmentation des débits hivernaux (surface enneigée réduite, augmentation des précipitations liquides) et l'apparition de pics de crue plus précoces (figure 4.12).

4.4 Les débits des fleuves

Les modèles d'écoulement à grande échelle fonctionnent généralement sur des grilles spatiales de $1^\circ \times 1^\circ$, ce qui restreint leur utilisation aux bassins versants de grande superficie. Ainsi, la figure 4.13 montre l'évolution sur 53 ans du débit du Danube, tel qu'il est observé (séries de données du GRDC⁶) et simulé par le modèle Orchidée (Verant *et al.*, 2004), avec un accord entre variations interannuelles observées et simulées très satisfaisant (Ngo-Duc *et al.*, 2005b).

Le modèle TRIP (Chapelon *et al.*, 2002) a quant à lui été utilisé pour simuler les conséquences du changement climatique sur les débits des principaux fleuves mondiaux. La figure 4.14 montre les séries des anomalies annuelles de débit simulées sur le Danube et la Lena. Ces débits sont évalués au point de grille le plus proche d'une station de mesure en aval du bassin, station pour laquelle on dispose des séries observées du GRDC. Ces séries sont malheureusement en général relativement courtes et/ou non corrigées des prélèvements liés aux activités humaines, ce qui rend particulièrement délicat tout effort de détection des changements climatiques. Toutefois, le renforcement des débits annuels simulés sur la Lena est assez cohérent avec la tendance observée. Sur le Danube, on constate sur le long terme une diminution des débits annuels, qui n'est cependant ni observée ni même simulée au cours du XX^e siècle (figure 4.13). La partie supérieure des graphiques de la figure 4.14 montre les anomalies annuelles des précipitations simulées et observées (CRU), moyennées sur l'aire de drainage

⁶Global Runoff Data Center.

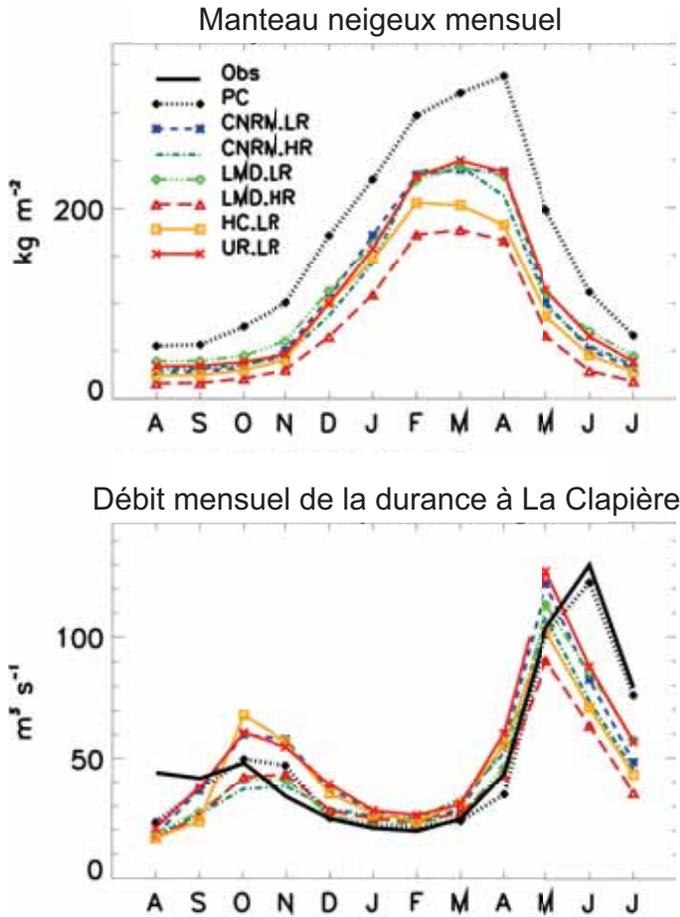


Figure 4.12

Impact du changement climatique (période 2050-2060) sur le manteau neigeux (en haut) et le débit de la Durance à La Clapière (en bas). La simulation du climat présent (tiretés noirs) est comparée aux simulations du climat futur sous hypothèse d'anomalies mensuelles de température et précipitation obtenues à partir de 6 scénarios climatiques interpolés sur le bassin de la haute Durance (Étchevers et al., 2002).

correspondant aux débits (après interpolation sur la grille TRIP). Sur la Lena, l'augmentation du débit annuel s'explique par un accroissement significatif des précipitations. Sur le Danube, la diminution du débit annuel est plutôt liée à un accroissement de l'évaporation. Il est important de souligner que les courbes de débit simulé sur ce fleuve montrent des tendances contradictoires entre la seconde moitié du XX^e siècle et le XXI^e siècle. Il ne suffit donc pas toujours d'extrapoler les tendances sur les débits observés pour prévoir les débits futurs (quand bien même ils seraient « naturalisés » en y retranchant les effets anthropiques liés aux aménagements et usages hydrologiques tels que retenues, barrages, irrigation, ...).

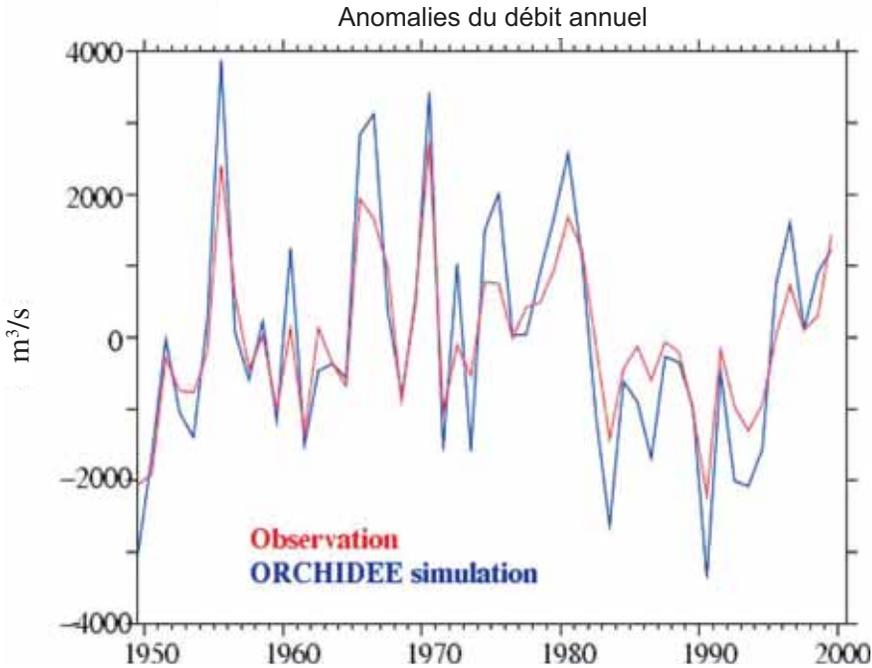


Figure 4.13
 Comparaison entre observation et simulation pour le débit du Danube au cours de la période historique.

5 | Les événements extrêmes et les possibles surprises climatiques

Le changement climatique global peut aussi se traduire par une évolution du régime des événements extrêmes, bien qu'*a priori* une évolution du régime moyen n'entraîne pas automatiquement une évolution du régime des extrêmes. En revanche, il faut remarquer, au niveau premier de l'évidence statistique, qu'une modification de la valeur moyenne d'une variable entraîne *de facto* un glissement de la courbe de répartition de cette variable, glissement dont l'effet est de modifier, parfois considérablement, la fréquence d'apparition des valeurs correspondant à la queue de la distribution. Cette modification peut être

⁹Anomalies estimées par rapport à la climatologie évaluée sur la période de recouvrement entre les simulations et les observations du GRDC (sans retrait de la dérive illustrée par la courbe en bleu obtenue dans l'expérience de contrôle sans accroissement de l'effet de serre).

¹⁰Précipitations moyennées sur l'aire de drainage de la station (du point de grille) où on mesure (calcule) les débits.

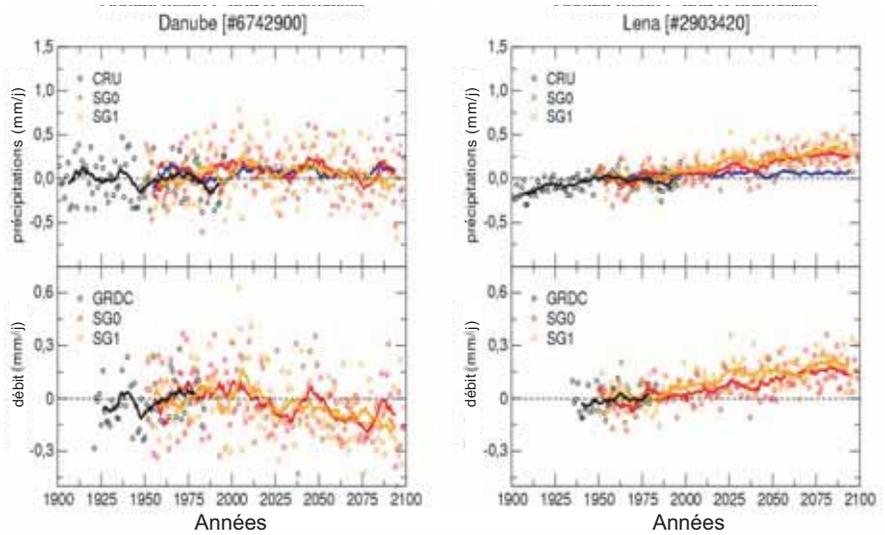


Figure 4.14

Anomalies⁹ annuelles (cercles) et en moyenne glissante sur 11 ans (courbes) des précipitations¹⁰ et débits simulés (scénarios SG0 et SG1 en couleur) et observés (en noir) sur le Danube et la Lena.

importante, même sans changement de forme de la distribution ; elle sera encore plus importante si le changement de valeur moyenne s'accompagne d'un changement de la forme de la distribution (figure 4.15).

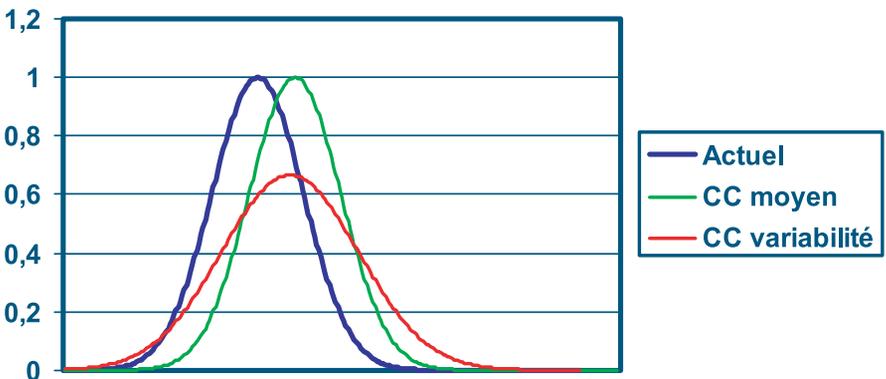


Figure 4.15

Représentation schématique de la variation de la probabilité d'apparition d'événements extrêmes dans le cas d'un changement climatique (par variation de l'aire sous les différentes courbes à droite d'un seuil considéré) : la courbe dite « CC moyen » est relative à un changement de la valeur moyenne sans modification de la variabilité, la courbe dite « CC variabilité » inclut quant à elle une modification de la forme de la distribution pour la même variation de la valeur moyenne.

Il est ainsi possible de prévoir que la température en France de l'été 2003, qui est apparue « en son temps » comme un événement extrême tout à fait exceptionnel, ne correspondra en milieu de siècle qu'à une température relativement normale, voire en fin de siècle qu'à une température plutôt inférieure « à la normale » (figure 4.16 ; Dufresne, 2004). Ce résultat apparaît comme assez « robuste », puisque retrouvé de façon pratiquement identique par d'autres groupes de modélisation (par exemple, Déqué, 2004). Bien que non directement relié à la disponibilité en eau, cet effet d'accélération des vagues de chaleur estivale peut avoir des conséquences, d'une part, sur la qualité des eaux continentales et, d'autre part, affecter les seuils réglementaires retenus pour les rejets d'eau industrielle (entre autres pour le refroidissement des centrales de production électrique).

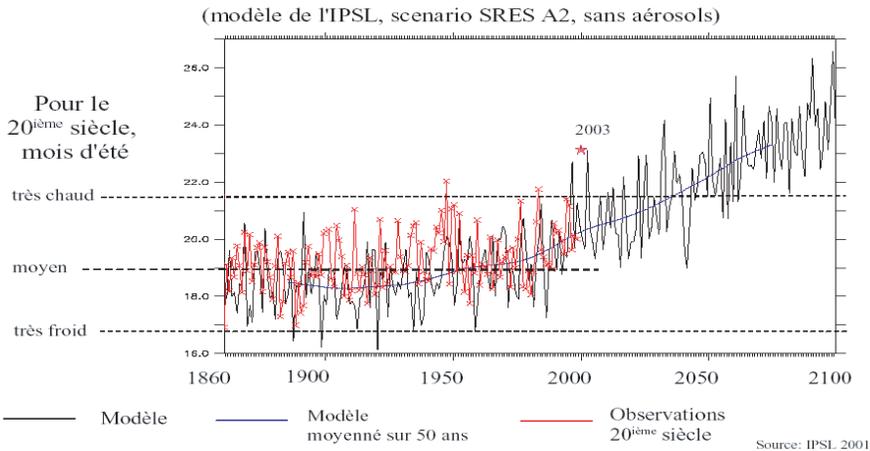


Figure 4.16

Évolution de la température moyenne en été en France de 1860 à 2100 (Dufresne et al., 2002).

Comme cela a été vu plus haut (§ 4.1), il est possible de prédire quelles seront les grandes variations des précipitations moyennes (par exemple, pour l'Europe, augmentation des pluies hivernales et diminution des pluies estivales) ; ceci pourrait se traduire par l'augmentation (à la fois en nombre d'occurrence et en intensité) de phénomènes apparemment contradictoires, crues hivernales et sécheresse estivales. En revanche, la variation du régime des précipitations, et donc de la fréquence et de l'intensité des événements hydrologiques extrêmes, est beaucoup plus difficile à prédire, entre autres, mais pas uniquement, du fait des difficultés des modèles climatiques actuels à bien reproduire la répartition des précipitations dans le climat actuel.

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 que Milly *et al.* (2002) ont utilisé au niveau global des simulations où la concentration des GES a été multipliée par quatre (à partir d'un modèle dont les simulations des débits moyens des grands bassins sont qualifiées de réalistes). Les analyses de ces simulations (figure 4.17) montrent que la fréquence des fortes crues (dont la période de retour est de 100 ans) augmente de manière importante sur les fleuves de hautes latitudes, dont les bassins occupent des surfaces supérieures à 200 000 km². Milly *et al.* (2002) indiquent aussi que les observations montreraient sur ces mêmes fleuves un accroissement des fortes crues dans la deuxième partie du XX^e siècle. Ces résultats devront toutefois être confirmés par d'autres études.

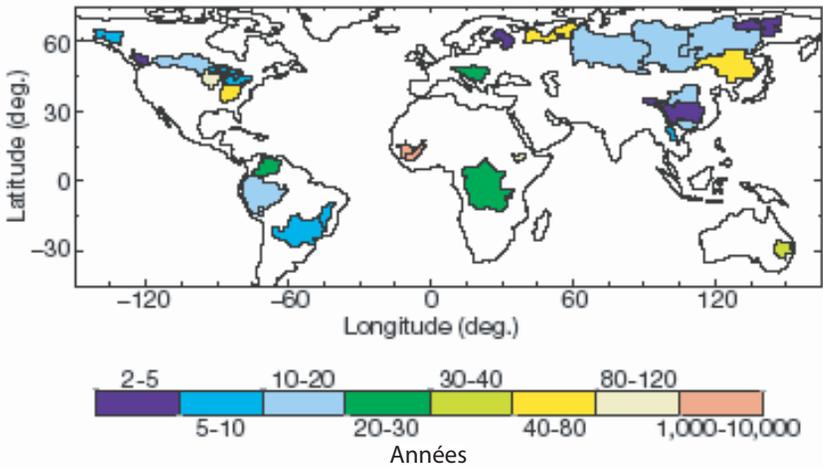


Figure 4.17

Carte de sensibilité aux risques d'inondation de 29 grands bassins versants. Les couleurs indiquent, pour un climat correspondant à une concentration quadruple de gaz à effet de serre, la durée de retour des crues qui sont centenaires pour l'expérience de contrôle correspondant au climat actuel. Bien qu'ils soient présentés ici, il est nécessaire de rappeler que les résultats relatifs aux bassins versants des basses latitudes sont peu fiables (d'après Milly *et al.*, 2002).

Il faut enfin noter ici qu'une augmentation de la température, conjuguée à une intensification du régime des précipitations aux latitudes élevées, conduit dans l'Atlantique Nord-Ouest à un déversement accru d'eau douce, renforçant la stabilité des couches supérieures de l'océan, réduisant ainsi la plongée des eaux denses et froides, et ralentissant donc la circulation océanique (dite « circulation thermohaline »). Les premiers signes d'une telle évolution semblent actuellement décelables, et plusieurs modèles climatiques indiquent que ce ralentissement doit se poursuivre au cours des prochaines décennies (figure 4.18, IPCC, 2001). Si ce mécanisme devait s'amplifier, ceci pourrait conduire à un très fort ralentissement du transport de chaleur par le Gulf Stream, conduisant ainsi à un important ralentissement du réchauffement de l'est des États-Unis et du Canada et

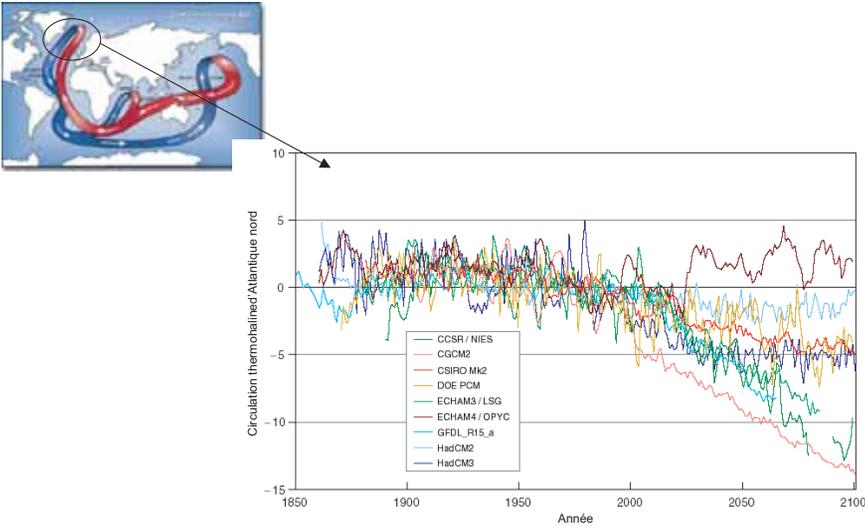


Figure 4.18

Modification de l'alimentation de la circulation thermohaline et du taux de plongée des eaux froides en Atlantique Nord (IPCC, 2001).

de l'Europe de l'Ouest. Il faut toutefois signaler que, si ce type d'évolution est possible, comme cela est confirmé par la caractérisation paléoclimatique des événements dits de Heinrich et de Dansgaard/Oeschger (Masson-Delmotte et Landais, 2003), l'hypothèse d'une telle évolution ne peut pas, dans l'état actuel de la modélisation climatique, être véritablement quantifiée, entre autres quant à sa date de survenue.

6 | Sur quelques autres impacts des changements climatiques et hydrologiques

Il est d'évidence que la végétation naturelle et les écosystèmes, tout comme la phénologie et la productivité des espèces agricoles, sont adaptés au climat local où ils se développent. Il est maintenant connu que ces milieux et espèces sont aussi très sensibles aux changements climatiques et hydrologiques, et qu'ils peuvent même en servir d'« enregistreurs ».

Dans le passé, les variations de température et de régime de précipitations ont induit des variations de nombreuses caractéristiques des espèces cultivées. Les dates de vendanges sont ainsi reconnues comme de bons indicateurs des températures printanières et estivales. Ce fait a tout d'abord été utilisé pour reconstruire qualitativement l'histoire du climat (Le Roy Ladurie, 1983), puis, beaucoup

plus récemment, pour reconstruire un indicateur quantitatif de ces températures (Chuine *et al.*, 2004). Il n'est malheureusement guère possible, dans l'état actuel des connaissances, d'utiliser les enregistrements paléoclimatiques pour reconstruire de façon fine et fiable les variations des paramètres climatiques autres que la température, en particulier pas les paramètres relatifs aux fluctuations du cycle hydrologique.

L'étude des tendances récentes confirme que le changement climatique amorcé a d'ores et déjà influencé nombre d'écosystèmes et d'espèces sauvages. Parmesan et Yohe (2003) ont ainsi par exemple recensé, d'après des études déjà publiées dans les revues scientifiques, qu'environ 80 % des espèces animales et végétales sauvages avaient changé de comportement dans un sens compatible avec un réchauffement climatique, avec, d'une part, une phénologie avancée et, d'autre part, une progression vers le nord ou en altitude de leurs zones de répartition (tableau 4.2).

Type de changement	Changement dans la direction du réchauffement climatique	Changement en direction opposée au réchauffement climatique
Phénologie	87 % (423) (2,3 jours par décennie)	13 % (61)
Changement de distribution		
– latitudes/altitudes élevées	81 %	19 %
– latitudes/altitudes basses	75 % (6,1 km vers le nord par décennie) (6,1 m vers le haut par décennie)	25 %

Tableau 4.2

Modification de la phénologie et de la répartition des espèces sauvages (plantes, oiseaux, insectes, amphibiens, poissons), d'après Parmesan et Yohe (2003).

Les systèmes cultivés sont pour leur part sensibles aux variations climatiques, mais ces influences sont atténuées par l'action directe de l'homme, qui modifie ses pratiques (irrigation, lutte anti-gel, . . .) de façon à atteindre une production aussi optimale que possible. Si les systèmes cultivés ne peuvent donc pas être utilisés comme des traceurs du seul climat naturel, il n'en reste pas moins que la production agricole est sensible aux aléas climatiques. Des modèles de production agricole ont ainsi été utilisés pour dégager l'influence des variations et de

l'évolution climatique sur la production agricole au cours des décennies à venir : bien que ces études soient encore de caractère relativement préliminaire, un résultat qui semble robuste est la détérioration, toutes choses égales par ailleurs, des rendements dès que le réchauffement dépasse un certain seuil (figure 4.19). Ce seuil est très faible dans les pays tropicaux, où l'eau peut de plus être un facteur limitant ; il est plus élevé aux latitudes moyennes, où une augmentation modérée de la température pourra avoir des effets bénéfiques. Ces conclusions sont toutefois à considérer avec précautions, plus comme de simples études de sensibilité à la température que comme des études relatives à ce que seront réellement les conditions climatiques et environnementales de la fin du XXI^e siècle, puisque ne prenant que peu, voire pas, en compte les modifications des ressources en eau et l'enrichissement de l'atmosphère en gaz carbonique.

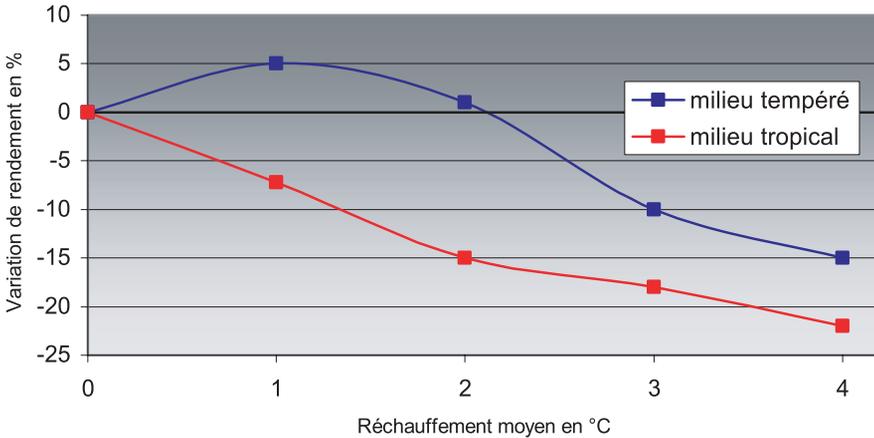


Figure 4.19

Sensibilité à la température du rendement des productions agricoles (Cloppet, 2003, d'après Esterling et Apps, 2005).

Conclusion

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. 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, exhibe une variabilité spatiale et temporelle bien plus importante que celle du climat thermique. Cette forte variabilité spatiotemporelle est certainement l'une des raisons majeures pour lesquelles la simulation du cycle hydrologique, et la prédiction de son devenir par les modèles climatiques, restent difficiles et encore assez imparfaites.

La croissance de la concentration atmosphérique des GES entraîne en effet inéluctablement un réchauffement, dont la simulation climatique nous donne d'ores et déjà une relativement bonne image, pour ce qui concerne tant les régimes moyens que quelques extrêmes. Cette même simulation climatique est, en revanche, affectée de nombreuses incertitudes relativement au cycle de l'eau, entre autres 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 des niveaux extrêmes.

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 la vulnérabilité des populations et des sociétés rendra celles-ci beaucoup plus sensibles aux changements hydrologiques qu'aux changements thermiques, et ceci dans un avenir peut-être assez rapproché.

Références bibliographiques

- Betts AK., Ball JH., Beljaars ACM., Miller M., Viterbo P. (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.
- Bouchet O., Myhre G., Myhre A. (2004). Direct human influence of irrigation on atmospheric water vapour and climate. *In : Climate dynamics*. Springer-Verlag, 11 p.
- Braconnot P., Marti O., Joussaume S., Leclainche Y. (2000). Ocean feedback in response to 6 kyr BP insolation. *J Climate*, **13** : 1537-1553.
- Caballero Y., Habets F., Noilhan J., Moor JF. (2004). Le changement climatique, étude de l'impact sur les ressources en eau du bassin Adour-Garonne. *Revue de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne*, **88** : 5-11.
- Chahine MT., Haskins R., Fetzer E. (1997). Observation of the recycling rate of moisture in the atmosphere : 1988-1994. *GEWEX News*, **7** : 1-4.
- Chapelon N., Douville H., Kosuth P., Oki T. (2002). Off-line simulation of the Amazon water balance : a sensitivity study with implications for the global soil wetness project. *Climate Dynamics*, **19** : 141-154.
- Chuine I., You P., Viovy N., Seguin B., Daux V., Le Roy Ladurie E. (2004). Grape ripening as a past climate indicator. *Nature*, **432** : 289-290.
- Cloppet E. (2003). Communication privée.

- Déqué M. (2004). Peut-on faire des prévisions saisonnières — Le point de vue d'un modélisateur. *Lettre Changement Global*, **17** : 63-67.
- Dettinger MD., Cayan DR., McCabe GJ., Marengo JA. (2000). Multiscale stream-flow variability associated with El Niño Southern Oscillation. *In : El Niño and the Southern Oscillation : multiscale variability and global and regional impacts*, Diaz HF., Margraf V. (eds.). Cambridge : Cambridge University Press, pp. 113-147.
- Douville H., Chauvin F., Planton S., Royer JF., Salas-Mélia D., Tyteca S. (2002). Sensitivity of the hydrological cycle to increasing amounts of greenhouse gases and aerosols. *Climate Dynamics*, **20** : 45-68.
- Dufresne JL., Friedlingstein P., Berthelot M., Bopp L., Ciais Ph., Fairhead L., Le Treut H., Monfray P. (2002). On the magnitude of positive feedback between future climate change and the carbon cycle. *Geophys Res Lett*, **29**, Doi : 10.1029/2001GL013777.
- Esterling B., Apps M. (2005). Assessing the consequences of climate changes for food and forest resources : A view from the IPCC. *Climate Change*, **70**, 165-189.
- Etchevers P., Golaz C., Habets F., Noilhan J. (2002). Impact of a climate change on the Rhône river catchment hydrology. *J Geophys Res*, **107** : D16, Doi : 10.1029/2001JD000490.
- Gibelin AL., Déqué M. (2003). Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dynamics*, **20**, 327-339, Doi : 10.1007/S00382-002-0277-1.
- Guilyardi E. (2005). El Niño-mean state-seasonal cycle interactions in a multi-model ensemble. *Climate Dynamics*, Doi : 10.1007/s00382-005-0084-6.
- Herbert JM., Dixon RW. (2003). Is the ENSO phenomenon changing as a result of global warming? *Physical Geography*, **23** (3) : 196-211.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2001). *Climate change 2001 : the scientific basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Houghton JT., Ding Y., Griggs DJ., Noguer M., van der Linden PJ., Dai X., Maskell K. and Johnson CA. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 p.
- Joussaume S., Taylor KE., Braconnot P., Mitchell JFB., Kutzbach JE., Harrison SP., Prentice IC., Broccoli AJ., Abe-Ouchi A., Bartlein PJ., Bonfils C., Dong B., Guiot J., Herterich K., Hewitt CD., Jolly D., Kim JW., Kislov A., Kitoh A., Loutre MF., Masson V., McAvaney B., McFarlane N., de Noblet N., Peltier WR., Peterschmitt JY., Pollard D., Rind D., Royer JF., Schlesinger ME., Syktus

- J., Thompson S., Valdes P., Vettoretti G., Webb RS., Wyputta U. (1999). Monsoon changes for 6 000 years ago : results of 18 simulations from the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP). *Geophys Res Lett*, **26** : 859-862.
- Lambert SJ., Boer GJ. (2001). CMIP1 evaluation and intercomparison of coupled climate models. *Climate Dynamics*, **17** (2/3) : 83-106.
- Laval K., Culson N., de Rosnay P., Polcher J. (2005). Effects of global irrigation on the continental hydrological balance as simulated by LMD GCM. *Geophys Res Lett*, soumis.
- Lebel T., Le Barbé L. (1997). Rainfall monitoring Hapex-Sahel 2. Point and aeral estimation at the event and seasonal scales. In : *Hapex-Sahel*, Goutorbe JP. et al. (eds.). Elsevier, 1079 p.
- Lebel T., Vischel T. (2005). Climat et cycle de l'eau en zone tropicale : un problème d'échelle. *C. R. Geoscience*, **337** : 29-38.
- Le Roy Ladurie E. (1983). *Histoire du climat depuis l'an mil (2^e édition)*. Champs, Flammarion.
- Martin E., Timbal B., Brun E. (1996). Downscaling of general circulation model outputs : simulation of the snow climatology of the French Alps and sensitivity to climate change. *Climate Dynamics*, **13** : 45-56.
- Masson-Delmotte V., Landais A. (2003). Variabilité climatique rapide en période glaciaire : les événements de Dansgaard/Oeschger et de Heinrich et leur enregistrement dans les glaces. *Lettre Changement Global*, **15** : 9-15.
- Milly PCD., Wetherald RT., Dunne KA., Delworth TL. (2002). Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, **415**, 514-517, Doi : 10.1038/415514a.
- Minnis P., Ayers JK., Palikonda R., Pham D. (2004). Contrails, cirrus trends, and climate. *J Climate*, **17** : 1671-1685.
- Moisselin JM., Schneider M., Canellas C., Mestre O. (2002). Changements climatiques en France au XX^e siècle — Étude de longues séries de données homogénéisées françaises de précipitations et de températures. *La Météorologie*, **38** : 45-56.
- Morel S. (2003). Modélisation distribuée des flux d'eau et d'énergie et des débits à l'échelle régionale du bassin Adour-Garonne. Thèse de l'Univ. P. Sabatier, Toulouse.
- Ngo-Duc T., Laval K., Polcher J., Lombard A., Cazenave A. (2005a). Effects of land water storage on global mean sea level over the past half century. *Geophys Res Lett*, **32** : L09704, Doi : 10.1029/2005GL022719.

- Ngo-Duc T., Polcher J., Laval K. (2005b). A 53 year forcing data set for land-surface models. *J Geophys Res*, **110** : D06116, Doi : 10.1029/2004JD005434.
- Nyenzi B., Lefale PF. (2006). El Niño Southern Oscillation (ENSO) and global warming. *Advances in Geosciences*, **6** : 95-101.
- Parmesan C., Yohe G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, **421** : 37-42.
- Peixoto JP., Kettani MA. (1973). The control of the water cycle. *Sci American*, **228** : 46-61.
- Räisänen J. (2002). CO₂-induced changes in interannual temperature and precipitation variability in 19 CMIP2 experiments. *J Climate*, **15** : 2395-2411.
- Rowntree PR. (1991). Atmospheric parametrization schemes for evaporation over land : basics concepts and climate modeling aspects. In : *Land surface evaporation*, Schmugge T., André JC. (eds.). Springer-Verlag, Berlin, 424 pp.
- Spagnoli B., Planton S., Déqué M., Mestre O., Moisselin JM. (2002). Detecting climate change at a regional scale, the case of France. *Geophys Res Lett*, **29** : 90.1-90.4.
- Trenberth KE. (1998). Atmospheric moisture residence times and cycling : Implications for rainfall rates with climate change. *Climate Change*, **39** : 667-694, Doi : 10.1023/A :1005319109110.
- Verant S., Laval K., Polcher J., de Castro M. (2004). Sensitivity of the continental hydrological cycle to the spatial resolution over the Iberian Peninsula. *J Hydrometeor*, **5** : 265-283.
- Yang F., Kumar A., Schlesinger ME., Wang W. (2003). Intensity of hydrological cycles in warmer climates. *J Climate*, **16** : 2419-2423.

CONCLUSION

Si l'on tente de résumer les principaux enseignements que l'on peut retenir des analyses qui précèdent sur le « problème de l'eau », cinq éléments moteurs des évolutions à venir sont à retenir, que nous aborderons successivement :

- les effets de la croissance démographique ;
- les effets des changements climatiques ;
- la question agricole et l'alimentation humaine ;
- la qualité des eaux ;
- les conséquences des changements en Europe.

Nous rappelons ici que nous avons délibérément choisi de n'aborder qu'indirectement les problèmes du milliard au moins d'êtres humains qui n'ont pas accès aujourd'hui à l'eau potable, et des deux milliards et demi d'êtres humains qui n'ont pas accès à un assainissement satisfaisant, problèmes immenses mais de nature principalement économique, et sur lequel beaucoup a déjà été dit (voir par exemple les actes des congrès mondiaux de l'Eau des dix dernières années, le rapport Camdessus 2003, le récent rapport du groupe de travail du projet du Millénaire sur le sujet, etc.). De même, nous n'avons pas abordé les changements de nature sociopolitique pouvant conduire à des tensions voire à des conflits liés à l'eau, ni la question de la croissance démographique, que nous avons prise comme donnée. Le lien entre eau et énergie n'a pas été traité, bien qu'il conditionne pourtant par exemple l'apport d'eau en irrigation, l'énergie hydroélectrique, le refroidissement des centrales thermiques et nucléaires, le dessalement de l'eau de mer, etc. Enfin, les problèmes d'interface eaux douces — eaux marines ou les domaines insulaires, et en particulier le cas des Dom-Tom,

n'ont pas pu être abordés au niveau souhaitable. Ces milieux demanderaient des développements spécifiques complémentaires, mais certains des points que nous allons aborder leur sont cependant applicables.

Nous sommes d'autre part amenés à constater, au cours de nos réflexions, que la résolution des problèmes de l'eau passe pour beaucoup par les sciences de l'homme et de la société (économie, sociologie, gestion, ...) et que les sciences de la vie et de la Terre, que nous avons principalement sollicitées, si elles permettent de poser les problèmes et d'imaginer des solutions, ne sont pas à elles seules capables de concevoir comment ces solutions pourraient être mises en œuvre et, partant, couronnées de succès. Ce rapport devra donc être suivi d'autres travaux, où ces questions seront à examiner.

1 | Effet de la croissance démographique

L'augmentation encore très importante de la population mondiale est le facteur qui, sans conteste, aura l'impact le plus important sur les problèmes de l'eau à l'échelle du globe. Si le rythme d'accroissement de la population mondiale a commencé à s'infléchir, il reste actuellement de l'ordre de 70 millions d'habitants de plus par an. Le problème de l'eau à l'échelle mondiale peut se résumer à ce chiffre : comment nourrir et désaltérer de façon satisfaisante tant les habitants déjà présents sur Terre que ces nouveaux venus, et répartir les ressources alimentaires entre le 6 à bientôt 9 milliards d'habitants que comptera la Terre d'ici 50 ans ? On observait jusqu'en 2003, selon la FAO, une régulière diminution du nombre des personnes sous-alimentées, et ce depuis 20 ans. En d'autres termes, l'accroissement de la production agricole mondiale dépassait l'accroissement de la population mondiale. Ce succès était en partie attribué à une augmentation régulière des surfaces irriguées, estimée à 2 millions d'hectares supplémentaires par an, sur un total actuel de 260 millions d'hectares irrigués, et 1 240 millions d'hectares d'agriculture pluviale. Il faut quand même se rappeler qu'il existait en 2003 encore 800 millions de personnes vivant sous le seuil de pauvreté et de sous-alimentation. Mais, depuis deux ans, le nombre de personnes affectées par la sous-nutrition a tendance à augmenter et ce sont aujourd'hui 856 millions de personnes qui, selon la FAO, vivent — ou survivent — en conditions de sous-nutrition notoire, la malnutrition pouvant toucher un nombre encore plus important d'êtres humains. Si une partie de cette détérioration pourrait être due à une meilleure précision des méthodes d'inventaire statistique, il apparaît cependant que la situation est en train de se dégrader de façon sévère, et qu'aucune anomalie climatique particulière n'explique ces résultats. Sous nos yeux par exemple, en 2005, une famine très sévère s'est installée au Sahel, du Mali au Soudan, pour laquelle le Programme alimentaire mondial a mis en place des apports massifs de grains. Si le déficit en eau est

les criquets sont les éléments moteurs de cette crise, elle est aussi aggravée par des aspects sociaux, eux-mêmes à mettre en relation avec les conditions très précaires de survie dans lesquelles se trouvent ces populations.

Que se passe-t-il ? Est-ce que le manque d'eau est déjà en train de se faire sentir, ou est-ce que le changement climatique est déjà en train de constituer un des éléments qui entravent l'augmentation de la production agricole ? La réponse à ces questions, fondamentale, est « oui » à l'échelle locale, mais « non » à l'échelle globale. Autrement dit, il existe globalement sur Terre suffisamment d'eaux douces, suffisamment de terres à mettre en valeur, et sans nécessairement vouloir faire appel à des techniques nouvelles, comme le dessalement de l'eau de mer, pour nourrir décemment 6, 8 ou même 10 milliards d'habitants. Des économies d'eau sont possibles et même indispensables, mais les moyens de production d'eau ou de mise en valeur des terres nouvelles ne sont pas réunis, et les moyens de distribution non plus. De plus, une telle augmentation de la production agricole ne pourra hélas pas se faire sans mettre en culture des zones aujourd'hui naturelles, donc menacer la préservation des écosystèmes naturels et la biodiversité. Le problème de l'eau est donc un problème d'organisation et de choix de la société face à l'augmentation démographique, avant d'être un problème de ressources ou de changements climatiques. Notons qu'Amartya Sen (Prix Nobel d'économie) est parvenu aux mêmes conclusions en étudiant les famines aux XIX^e et XX^e siècles¹ et n'a trouvé aucune famine de pénurie objective : on meurt de faim à côté de stocks conséquents. Nous élaborerons ci-après au paragraphe 3 ce constat, et tenterons d'en examiner des éléments de solutions. Notons néanmoins que ce constat ne doit pas nous amener à sous-estimer la menace de la variabilité climatique qui pèse depuis toujours sur la production agricole à l'échelle régionale. Au XX^e siècle seulement, le « *dust bowl* » des années 1930 aux États-Unis et la sécheresse du début des années 1980 au Sahel nous ont montré que la succession de quelques années « anormales » suffisait parfois à provoquer des dégâts économiques et humains considérables. La tension croissante entre la demande et l'offre alimentaire ne fera que renforcer la vulnérabilité des populations à l'aléa climatique.

2 | Effets des changements climatiques

2.1 Climats moyens

Les changements climatiques auront à coup sûr des conséquences sur le cycle de l'eau. Mais lesquelles ? Il demeure dans ce domaine une large part d'incertitude, même si certaines tendances sont connues. Les augmentations des

¹ Drèze J., Sen A. (1999). *Omnibus*. Oxford University Press.

températures sont les mieux connues, elles n'affectent à elles seules, cependant, que de façon indirecte le cycle de l'eau, en augmentant l'évapotranspiration potentielle. Sans variation des précipitations, la consommation en eau estivale par la végétation serait augmentée, asséchant les sols et réduisant l'eau disponible pour d'autres usages. Quant aux précipitations moyennes, elles auraient globalement tendance à augmenter, car le cycle de l'eau aurait tendance à s'amplifier du fait de l'élévation de température ; les variations anticipées sont significatives, mais connues de façon imprécise :

- augmentation des précipitations annuelles aux hautes latitudes, et également en zone équatoriale ;
- réduction des précipitations annuelles dans les zones intermédiaires, notamment la zone méditerranéenne, et les latitudes correspondantes dans les deux hémisphères ;
- augmentation de l'amplitude des variations du cycle annuel des précipitations dans de nombreuses régions, notamment aux moyennes latitudes, où les pluies pourraient ainsi diminuer principalement en été.

Comme on le voit, ces évolutions prévues ont tendance à accentuer les contrastes : là où il pleut déjà, il va pleuvoir davantage ; là où il fait sec, la sécheresse a toutes chances de devenir plus marquée.

Dans les zones où les précipitations diminuent, l'augmentation de la température, qui, elle, est générale, va conduire en sus à un assèchement plus intense des sols en été avec des conséquences significatives sur les systèmes agronomiques, les écosystèmes naturels et les systèmes sociaux. La consommation en eau va donc avoir tendance à augmenter dans ces zones, avec des tensions sur l'allocation de la ressource, en particulier vis-à-vis des besoins des écosystèmes.

Par ailleurs, l'impact du changement sur la dynamique du système vivant planétaire sera considérable. On sait que la vie est adaptative : on ne sait pas à quelle vitesse de changement elle est susceptible de s'adapter. Il en va de même des sociétés : les rythmes et les vitesses de changement sont aussi ou plus importants que l'amplitude des changements.

Pour fixer quelques idées, les cartes du chapitre 4 montrent que, pour l'un des scénarios d'émission de gaz à effet de serre, pour la deuxième moitié du XXI^e siècle, on aurait en moyenne les variations suivantes des précipitations :

Zone géographique	Mois de décembre à mars	Mois de juin à septembre
Afrique équatoriale	+25 %	+10 %
Afrique sahélienne	Incertain, ± 10 %	+30 %
Afrique du Nord	-15 %	-10 %
Sud de l'Europe	Incertain, ± 10 %	-20 %
France en moyenne	+15 %	Incertain, ± 10 %
Scandinavie	+25 %	+15 %

Variations en % des précipitations moyennes de la deuxième moitié du XXI^e siècle par rapport à celles de la deuxième moitié du XX^e siècle.

Ces chiffres issus d'une simulation particulière sont ici fournis à titre illustratif, mais restent malheureusement largement dépendants du scénario économique envisagé et du modèle climatique utilisé. Si ces deux sources d'incertitudes sont du même ordre de grandeur, il est important de souligner qu'elles sont de nature très différente. Changer de scénario revient en général à moduler l'amplitude des changements hydrologiques simulés ; changer de modèle peut, à l'échelle régionale, inverser les tendances. Ce constat souligne la priorité qu'il faut maintenant accorder aux études qui visent à contraindre la sensibilité des modèles. Il faut enfin noter que les incertitudes sont, à l'image des changements climatiques simulés, inégalement réparties à la surface du globe. Ainsi, si la plupart des projections climatiques convergent sur un assèchement du pourtour méditerranéen, le signe même des changements de précipitations sur l'Afrique de l'Ouest reste par exemple encore très incertain.

Les variations durant la première moitié du XXI^e siècle se rapprocheraient peu à peu des tendances indiquées dans ce tableau. À plus long terme, les effets des changements climatiques pourraient être plus importants, si l'émission de gaz à effet de serre n'est pas contrôlée, en particulier s'ils engendraient un ralentissement de la vitesse du Gulf Stream, comme les premiers signes en semblent aujourd'hui décelables.

Certaines tendances sont déjà perceptibles sur les séries longues de précipitations observées et sont globalement confirmées par les modélisations de la circulation générale atmosphérique en y augmentant les teneurs en gaz à effet de serre. C'est tout l'enjeu des études de détection-attribution que de repérer les signes avant-coureurs du changement climatique en s'appuyant à la fois sur les observations et les modèles. Notons toutefois que les modèles sont aussi construits pour prévoir ce que les observations ne peuvent encore nous dire (en raison d'un faible rapport signal sur bruit). La convergence des modèles,

autant que l'adéquation entre les évolutions prévues et les tendances d'ores et déjà observées, doit nous guider quant au degré de confiance à accorder aux projections climatiques.

Il nous faut cependant constater que lorsqu'un certain consensus ressort des projections climatiques globales sur les conséquences hydrologiques de l'accroissement de l'effet de serre, il peut être d'une part sérieusement modulé par la prise en compte des effets directs et/ou indirects des émissions d'aérosols (fines particules qui modifient le bilan radiatif de l'atmosphère et interagissent directement avec le cycle de l'eau au sein des nuages). Il demande d'autre part à être précisé en terme d'amplitude et de localisation géographique. On considère ainsi que la latitude à laquelle s'opère le changement de signe des anomalies de précipitations annuelles serait, en France, celle de Lyon, avec une augmentation des précipitations au Nord, et une réduction au Sud : mais la position moyenne de cette limite se situerait à Lyon, avec une incertitude de ± 1000 km, ce qui revient à admettre que l'ensemble du territoire national pourrait être de l'un ou de l'autre côté de cette limite, ou éventuellement passer cycliquement de l'un à l'autre. Les projections globales demandent donc à être affinées avec des outils de régionalisation climatique, qu'il s'agisse de modèles haute résolution à domaine limité ou de techniques statistiques de « *downscaling* ».

Il apparaît toutefois que, comparé aux effets majeurs de la croissance démographique à l'échelle mondiale, l'effet des changements du climat soit plutôt d'interagir avec eux, en général dans le sens d'une aggravation, même si, localement, ils pourraient devenir l'élément dominant. Les changements climatiques auront un effet certain à l'échelle mondiale, mais avec une variabilité géographique encore mal connue qui rendra certains pays plus affectés que d'autres, en particulier pour l'accès à la nourriture, avec un accroissement des mouvements migratoires et des conflits d'accès aux ressources.

2.2 Climat, variabilité et événements extrêmes

C'est dans ce domaine que les incertitudes concernant les climats futurs sont les plus fortes. Le changement climatique agit sur les moyennes, que les modèles permettent d'étudier le plus facilement. Mais quel est son effet sur les extrêmes, c'est-à-dire les épisodes de sécheresse ou de crues ? La réponse que nous avons obtenue est mitigée. De tous temps, le climat a connu des fluctuations naturelles pouvant parfois aboutir à des phénomènes catastrophiques, qu'on songe aux sept années de vaches grasses ou de vaches maigres de la Bible par exemple. Avec les outils de modélisation du climat, une éventuelle variation des fréquences ou intensité des fluctuations n'est pour l'instant que très mal prévisible : les tests d'influence montrent qu'il faut quadrupler la teneur en CO_2 pour que se décèle, sur les extrêmes, une augmentation de la variabilité des précipitations. On peut

cependant étudier les événements extrêmes par une approche statistique sur les séries longues observées. La série de pluie la plus longue connue, en matière de précipitations, est celle de la ville de Padoue, qui a commencé en 1725. Mais on possède, par les archives historiques, des données sur les catastrophes climatiques, et, par d'autres archives naturelles (sédimentaires, glaciaires, cernes des arbres, etc.) des enregistrements sur des durées bien plus longues, dépassant le million d'années. De façon générale, on définit des valeurs moyennes, puis une distribution autour de la moyenne. N'ayant par définition pas de séries longues en climat perturbé par les gaz à effet de serre, il n'est cependant pas possible d'établir aujourd'hui statistiquement une nouvelle distribution des événements extrêmes et donc d'en déduire une quelconque augmentation de la variabilité dont ces gaz pourraient être responsables. La plupart des études statistiques montrent toutefois que les événements climatiques extrêmes observés depuis 20 ans n'ont pas une intensité plus forte que ceux qui ont été observés par le passé, ni une fréquence plus élevée qu'attendue. Ceci va à l'encontre des médias et de l'opinion publique, qui voient dans chaque anomalie climatique une « preuve » de l'effet de serre. En toute objectivité, il n'est pas possible de déceler aujourd'hui une évolution dans les statistiques récentes.

Cependant, cela ne signifie pas pour autant que de telles tendances ne seront pas perceptibles au cours du XX^e siècle. Le problème principal est que d'une part, les séries observées sont généralement trop courtes pour pouvoir conclure, et que d'autre part, le renforcement de l'effet de serre commencé depuis grosso modo le milieu du XIX^e siècle est relativement faible par rapport à ce qui nous attend d'ici 2100. Ainsi, les concentrations de gaz à effet de serre utilisées dans les projections climatiques aboutissent à certains résultats robustes en terme de phénomènes extrêmes :

- renforcement généralisé de la fréquence, la durée et la sévérité des canicules ;
- accroissement de la fréquence, la durée et la sévérité des sécheresses dans les régions (et pendant les saisons) où la moyenne des précipitations n'augmente pas de manière significative ;
- augmentation de l'intensité des précipitations, y compris pour les quantiles 90 ou 95 %, pouvant être relativement (en %) plus importantes que l'accroissement de la moyenne des précipitations (et parfois même lorsque cette moyenne diminue).

Ainsi, s'il est encore difficile de se prononcer sur l'avenir des phénomènes les plus rares (ceux dont la période de retour est typiquement supérieure à 100 ans), les modèles s'accordent cependant pour prévoir le franchissement plus fréquent de seuils à fréquences de retour actuelles de 10 ou 20 ans, parfois

déjà critiques pour nos sociétés, et l'augmentation de l'intensité des événements correspondants.

Il faut aussi peut-être relier l'apparente augmentation de l'intensité du phénomène El Niño au changement climatique, avec ses conséquences très graves sur le climat, en Asie du Sud-Est et en Amérique du Sud en particulier, où il engendre alternativement sécheresses et crues, avec une fréquence et une intensité qui semblent aller en croissant (même si cette question est encore largement débattue par la communauté scientifique). Autre sujet de débat, l'augmentation de la température de surface de l'océan Atlantique, par effet de serre, pourrait-elle être tenue pour responsable de l'augmentation de l'intensité des ouragans sur la côte sud-est du continent nord-américain, comme cela a été constaté pendant l'été 2005 ? Enfin, en ce qui concerne les tempêtes extratropicales, certaines études récentes suggèrent que leur nombre pourrait diminuer, mais que les phénomènes les plus dévastateurs pourraient gagner en intensité.

2.3 Les crues

Les crues font partie des événements extrêmes, dont on a du mal à dire aujourd'hui si les fréquences vont varier du fait du changement climatique. Mais ce qui est sûr et déjà observé, est que le coût économique des inondations ne fait qu'augmenter. De toutes les catastrophes naturelles, ce sont les inondations qui voient leurs conséquences financières croître le plus rapidement d'année en année. Ceci est dû en partie à l'augmentation de l'utilisation des plaines servant de lit majeur aux fleuves, ainsi qu'à certains aménagements de l'espace qui, au-delà des crues moyennes, en augmentent les effets. Mais l'essentiel de l'augmentation des coûts est lié à l'augmentation de l'équipement mis en place dans les villes, et à la fragilité croissante des infrastructures, qui n'ont pas été conçues pour résister à des situations exceptionnelles comme les inondations. Nous avons élaboré, dans le chapitre 1, le cas de Paris, qui a été très bien analysé en tentant d'estimer les conséquences qu'aurait aujourd'hui la crue de la Seine de 1910, si elle se reproduisait.

On constate également, dans les statistiques des catastrophes naturelles des sociétés de réassurance, une augmentation régulière du nombre des inondations et autres catastrophes climatiques, alors que le nombre des catastrophes naturelles d'origine profonde (tremblements de terre, éruptions volcaniques) reste stable. Même si cela reste à démontrer, nous pensons qu'il s'agit là d'un effet indirect de la croissance démographique, qui a accru significativement la population des zones inondables de plaine, où les crues passaient autrefois plus inaperçues.

La conclusion qu'il faut en tirer est déjà connue, et en cours de mise en œuvre en France dans tous les sites soumis au risque d'inondations : contrecarrer les constructions en zones inondables, anticiper les conséquences des inondations, modifier les infrastructures existantes pour les rendre plus robustes et résilientes, améliorer l'annonce des crues, pour permettre aux actions préventives de jouer, et enfin aménager l'espace pour permettre ici l'étalement ou le stockage des crues, là la protection par des ouvrages, dont l'état de conservation doit être en permanence vérifié.

2.4 Les sécheresses

Comment éviter que ne se produisent des crises dramatiques, en cas de sécheresse extrême, qu'elle soit de fréquence normale ou liée à l'effet de serre ? L'augmentation de la demande en eau en année moyenne est prévisible en fonction de la croissance démographique, ainsi qu'en fonction du pourcentage de couverture des besoins grâce aux augmentations de rendement et aux projets d'équipements hydrauliques ; en revanche, les situations de crises sont, elles, imprévisibles. Mais deux choses sont certaines : les situations de déficit hydriques plus ou moins intenses sont inévitables, la seule question est « quand vont-elles se produire ? » ; ces situations se cumuleront alors avec le déficit endémique de nourriture, qui touche aujourd'hui, nous l'avons vu, 856 millions d'êtres humains. Déjà, en 1998, en conséquence d'un fort événement El Niño ayant engendré sécheresses (avec gigantesques incendies) en Indonésie et crues en Chine, une forte tension sur les marchés internationaux de céréales s'est produite, par suite d'achats importants de ces pays. À l'époque, les stocks de céréales étaient plus importants qu'aujourd'hui, mais, avec les stocks bas actuels, une nouvelle crise de même nature pourrait conduire à un déficit mondial avec des conséquences autrement dramatiques. Certains pensent que le déclenchement de cette crise alimentaire a été provoqué par une anticipation irrationnelle des conséquences d'El Niño et des incendies de forêt. En fait les conditions économiques (surendettement privé) d'une crise étaient réunies, et El Niño a sans doute été le signal déclencheur.

Il paraît dès lors impossible de ne pas admettre qu'en cas de sécheresse aiguë, frappant simultanément plusieurs continents, il en résulterait d'abord une envolée des cours mondiaux, puis un épuisement des stocks et enfin la remise en cause de la répartition actuelle de la consommation des céréales entre humains et animaux d'élevage (qui en absorbent la plus grande partie dans les pays développés). Le risque est finalement une incapacité à venir en aide aux populations affamées : mortalité, exodes, émigration climatiques en seraient la conséquence directe, ainsi que guerres et répressions.

Cette épée de Damoclès n'est hélas pas pour un avenir lointain, elle peut tomber demain, l'an prochain, l'année d'après, et le cours des choses en est déjà fixé.

Pour s'en prémunir, il n'y a pas d'alternative, il faut constituer des stocks alimentaires permettant de tenir pendant un épisode sec, qui ne se limitera pas nécessairement à un an. Ces stocks peuvent être constitués dans les pays producteurs excédentaires, et financés par eux. Ils peuvent aussi être constitués dans les pays menacés, en s'attachant à augmenter dès aujourd'hui les rendements des cultures vivrières, afin que les paysans, dans un premier temps, atteignent un niveau de vie acceptable, puis ensuite investissent eux-mêmes les excédents qu'ils pourraient constituer en stocks, en prévoyance d'une sécheresse, dans la tradition des greniers de réserve collective, présents par exemple en Afrique ou dans les Andes soumises au phénomène d'El Niño. Ces stocks, déjà sur place, permettraient de subvenir aux besoins immédiats. Le risque est grand en effet de voir la spéculation renchérir les cours, et même les semences de l'année suivantes consommées, avec comme corollaire la disparition des espèces végétales locales les mieux adaptées. Les stocks mondiaux devraient alors être utilisés comme frein à ce risque. C'est la politique mise en place par exemple par la Tunisie, mais qui ne peut exister que si les stocks alimentaires internationaux existent et sont suffisants. C'est là, à notre sens, une des urgences les plus grandes à l'échelle mondiale.

Il faut aussi, en urgence, construire des dispositifs de médiation permettant d'éviter les conflits liés à l'eau en cas de pénurie. Ainsi, un prochain grand conflit sur le continent africain pourrait être celui du Nil, entre ses pays riverains, par exemple l'Éthiopie, l'Égypte et le Soudan. . . Elle pourrait avoir en outre et en complément une expression confessionnelle ou ethnique, mais serait bien un conflit lié à l'eau. L'Éthiopie possède d'immenses besoins en matière d'irrigation et d'hydroélectricité, elle dispose de terres irrigables et de sites favorables à la construction de barrages, mais l'Égypte a fait savoir de manière répétée que la construction de grands aménagements sur ce bassin constituerait un *casus belli*, et l'Éthiopie n'a pas su non plus développer une micro hydraulique agricole.

3 | La question agricole et l'alimentation humaine

Un des problèmes majeurs de l'eau aujourd'hui se résume ainsi : comment éradiquer les famines latentes et réduire, comme le prévoient les objectifs du Millénaire, l'effectif des 856 millions d'êtres humains sous-alimentés aujourd'hui, et dont le nombre semble croître depuis peu ?

Il faut citer ici quelques chiffres issus des travaux de Rockström (2003, 2004) et de Zimmer et Renault (2003) pour comprendre, en se plaçant tout d'abord à l'échelle globale².

En 2000, l'agriculture pluviale (c'est-à-dire celle qui reçoit son eau par la pluie, sans apports par irrigation) consommait 5 000 km³ d'eau par an sur une superficie de 1 240 millions d'hectares, et l'agriculture irriguée 1 500 km³/an, sur une superficie de 260 millions d'hectares. Pour vaincre aujourd'hui la malnutrition, il faudrait d'ores et déjà mobiliser 2 200 km³ d'eau supplémentaire par an, soit en aménageant des cultures en zone pluviale, soit en développant l'irrigation. Nous cultivons aujourd'hui 1 500 millions d'ha de terre, alors que la surface totale des continents est de 13 400 millions d'ha, dont 4 188 millions d'ha seraient cultivables, selon la FAO.

En 2050, avec une population estimée à environ 9 milliards d'habitant, ces auteurs estiment les besoins en eau entre 10 000 et 120 000 km³/an, en tenant compte de l'amélioration de l'alimentation requise pour éradiquer la sous-nutrition. Il faut donc, d'ici 2050, s'approprier environ 4 500 km³/an d'eau de plus qu'aujourd'hui. Ces chiffres sont de plus fonctions des éventuelles évolutions des habitudes alimentaires : si en particulier la Chine et l'Inde se mettaient à consommer de la viande au rythme où le font aujourd'hui les Occidentaux, il faudrait en 2050 ajouter à ces chiffres un volume de 3 500 km³/an, car produire 1 t de viande de volailles demande l'équivalent en eau de la production de 4,1 t de blé, ou 13 t de blé pour 1 t de viande de bœuf. Ces chiffres supposent aussi que la structure de l'alimentation animale en céréales reste inchangée. Si on compare ces chiffres aux ressources totales en eau de la planète, on comprend immédiatement que, globalement, la Terre ne manque pas d'eau : 75 000 km³/an représentent la quantité globale d'eau de pluie consommée par les écosystèmes terrestres ou évaporés par les sols, auxquels il faut ajouter environ 12 000 km³/an qui représentent la quantité d'eau que l'homme peut mobiliser pour ses usages, par pompage dans les nappes ou par aménagement des rivières (retenues, etc.). Sur ces 12 000 km³/an, nous ne prélevons aujourd'hui que 2 500 km³/an pour l'agriculture irriguée (dont 1 500 km³/an sont effectivement consommés, le reste étant drainé ou évaporé par les sols), 770 km³/an pour les usages industriels, et 380 km³/an pour les besoins municipaux, soit un total de 3 650 km³/an. Il reste donc « disponible » dans les rivières et les nappes 8 350 km³/an pour l'irrigation, mais au prix de travaux d'aménagement aux conséquences importantes, tant financièrement que pour la préservation des écosystèmes.

Quatre voies sont *a priori* envisageables pour augmenter la quantité d'eau utilisable en 2050 :

²Voir références dans la bibliographie du chapitre 1.

- l'augmentation des surfaces irriguées à partir d'aménagements et des ressources utilisables, c'est-à-dire les 8 350 km³/an déjà cités. C'était, jusqu'au début des années 1990, la politique préconisée par les grandes institutions internationales. Le rythme anticipé d'extension des périmètres irrigués d'ici 2050 (1,34 millions d'hectares par an) ferait passer les surfaces irriguées de 260 millions d'hectares en 2000 à 330 millions d'hectares en 2050, engendrant une consommation supplémentaire en eau d'environ 500 km³/an. Pour parvenir à produire la nourriture requise en 2050 par l'agriculture irriguée, il faudrait donc multiplier par 15 le rythme actuel de développement de l'irrigation, pour l'amener à 20 millions d'hectares par an, en arrivant alors à 1 260 millions d'ha irrigués en 2050. C'est un objectif irréaliste compte tenu des réserves en eau et en sols ;
- l'appel à d'autres ressources artificielles, comme par exemple le dessalement de l'eau de mer. Le prix du dessalement est tombé aujourd'hui à environ 0,65 dollar/m³ en moyenne des réalisations récentes en eau de mer ; ceci était vrai avec un pétrole autour de 30 dollars le baril, et une consommation en énergie de l'ordre de 2,5 kWh/m³ ; à 60 dollars le baril, le prix serait plus proche de 0,9 dollar/m³. La dépense mondiale à consacrer à la fabrication de 4 500 km³ d'eau par dessalement de l'eau de mer serait alors de $2,25 \times 10^{12}$ dollars/an, au prix du pétrole de 30 dollars le baril. Ceci représente une somme égale à environ 21 % du PNB 2003 des États-Unis, ou encore 7 % du PNB mondial actuel. Il faudrait consacrer au dessalement une quantité d'énergie égale à environ 11 000 Twh/an, soit celle de près de 3 fois la production mondiale actuelle de pétrole. . . Cette option n'est pas réaliste ;
- l'augmentation des rendements par l'amélioration génétique, par exemple en utilisant des végétaux OGM plus résistants ou plus économes en eau ; cette voie a été décrite en particulier par Tardieu³ où il montre que les possibilités physiques de progrès sont réelles mais limitées, car il n'y a pas de photosynthèse sans transpiration. Il n'est pas envisageable de trouver par cette seule voie une solution globale au problème ;
- l'extension de l'agriculture pluviale, en mettant en culture des espaces aujourd'hui non cultivés, ou en augmentant fortement les rendements des espaces cultivés actuels. Où trouver les territoires correspondants ?
 - l'amélioration des rendements des espaces cultivés actuels, mais à faible rendement, pourrait permettre de dégager, en 2000, 1 500 km³/an d'eau supplémentaire environ, par la seule réduction des pertes sur sols nus ; ceci est la première priorité,

³Tardieu F. (2005). Plant tolerance to water deficit : physical limits and possibilities for progress. *C.R. Geoscience*, **337** : 57-67.

- le continent nord-américain exporte déjà beaucoup de produits agricoles ; on estime à l'équivalent de 150 km³/an l'exportation des États-Unis, avec d'importantes conséquences locales sur la disponibilité en eau, une augmentation de la production pluviale de ce continent ne pourrait venir significativement que du Canada,
- le continent sud-américain possède d'énormes potentialités, notamment au Brésil, ou en Argentine, qui sont déjà des exportateurs majeurs de produits agricoles, et se préparent à augmenter leur production, si les marchés des denrées agricoles sont favorables ; les possibilités d'élevage extensif y sont grandes ;
- le continent africain, les potentialités de production en mettant en valeur les terres dans les zones bien arrosées y sont importantes,
- l'Europe de l'Est pourrait produire et exporter en améliorant ses rendements,
- la Russie pourrait également produire bien davantage, surtout si le réchauffement climatique rend plus cultivables les territoires de Sibérie,
- l'Asie de l'Est et du Sud en revanche semble être dans une situation beaucoup plus tendue, il n'y aurait pas beaucoup de possibilités d'extension de l'agriculture pluviale, mais des gains potentiels en efficacité,
- l'Australie apparaît déjà être aux limites de production.

Mises bout à bout, ces possibilités dépassent largement les 4 500 km³/an requis. Mais il est clair que les surfaces nouvelles à mettre en culture ne sont pas aujourd'hui inoccupées, il s'agit en général de forêts, de zones humides, de prairies. Cette très importante campagne de défrichement, d'assainissement et de labour va donc s'accompagner d'une réduction inexorable de la biodiversité. Peut-elle être mise en balance avec l'existence de 856 millions d'hommes mal nourris dès aujourd'hui, ou avec l'augmentation potentielle, qui semble elle aussi inexorable, de ce chiffre à plus de 3 milliards en 2050 (soit la quantité dont aura augmenté la population d'ici 2050), si la production actuelle n'est pas augmentée ? C'est un problème d'éthique, d'organisation sociale, d'économie, de gestion de ce qu'il pourra rester de la biodiversité, pas un problème de ressources ; autrement dit, l'humanité n'est pas encore arrivée aux limites de la capacité de la Terre à la nourrir, toute autre considération mise à part.

Ceci est pour l'instant un constat, dont il resterait à affiner et régionaliser les chiffres, et à les comparer aux estimations des zones d'augmentation de la population mondiale, qui se trouvent essentiellement en Afrique et en Asie, et, de façon moindre, en Amérique du Sud.

On peut déjà cependant conclure, de façon préliminaire, que la solution des problèmes de l'eau dans le monde, vue sous l'angle de la production agricole, passera par :

- une amélioration des rendements sur les terres déjà en culture, qui est la priorité numéro 1 ; elle doit être conçue en limitant les effets délétères sur l'environnement, sur l'appauvrissement des sols, et en améliorant du même coup les revenus de la petite paysannerie qui exploite ces terres ;
- une augmentation importante de la production pluviale, par mise en culture de nouvelles terres exploitables, en s'attachant à préserver tant que faire se peut certains espaces naturels pour maintenir de la biodiversité ;
- une poursuite de la croissance de l'agriculture irriguée, là où elle est possible et économiquement faisable ;
- un développement des transferts alimentaires entre pays et continents, qui posera des problèmes sociaux, économiques, politiques (indépendance, pouvoirs) et de solidarité.

La FAO prévoit aujourd'hui que les transferts d'eau entre les différentes régions du Monde, sous forme de nourriture — dite « eau virtuelle » — vont fortement augmenter, ils pourraient s'élever d'ici 2050, selon nous, à l'équivalent de 3 000 km³/an, contre 1 200 km³/an actuellement.

L'Asie sera un importateur de nourriture de plus en plus important. Son industrialisation lui permettra probablement cependant d'acheter les produits qu'elle importera.

Le Moyen-Orient sera également un gros importateur, dont les ressources pétrolières permettront le financement, mais des solutions locales bien plus coûteuses comme le dessalement pourraient y être envisagées.

L'Amérique du Nord et surtout du Sud, l'Europe et la Russie seront les pays potentiellement en mesure de fournir les denrées, si les prix internationaux en permettent la production avec un revenu suffisant.

L'Afrique possède les potentialités, globalement, de sa propre autonomie alimentaire, mais ceci au prix d'une politique solidaire et volontariste d'équipement et d'amélioration des rendements. Sa paysannerie doit y être aidée grâce à une augmentation de ses revenus issus de la terre, pour l'y stabiliser, et pour lui permettre de faire les investissements nécessaires à l'augmentation de la production.

Bien que les réflexions qui suivent se situent à la marge de l'objectif du présent rapport, il y a lieu de s'interroger sur la fixation, dans chaque pays, des prix des denrées alimentaires ; certains cours mondiaux issus des conditions de production favorables de certains pays du Nord, et également des aides importantes accordées aux agriculteurs par les pouvoirs publics de ces pays, ne favorisent pas la production agricole locale dans les pays en développement, et conduisent à paupériser ces paysans du Sud, qui sont obligés d'abandonner leurs terres et de se concentrer dans ces grandes mégalo-pôles qui se constituent à un rythme inquiétant, quand ils ne s'expatrient pas. Ce sont ces paysannes du Sud qui sont à la fois les zones de plus grand paupérisme (1 milliard d'individus dont le revenu est inférieur à 1 dollar/j, et 2 milliards inférieurs à 2 dollars/j), et où la croissance démographique est la plus forte. Il y a pourtant auprès d'eux des possibilités importantes d'augmentation de la production. L'aide alimentaire, qui renforce la dépendance et concurrence la production locale, possède les mêmes effets pervers sur la paysannerie des pays du Sud. Il semble nécessaire que la production de biens alimentaires dans les pays du Sud soit rétribuée de façon à permettre un niveau de vie acceptable pour les producteurs. Un développement économique de type industriel avec des pôles de développement locaux, comme cela se pratique au Maroc, pourrait aussi permettre de fixer les populations excédentaires et éviter les migrations urbaines. Le Brésil, pour sa part, envisage un développement ayant pour objectif une « civilisation du végétal », un « monde sans pétrole », en favorisant la paysannerie.

Notre analyse conduit donc à dire que le problème de l'eau dans les pays en développement doit d'abord privilégier le développement de l'agriculture pratiquée par les petits paysans, grâce d'abord à l'obtention d'un revenu qui leur permette de vivre de façon décente, puis qu'ensuite ils puissent investir dans l'extension des surfaces exploitées (si cela est possible), dans l'augmentation des rendements grâce à des pratiques améliorées, adaptées à leur niveau. À cet égard, les résultats obtenus au Centre international de recherche de l'Icarda en Syrie, pour développer l'agriculture en régions arides, peuvent servir d'exemple de ce qu'il est possible de faire. Il en va de même de Centres africain et asiatique de recherche sur le riz. Il faut toutefois rappeler que ces centres privilégient des espèces économes en eau, mais à cycle fixe, là où les populations locales avaient sélectionné des variétés de sorghos adaptatifs au cycle des pluies : même avec une saison courte, ils produisaient, ce qui n'est pas le cas des espèces exogènes.

Le développement de l'agriculture irriguée, là où elle est possible, et où les structures sociales en permettent l'utilisation optimale, est ensuite à poursuivre, mais on a montré qu'en pratique son développement ne sera pas suffisant pour répondre au problème de l'alimentation de l'humanité. De plus la formation de la paysannerie à une exploitation rationnelle et efficace de nouveaux grands périmètres irrigués demande de l'expertise et du temps.

Bien que ces réflexions se situent à la marge de l'objectif de ce rapport, et soient plus l'objet d'un rapport sur l'agriculture mondiale, il semble qu'une double évolution des marchés mondiaux des denrées alimentaires soit nécessaire :

- celle concernant les capacités de pays tels que le Brésil, l'Europe de l'Est ou la Russie de devenir de grands producteurs mondiaux de denrées alimentaires ;
- celle touchant l'agriculture familiale grâce à des mécanismes marchands régionaux ou sous-régionaux avec des moyens nouveaux qui permettraient d'en financer la modernisation.

Il n'y a donc pas opposition entre le développement d'une agriculture industrielle exportatrice et celui d'une agriculture locale plus artisanale, pouvant parfois se concentrer sur d'autres produits, et éventuellement aidée comme l'est l'agriculture industrielle des pays du Nord. De plus, la maîtrise de l'exode rural, donc du rythme de la croissance urbaine, qui risque sans cela de ne pas être soutenable, apparaît comme une nécessité.

4 | La qualité des eaux

4.1 La résilience des écosystèmes aquatiques face à la pression anthropique

Dans le chapitre 3, nous avons montré que les écosystèmes, et en particulier les écosystèmes aquatiques, sont des systèmes à seuils : soumis à des contraintes qui viennent entraver leur fonctionnement naturel, comme par exemple aménagements, artificialisation du fonctionnement, déversements d'intrants divers (polluants, apports thermiques, apports en suspension, arrivée d'une espèce nouvelle, etc.), ces systèmes s'adaptent, réagissent et possèdent en général une forte résilience, qui leur permet de se maintenir en état de fonctionnement. Cependant, passé un certain seuil, cette résilience atteint ses limites, l'écosystème ancien disparaît et laisse la place à un système nouveau, qui redevient résilient dans une nouvelle configuration, qu'il est cependant très difficile de prévoir, et qui ne permet plus le retour à l'état antérieur, même si les contraintes ayant engendré le basculement sont relâchées, ou alors au prix de réhabilitations majeures. Les écosystèmes oscillent donc entre différents modes de fonctionnement métastables ; les transitions entre ces modes sont cependant abruptes et conditionnées par un petit nombre de facteurs.

La préservation des écosystèmes aquatiques est donc un problème que l'on peut gérer, si l'on se fixe des objectifs, et si l'on sait anticiper la présence de ces seuils, leurs valeurs, et si on sait agir sur le milieu pour réduire les impacts des activités anthropiques. C'est cependant un domaine où un accroissement des connaissances scientifiques est à conduire avec une grande continuité, car ces recherches demandent du temps et de longues séries d'observations sur des sites dédiés. Les choix d'aménagement du territoire, de gestions des équipements, d'arbitrages entre les divers usages de l'eau et des territoires demanderont une politique volontariste et des moyens matériels importants. Les domaines littoraux, qui n'ont pu être abordés dans ce rapport, ne doivent pas être omis : les apports d'eau douce en mer conditionnent de nombreux écosystèmes côtiers, comme par exemple l'ostréiculture, le cycle des larves de mollusques, les frayères à esturgeons, etc.

Les recommandations de la directive-cadre européenne sur l'eau de 2000 vont dans le sens d'acquérir une meilleure maîtrise de la résilience de ces écosystèmes, et de mettre en place les mesures permettant d'atteindre, d'ici 2015, un bon état écologique des eaux superficielles et un bon état chimique des eaux souterraines. Ces recherches et programmes d'action ont été discutés au chapitre 2, et également dans Roche *et al.* (2005)⁴.

L'augmentation de la production agricole par amélioration des rendements et par la mise en culture de nouveaux territoires aujourd'hui naturels (forêts, steppes, zones humides...) sera un défi à relever pour le maintien de la biodiversité et la protection des écosystèmes ; l'expérience acquise dans les pays développés ne pourra permettre aux pays en développement d'éviter les écueils par lesquels ces pays sont passés que si sont pris en compte dès le départ le contexte local, et que nos connaissances actuelles sont appliquées à l'optimisation de techniques locales, socialement adaptées, avant toute autre chose.

4.2 La qualité de l'eau potable

À l'échelle de la planète, la préoccupation majeure en matière d'eau potable reste quand même la contamination microbienne, qui engendre de très nombreux décès (plusieurs millions par an) dans les pays où l'accès à l'eau potabilisée n'est pas possible (plus de 1 milliard d'habitants), ou encore où les ouvrages d'assainissement sont insatisfaisants (2,4 milliards d'habitants). Améliorer cette situation est l'une des grandes priorités du problème de l'eau, qui a déjà été largement souligné par de nombreux rapports récents, ainsi que nous l'avons dit,

⁴Roche PA., Billen G., Bravard JP., Décamps H., Pennequin D., Vindimian E., Wasson JG. (2005). Les enjeux de recherche liés à la directive-cadre européenne sur l'eau. *C.R. Geoscience*, **337** : 243-267.

mais qui n'a pas été développé ici. L'objectif dit « du Millénaire » des accords internationaux est de diviser par deux les deux chiffres précédents (nombre de personnes non raccordées à l'eau potable et à un réseau d'assainissement) d'ici 2015, au prix d'investissements estimés de l'ordre de 1 600 milliards de dollars.

En ce qui concerne la qualité des eaux de distribution publique dans les pays qui possèdent des réseaux de distribution, les récentes évolutions des recommandations de l'OMS en matière d'eau potable vont vers un contrôle de la qualité des eaux distribuées non plus par une liste de plus en plus longue de paramètres imposés, mais par la fixation d'un niveau de risque considéré, par chaque autorité sanitaire, comme acceptable, suivi de la mise en œuvre de moyens techniques adaptés à la qualité des eaux brutes du milieu naturel, et aux risques potentiels que court la ressource. Cette évolution des concepts va clairement dans le sens d'une protection accrue de la ressource et dans le sens de la recherche de portions du territoire dédiées à la production d'eau potable, où la qualité de la ressource soit naturellement bonne, en limitant les besoins de traitement, plutôt que de tenter de corriger, par des traitements complexes, une qualité des eaux brutes qui serait très dégradée. C'est également l'esprit des recommandations du rapport Villey-Desmeserets du Commissariat au Plan⁵ sur la protection des eaux souterraines.

Il faut noter que cette évolution va dans le sens d'une prise en compte réelle des risques pour la santé provoqués par les éléments indésirables éventuellement contenus dans les eaux, et non plus dans le sens d'un respect d'une norme, dont la justification ou les règles de fixation pourraient être différentes d'un élément à un autre, comme c'est le cas actuellement. Cependant, cette approche demande que soient bien mieux connus qu'ils ne le sont aujourd'hui les effets sanitaires des éléments indésirables dans l'eau, au premier rang desquels figurent les pesticides, qui sont vraisemblablement les produits les plus préoccupants rencontrés dans l'eau, ou encore les mélanges de micropolluants. Il y a là matière à recherche et développements méthodologiques importants. Il est aussi nécessaire de mieux porter à la connaissance du public les notions de relations dose-effet, de risque, et de la fixation des niveaux de risques jugés acceptables par la société.

La politique de traitement des eaux usées connaîtra vraisemblablement des évolutions, pour tenter de retenir aussi près que possible de leur source les pollutions dangereuses (comme par exemple celle des hôpitaux, ou des industries raccordées manipulant des produits toxiques), pour éviter leur dilution dans les collecteurs d'égouts et leur arrivée dans les stations de traitement, qui ne sont pas conçues pour éliminer tous les polluants.

⁵Commissariat général du Plan (2001) *Rapport sur les politiques publiques sur la protection des eaux souterraines*. La Documentation française, 150 p.+ An., <http://www.plan.gouv.fr/publications/fiche.php?id=43>).

5 | Les conséquences des changements en Europe

5.1 Disponibilité de l'eau

Nous avons jusqu'ici peu parlé de la situation européenne, tant est urgente la situation internationale devant les problèmes de l'eau. Notre analyse est que les besoins en eau en France et en Europe sont peu ou prou couverts par les ressources disponibles, en année moyenne. La démographie y étant à peu près stable, en l'absence d'immigration massive suite à une crise environnementale majeure, seules les variations climatiques peuvent venir rompre cet équilibre. Or, de grosses incertitudes pèsent encore sur le sens de ces variations, en particulier en France. En année déficitaire, il est clair que les ressources deviendront insuffisantes face à la demande, comme cela a été le cas par exemple pendant l'été 2005, et qu'un choix devra être opéré pour déterminer ceux des besoins qui seront couverts, et ceux qui ne le seront pas. Les besoins essentiels, comme la demande municipale, seront toujours couverts au moins *a minima*, car ils restent en tout état de cause petits, et modulables (exemple : interdiction temporaire d'arroser, de laver les voitures, éventuellement limitation des consommations). Les besoins écologiques (qualité de l'eau dans les rivières pour la faune, préservation des zones humides, ...) qui déterminent par exemple le rythme des lâchures depuis les barrages, devront être dotés d'une forte priorité devant les besoins de nature économique, si le poids de la préservation des écosystèmes dans les choix sociétaux est élevé. L'agriculture irriguée, comme l'agriculture pluviale, seront les premières affectées par les déficits, sans possibilité de recours à des ressources alternatives, vu la faible rentabilité économique de l'eau agricole. Les pertes de revenus correspondantes relèvent des mécanismes d'assurance collective. Il y a lieu également de s'interroger sur la pertinence économique de la construction d'aménagements hydrauliques à des seules fins d'irrigation, par exemple de maïs, quand la rentabilité économique est réduite : d'autres usages de l'eau (fruits et légumes, ou encore activité de loisir...) sont souvent à rentabilité bien plus forte. Les besoins industriels qui risquent de poser problème concernent principalement le refroidissement des centrales nucléaires et thermiques refroidies par les fleuves et non par des tours aéroréfrigérantes, centrales qui ne pourraient fonctionner au niveau normal si les contraintes réglementaires d'élévation de température dans les cours d'eau sont maintenues. On sait que lors de la canicule de 2003, et bien que 2003 n'ait pas été une année particulièrement sèche, des dérogations avaient été données aux exploitants pour permettre la poursuite de la production d'électricité, qui est aussi un objectif économique et sociétal fort (climatisation, chaîne du froid, coûts...). Ces dérogations auraient en fait été très peu utilisées, mais il est certain que la connaissance scientifique manque pour mesurer la résilience des écosystèmes à ces écarts thermiques : c'est là une recherche à mener. D'autres solutions d'urgence sont aussi à rechercher.

Si les changements climatiques entraînent des diminutions systématiques des ressources, ou des fréquences plus importantes d'épisodes secs, ce que les modèles climatiques ne sont pas encore en mesure de dire de façon sûre, il faudra soit diminuer la demande (par exemple réduire l'irrigation), soit consentir à des investissements importants pour des transferts d'eau entre bassins, dont la rentabilité économique sera difficile à atteindre, ou à des aménagements tels que la recharge artificielle des aquifères en hiver, la réutilisation des eaux usées, ou éventuellement la construction de retenues, mais en mesurant précisément les impacts écologiques et sociaux par rapport aux bénéfices escomptés.

En d'autres termes, et si l'on laisse pour l'instant de côté les questions liées à la qualité, les problèmes de l'eau en Europe se situent essentiellement sur une meilleure prévision des changements climatiques, suivie d'une politique d'adaptation à ces changements, par la modification des pratiques, les économies ou par des travaux d'aménagement. Ces questions, importantes, ne sont cependant pas du même niveau de gravité que dans les pays en développement.

5.2 Qualité des eaux

La préoccupation majeure des pays de l'Europe est la restauration de la qualité des eaux dans le milieu naturel. La directive-cadre européenne sur l'eau de 2000 y concourt, et vise à obtenir un bon état écologique et chimique des eaux et des écosystèmes aquatiques. Il faut insister sur le fait qu'il s'agit d'une obligation de résultats, pas d'une obligation de moyens, or actuellement on raisonne encore trop en termes de moyens. Il est à l'heure actuelle trop tôt pour dire si les objectifs fixés, ambitieux, seront atteints. Une meilleure connaissance des milieux et des processus naturels, notamment grâce à la constitution d'observatoires de longue durée de l'évolution des milieux et de la qualité des eaux, est là particulièrement nécessaire. Il ne faut pas se cacher qu'avec la directive-cadre, des chantiers très importants de rétablissement de la qualité des eaux et des milieux vont devoir être lancés, dont l'évaluation des coûts économiques vient tout juste de commencer.

Les problèmes de qualité des eaux distribuées ont été abordés ci-dessus. Ils doivent impérativement être traités dans le cadre d'une réflexion générale sur la qualité des aliments, et sur la part de l'eau potable par rapport aux autres sources de contaminants dans l'alimentation. De plus, les nouvelles orientations prises par l'OMS sur la définition de la qualité des eaux vont, comme la directive-cadre, dans le sens d'une recherche de la préservation des milieux contre les pollutions, voire de la création de zones protégées dédiées à la production d'eau potable, pour pouvoir être garant de la qualité.

RECOMMANDATIONS

1 | Sur l'activité de recherche

1.1 Changements climatiques

Il existe une très forte présomption d'une bien plus forte vulnérabilité des populations et des sociétés aux changements hydrologiques qu'aux changements affectant la seule température. Or, les changements climatiques, s'ils sont aujourd'hui considérés comme inéluctables, sont en fait beaucoup moins bien connus en matière d'effets hydrologiques qu'en températures.

Pour pouvoir anticiper les effets des changements climatiques sur les eaux continentales, les recherches sur les composantes hydrologiques du climat doivent être renforcées. Ceci couvre tant la modélisation du climat moyen, avec amélioration de la performance des modèles en matière de cycles de l'eau, que la prévision des changements d'intensité/fréquence des événements hydrologiques extrêmes, pour lesquels les connaissances actuelles sont très insuffisantes. De plus, l'une de nos conclusions sur ces changements climatiques est que l'évolution de la vulnérabilité importe plus que l'évolution de l'aléa. Les conséquences des événements extrêmes se font de plus en plus sentir « en cascade » (par exemple les effets d'une inondation de Paris) car les systèmes sont de plus en plus interconnectés, interdépendants. Cet aspect de la vulnérabilité a été peu pris en compte jusqu'ici et il importe que les concepteurs des systèmes fortement interconnectés réfléchissent à des conceptions plus robustes, empêchant ou réduisant les risques des propagations en cascade.

Le problème majeur que ces changements climatiques risquent de poser en France concerne probablement davantage le risque de sécheresse que celui des

crues. L'augmentation de température est un fait avéré et une augmentation tendancielle, même faible, a des effets significatifs sur l'évapotranspiration. Ces effets peuvent être cumulatifs (interannuels), même si l'évapotranspiration annuelle est limitée par les réserves en eau des sols. L'évapotranspiration, contrairement à la pluie, agit « en tendance » et un léger changement de tendance pourrait, d'une part, réduire un peu la recharge hivernale qui se produit entre fin décembre et mi-mars, d'autre part accentuer la situation de pénurie en été (du simple fait d'une évapotranspiration un peu plus élevée), les deux effets étant de plus cumulatifs. La plus grande fréquence des canicules annoncée va dans le même sens.

La recherche doit aussi s'intensifier sur l'étude des climats anciens. À l'Holocène, la température était par exemple de 2 °C plus élevée qu'aujourd'hui. Quelles en étaient les précipitations ? La façon dont a réagi la planète à la fonte des glaciers il y a 20 000 ans est mal connue ; le climat ancien du Sahara n'est par exemple pas reproduit par les modèles. Il y a là un domaine de recherche à intensifier, tant pour y rechercher la validation des modèles en les faisant tourner sur ces époques anciennes, que pour comprendre comment ont évolué les phénomènes hydrologiques (en particulier les événements extrêmes) et les écosystèmes, lors des changements climatiques anciens. La variabilité climatique est enregistrée dans les archives naturelles, avec les causes des variations observées et la récurrence des événements extrêmes, et peut contribuer fortement à la prévision des climats futurs et de la réponse de la Terre aux changements.

1.2 Écologie

En dépit des progrès accomplis dans la connaissance des écosystèmes aquatiques continentaux, ces derniers continuent à se dégrader, en France et dans le monde. Cette dégradation, quantitative et qualitative, est préoccupante car inégalement répartie et source d'inégalités et de conflits à venir. Or, la dégradation des milieux aquatiques continentaux n'est pas inéluctable, et la recherche sur ces systèmes peut contribuer à renverser les tendances observées actuellement et doit être soutenue.

À cet égard, la tendance actuelle en France de découper la recherche sur les écosystèmes en milieux aquatiques et terrestres, ou superficiels et profonds, n'est pas pertinente, même si les échelles d'espace et de temps d'évolution des différents milieux ne sont pas toujours compatibles ; ces découpages, qui isolent les chercheurs au lieu de les faire travailler ensemble, gagneraient à être supprimés. C'est le fonctionnement du système Terre dans son ensemble, incluant les phénomènes atmosphériques, terrestres et aquatiques, superficiels et profonds, tous liés par des processus physiques et biochimiques complexes et agissant avec des

constantes de temps différentes, qui doit être étudié. La division adoptée par le CNRS entre une Terre solide profonde et des enveloppes fluides superficielles n'apparaît à cet égard pas pertinente.

Une structuration des recherches sur les écosystèmes aquatiques continentaux dans le cadre d'observatoires de recherche sur l'environnement a été initiée par les pouvoirs publics il y a quelques années, mais son financement n'est déjà plus assuré, et a été reporté sur le budget récurrent des organismes. Il s'ensuit que la pérennité de ces observatoires sur de longues durées n'est plus assurée, et que leur structuration et la mise en cohérence des programmes de mesures ne sont plus faites. Une telle structuration entre les diverses institutions de recherche pourrait être coordonnée par un groupement de type Gip ou Gis, en liaison avec un réseau de zones-ateliers et d'observatoires opérationnels à développer avec les agences de l'eau, qui en ont besoin dans le cadre de la mise en place de la directive-cadre européenne sur l'eau. Sur ces sites, des recherches sur la résilience et sur l'ingénierie des écosystèmes et de leur réhabilitation pourraient être entreprises. Des observations depuis l'espace sont des outils utiles et efficaces pour contribuer à une meilleure connaissance de l'état du milieu, mais ne pourront en aucun cas se substituer aux observatoires de recherche en environnement : seule la combinaison des deux systèmes peut permettre d'en extrapoler certains des résultats. Un tel groupement de recherche permettrait de combler le vide laissé par la disparition de l'ancien Gip Hydrosystèmes et de renforcer une démarche scientifique commune. Ces observatoires doivent travailler en écologie, bien sûr, mais aussi constituer un réseau pour le suivi des changements climatiques, des problèmes de santé, de gestion. La vitalité de la recherche française dans le domaine des eaux continentales dépend également d'une action forte pour assurer sa présence dans les programmes internationaux en cours et à venir.

1.3 Données

Les séries pluviométriques et hydrologiques dans les réseaux de mesures existants sont l'instrument principal, à l'échelle mondiale, de la détection des composantes hydrologiques des changements climatiques. Vu le caractère intrinsèquement variable de ces composantes, cette détection suppose une grande persévérance dans le suivi : plusieurs décennies constituent un strict minimum. Or on observe, dans le monde entier depuis une dizaine d'années une chute brutale de la disponibilité de ces données¹. Dans de nombreux pays développés, celles-ci deviennent payantes, et dans de nombreux pays en développement, ces données ne sont plus récoltées, ou de façon très lacunaire. Il y a là

¹Voir par exemple : Meybeck M., Vörösmarty C. (2005). Fluvial filtering of land-to-ocean fluxes : from natural Holocene variations to Anthropocene. *C.R. Geoscience*, **337** : 107-123.

nécessité de redresser très rapidement la situation. En France, les données hydrométriques et pluviométriques devraient pouvoir être mises gratuitement à la disposition des chercheurs, au minimum au bout d'un certain temps, permettant ainsi de les rentabiliser sur les utilisateurs industriels et publics à court terme ; les données récoltées dans les observatoires de recherche en environnement (ORE) doivent impérativement être mises sur banques de données et rapidement mises à disposition. Pour les données hydrométriques et pluviométriques, la France devrait obtenir qu'il en soit de même d'abord au niveau européen, puis international, auprès de l'OMM. Enfin, dans ses programmes de coopération avec les pays en développement, la France devrait s'attacher à aider à la restauration des réseaux de mesures hydrologiques.

Le recueil des données sur les pressions anthropiques est aussi indispensable. Elles sont actuellement insuffisantes sur les effets des différents usages des sols (formes d'urbanisation, pratiques culturelles, labours, prés, forêts. . .), des applications des intrants en agriculture ou des pratiques d'élevages. La France est particulièrement en retard, n'ayant pas trouvé de mode de financement de ces activités d'observation, nécessaires à la recherche ou tout simplement à l'adaptation des dispositifs d'intervention. Cette lacune a un coût très élevé, celui de l'efficacité réduite des mesures nationales de correction (on pense en particulier au dispositif de lutte contre les pollutions d'origine agricole et d'élevage, dit « PMPOA », ou à la maîtrise des impacts des pesticides).

2 | Sur l'activité d'administration de gestion

2.1 Prévisions régionales besoins-ressources

La bonne gouvernance des problèmes de l'eau passe par l'anticipation des difficultés à venir. En effet, les travaux hydrauliques éventuellement nécessaires pour pallier un déficit hydrique ou, à l'inverse, une augmentation de la fréquence des crues et inondations, demandent des durées longues pour être réalisés. De même, des modifications des pratiques culturelles, des types de cultures, ou même, en situation plus tendue, des modes de consommation (part de la viande dans l'alimentation) en fonction de la disponibilité en eau, demandent des temps de préparation importants.

Il est donc urgent que la France se donne des moyens de prévision tant de la demande en eau que de sa disponibilité, à l'échelle du territoire national. Nous avons constaté l'absence de scénarios déjà élaborés de l'adéquation besoins-ressources sur des durées allant de 10 à 50 ans, région par région. Ces scénarios devraient porter tant sur une prospective agricole en fonction des marchés,

des évolutions des techniques, des besoins en eau autres qu'agricoles, comme les besoins en eau de refroidissement des centrales thermiques, que sur des scénarios climatiques, découlant des études du climat citées plus haut. La protection contre les crues et inondations en fonction d'une éventuelle augmentation de la variabilité climatique fait partie de ces scénarios. La sécurité du parc de barrages, dont les évacuateurs de crues pourraient s'avérer sous-dimensionnés, ou encore la modification des régimes d'érosion et de transport solide (à modes d'occupation des sols inchangés ou modifiés), devraient être pris en compte dans l'analyse de ces scénarios. Une forte incertitude sera attachée initialement aux scénarios à termes lointains, mais cette incertitude sera amenée à décroître avec l'amélioration des prédictions. De tels scénarios existent déjà par exemple aux États-Unis. La disponibilité de tels scénarios sera hautement souhaitable lors de la prochaine campagne de restitution et remise en concurrence des retenues hydro-électriques concédées qui se profile à une échéance de moins de cinq ans, pour certaines d'entre elles, pour fournir des critères de décision. À cet égard, il sera nécessaire de réserver — en quantité, en qualité et en temps voulu — la part de l'eau qui revient au fonctionnement des écosystèmes². Cette prospective serait aussi un élément indispensable dans le débat actuel de la rentabilité des aménagements hydrauliques agricoles.

La réalimentation artificielle des nappes est une technique en cours de développement rapide, surtout à l'étranger, et il serait bon que la France s'y intéresse, pour pallier d'éventuels déficits en années sèches. La filtration des eaux par les berges de cours d'eau est aussi un domaine où des connaissances existent, mais où des expériences complémentaires seraient à réaliser.

Concernant les risques liés aux événements climatiques extrêmes, les années récentes ont révélé la vulnérabilité des activités humaines et montré comment ces événements pouvaient déclencher des réactions en cascade. Ceci a suscité l'inquiétude des populations et le doute chez les politiques sur l'adéquation des mesures de protection prises ou restant à prendre. La concentration urbaine dans les zones inondables ainsi que les problèmes de maîtrise des eaux pluviales posent, parmi beaucoup d'autres difficultés, des problèmes croissants. La mise en place récente d'un service central d'annonce des crues (le SCHAPI) est une mesure excellente ; il faut encore développer, dans le cadre de la prévision régionale citée ci-dessus, une analyse des risques qui tienne compte des changements climatiques et des aménagements à réaliser, tant pour rendre plus résilientes les zones susceptibles d'inondations que pour protéger et maintenir en état les protections.

²Voir par exemple les travaux américains qui argumentent en faveur de régimes hydrologiques qui tentent de demeurer proches des régimes « naturels » en conservant notamment certains épisodes de crue, par exemple Sandra Postel et Brian Richter, *Rivers for life*, Island Press, 2003.

2.2 Santé

Les principales recommandations en matière de santé sont les suivantes :

1. Fixer des objectifs de santé publique à atteindre à travers la qualité de l'eau potable, et définir les indicateurs d'impact sanitaire à utiliser à cet effet.
2. Progresser dans l'analyse économique des enjeux « eau et santé », afin de disposer d'outils pour objectiver les décisions sur l'évolution des normes en matière de qualité sanitaire de l'eau et sur les investissements dans les services d'eau potable et assainissement dans les pays en développement.
3. Améliorer les systèmes d'observation :
 - mettre en place des mécanismes d'alerte et de surveillance des épidémies d'origine hydrique ;
 - développer la mesure du risque endémique d'origine hydrique, en favorisant une meilleure exploitation des bases de données nationales existantes (par exemple, base Sise-eau de la Direction générale de la santé, bases de données de l'Assurance maladie) ;
 - favoriser les politiques de maîtrise des pollutions à la source et de protection des ressources en eau, afin de réduire l'exposition des consommateurs aux mélanges de micropolluants organiques, notamment pesticides, substances à effet perturbateur endocrinien, et médicaments ; il faudrait, dans un premier temps, améliorer notre connaissance des rejets de telles substances perturbatrices afin de développer, dans un second temps, des outils de filtration-traitement au plus près de leurs sources ; il faudrait savoir par exemple si les hôpitaux sont des sources importantes ou si les rejets sont plus diffus avant de mettre en place ces dispositifs de filtration-traitement ; on peut également se demander s'il ne serait pas utile pour les hôpitaux de promouvoir sérieusement des toilettes avec séparation des urines, puisque ces molécules sont rejetées pour l'essentiel par les urines ;
 - développer la surveillance de la qualité des ressources en eau destinées à la production d'eau potable et les moyens de mesure adaptés, notamment, pour le risque infectieux, les méthodes d'analyse microbiologiques adaptées aux eaux brutes, et — pour les risques mutagènes, cancérigènes, et reprotoxiques — des analyseurs ou modèles biologiques permettant de donner un signal interprétable en matière de risque pour l'homme.
4. Privilégier la protection de la ressource et la fabrication d'eau potable à partir de zones de production protégées, exemptes de sources de contamination.

5. Assurer une meilleure cohérence des actions des différents acteurs des domaines eau, santé et environnement, et une meilleure représentation française dans les instances de décision internationales, par la création d'un pôle de compétences « eau et santé ».

2.3 Gestion intégrée

L'expérience institutionnelle française de gestion intégrée à l'échelle des grands bassins-versants (agences de l'eau et comités de bassin), les pratiques de planification et de programmation (Sage et Sdage, programmes des agences de l'eau), les progrès récents de modélisation globale des bassins versants, le savoir-faire technologique et organisationnel des services d'eau potable et d'assainissement, constituent un fondement solide pour être en mesure de relever les défis de la directive-cadre sur l'eau. Les principaux progrès qui paraissent devoir être suggérés concernent :

- l'interface entre les programmes de recherche, le développement d'outils innovants pour l'ingénierie et les gestionnaires ;
- la commande publique d'outils innovants et la capacité à les utiliser de façon pertinente, qui devrait être la conséquence naturelle de cette richesse institutionnelle. Force est de constater cependant que cette commande publique est généralement techniquement faible et ne place pas nécessairement au meilleur niveau les références françaises. Cette faiblesse est un handicap évident pour les enjeux européens, mais également ne permet pas d'assurer un soutien suffisant à la présence de l'ingénierie française à l'exportation. Le renforcement des capacités techniques et scientifiques des services et organismes en charge de la gestion de l'eau, et des bureaux d'étude qui les appuient, devrait constituer une priorité ;
- la tenue d'un système pérenne d'observation par sous-bassin.

L'évaluation socio-économique est encore trop embryonnaire, et les capacités à conduire des exercices prospectifs pluridisciplinaires, clairement insuffisantes. Ceci tient sans doute pour partie à la difficulté permanente des équipes de recherche à bâtir des programmes pluridisciplinaires associant sciences de la nature et de la société, et pour partie également à la réticence des pouvoirs publics aux procédures d'évaluation des politiques publiques. C'est pourtant par cette pluridisciplinarité et par la capacité d'évaluation et d'anticipation que se construiront les progrès les plus sensibles. Les liens entre gestion des territoires et hydrosystèmes mériteraient une attention beaucoup plus forte.

Un dernier point très important porte sur la vulnérabilité accrue de nos sociétés face aux accidents, en particulier, dans le présent contexte, les inondations.

Ces catastrophes sont aussi certaines de se produire qu'aléatoires dans leur date d'occurrence. Mais le lien entre développement et résilience mérite d'être plus étudié : il ne faudrait pas que notre mode de développement nous rende de plus en plus vulnérables.

3 | Sur les problèmes des pays en développement

3.1 Organisation des institutions françaises travaillant sur le développement

Il s'agit, pour les institutions françaises, de savoir, dans la décision d'aménagement, concilier trois aspects :

- l'urgence, dans des échéances de 5 à 20 ans, des problèmes humains (démographie, sortie de la pauvreté, accès à la nourriture, à la santé, notamment par l'accès à l'eau et à l'assainissement pour des milliards de personnes) ;
- la compréhension croissante de la complexité des hydrosystèmes et de leurs temps d'évolution ou de réaction aux aménagements ;
- l'existence d'événements extrêmes (crues et sécheresses) et des évolutions climatiques à échéance de 50 ou 100 ans susceptibles d'affecter à la fois les régimes moyens et les événements extrêmes. La concentration à venir dans les mégalofoles du tiers-monde a de quoi inquiéter quant à la possibilité d'accueillir ces nouvelles populations sur des bases déjà aussi dégradées que celles connues aujourd'hui : comment d'ici 2015, Dhaka au Bangladesh pourra-t-elle accueillir 9 millions d'habitants supplémentaires, ou Lagos au Nigeria 10 millions de plus ? Ne va-t-il pas se produire d'immenses « migrations climatiques » en cas de sécheresses ?

La recherche française et les institutions de gestion de l'eau en France bénéficient à la fois d'une notoriété internationale réelle et d'une maîtrise effective tant des technologies que des mécanismes sociopolitiques aptes à aider à la résolution de ces questions. Cette maîtrise a été acquise au bout de nombreuses années de tâtonnements, et constitue un atout important pour une collaboration. Il ne faut pas que la France passe à côté de l'immense chantier actuel, sans doute sans précédent, d'aménagements hydrauliques de toute nature engagés dans les continents connaissant les mutations démographiques les plus puissantes.

La résolution des difficultés rencontrées par de nombreux pays pour mettre en œuvre une gestion intégrée des ressources en eau et faire face dans des

conditions satisfaisantes aux investissements et améliorations de gestion rendus nécessaires par leur développement démographique relève essentiellement de décisions souveraines des États concernés. Cependant, tant au Maghreb que pour les grands fleuves de l'Ouest africain, mais de façon plus générale dans de vastes parties du monde connaissant de telles difficultés, la recherche française peut apporter beaucoup :

- apporter l'assistance demandée à la maîtrise d'ouvrage publique et aux bailleurs internationaux. Par leurs conseils auprès des autorités nationales et locales, les organismes de recherche ou institutions françaises ont une présence appréciée. Le lien dans ces actions entre le secteur de la recherche (IRD, Cemagref, Cirad notamment) et les opérateurs (AFD, agences de bassin, ministère de l'Écologie et du Développement durable) est cependant insuffisant ;
- mieux assister le développement d'institutions internationales adéquates, en étant plus pragmatique et plus sensible aux réalités locales. Cela suppose, pour l'IRD, comme pour d'autres partenaires, de réviser sa conception de la séparation de la recherche fondamentale et appliquée et d'accepter une implication plus forte dans les partenariats avec l'ingénierie, à travers des missions d'expertise reconnues dans le parcours professionnel de ses chercheurs. De ce point de vue, les évolutions françaises des dix dernières années tournent le dos à la tendance pragmatique et performante des grandes institutions européennes du secteur (CEH Wallingford, souvent citée en référence d'excellence en matière de travaux fondamentaux tout en valorisant de façon massive l'expertise et les recherches finalisées, mais aussi l'IHE à Delft, le DHI au Danemark, etc.). Expertise collégiale plutôt qu'individuelle, mais expertise appliquée au service du développement comme le souhaitent bien des chercheurs de l'institut, en collaboration internationale forte, comme par exemple avec l'IWMI, les agences internationales de gestion des bassins telles que l'OMVS, l'OMVG, ABN ou des centres comme Agrhimet ;
- développer les partenariats recherche-ingénierie. Si, sur le terrain, les ingénieurs des bureaux d'études et les chercheurs se connaissent, tous relèvent la faiblesse des synergies entre les actions de recherche et l'offre d'ingénierie. Des initiatives ponctuelles existent cependant et constituent une excellente base, comme par exemple l'implication de la CNR (Compagnie nationale du Rhône) auprès de l'IRD dans le développement et l'exploitation du système Hydromet de collecte et de gestion de bases de données hydrométéorologiques. Dans la même ligne d'idées, il faudrait aussi renforcer les liens entre recherche, ingénierie et ONG de développement, pour trouver les voies et moyens pour les sociétés en développement de s'approprier les modes de gestion économiquement et écologiquement pertinents ;

- contribuer à mieux former les futurs cadres et techniciens : les efforts réalisés sont salutaires et méritent d'être encore développés et encouragés. La France n'a cependant pas su créer un centre fort de formation dans le domaine de l'eau pour répondre à la demande des pays du Sud. Cependant les partenariats sont nombreux avec les écoles d'ingénieurs, particulièrement fructueux au Maroc et en Tunisie, ou en Afrique (EIER et ETSHER à Ouagadougou, École des travaux publics de Yamoussoukro, Université Cheick Anta Diop de Dakar. . .) et ont sans aucun doute contribué à la formation sur place d'un grand nombre de jeunes cadres de l'administration et à la constitution d'une offre d'ingénierie privée de qualité, capable en particulier d'exporter son savoir-faire dans des coopérations Sud-Sud qui attestent de son dynamisme. Ce succès indéniable doit être poursuivi et renforcé, par exemple dans le cadre des projets du Nepad de créer des centres africains d'excellence sur les sciences et techniques de l'eau. Le développement de centres de formation technique sur le modèle du centre mexicain, créé avec l'appui financier et technique français, devrait être encouragé ;
- la possibilité pour l'ingénierie française de participer à des opérations majeures, génératrices par leur importance d'expériences et de compétences futures, occasions d'innovations et de partenariats durables, dépend d'une excellence prouvée reposant sur la commande publique antérieure interne. Sans cette commande tirant vers le haut leur compétitivité, les bureaux d'études seront vite submergés par la concurrence. Sans cette expérience d'ingénierie des grands projets, la recherche risque de se priver de terrains majeurs de connaissance. Ce qui est attendu des acteurs français n'est d'ores et déjà plus une connaissance ponctuelle et fragmentaire très pointue (sauf innovations spécifiques) dont les instituts de recherche locaux disposent ou disposeront à court terme, mais une capacité pluridisciplinaire de compréhension des enjeux liés autour des aménagements (gestion, optimisation, gestion socio-économique, intégration des aspects sanitaires, de qualité des eaux et de fonctionnement des écosystèmes, morphologiques, capacité d'évaluation et de modélisation globale. . .).

3.2 Alimentation mondiale

Le problème de la faim dans le monde est déjà critique (860 millions d'êtres humains sous-alimentés) et, sauf changement radical, le sera inexorablement plus dans l'avenir, en raison de la croissance démographique. Trois plantes : riz, maïs et blé, fournissent aujourd'hui à part égale 60 % de l'alimentation mondiale (environ 700 millions de tonnes/an chacune). Deux d'entre elles, riz et maïs, dépendent très fortement des apports d'eau. Il est important d'encourager

la culture de variétés plus rustiques, moins « gourmandes » en eau d'une part, et de chercher par les moyens de la génétique à créer des variétés nouvelles plus adaptées aux conditions semi-arides (30-40 % de la surface du globe sont arides ou semi-arides) voire aux sols légèrement salés (plusieurs dizaines de millions d'hectares).

La politique française dans les instances internationales, en particulier le Challenge Programme « Eau et Alimentation » de l'IWMI soutenu par la France, devrait être inspirée par les deux considérations suivantes :

1. Maintenir ou constituer très rapidement des stocks alimentaires, issus prioritairement des productions locales et répartis par sous-régions, susceptibles de venir en aide aux populations lors d'une crise climatique importante, qui inévitablement se produira, mais dont la date d'occurrence est inconnue. Les stocks actuels, en baisse constante depuis 4 ans, apparaissent insuffisants. Ces stocks alimentaires pourraient initialement être constitués dans les pays du Nord, mais devraient donc à terme l'être dans les pays du Sud les plus vulnérables.
2. Augmenter la production agricole mondiale. La première priorité est l'augmentation des rendements dans les territoires déjà exploités et l'économie de l'eau. Ceci passe par une revalorisation des revenus des paysanneries des pays du Sud, pour leur permettre de sortir de leur situation de misère, et de réaliser les améliorations techniques nécessaires pour mieux utiliser l'eau, ou mieux choisir les cultures adaptées. Les centres de recherche locaux sur l'amélioration des techniques culturales sont à encourager. Ensuite, si les travaux d'aménagements pour accroître les superficies irriguées sont indispensables, et doivent être menés en prenant en compte les préoccupations d'environnement, il est clair que cette seule activité ne saura suffire. Le développement des cultures pluviales sur des terres non cultivées aujourd'hui est la seule solution possible à moyen terme. Les ressources en terre pour ce faire existent, particulièrement en Afrique et en Amérique du Sud ; elles existent aussi dans certains pays du Nord. Cette mise en exploitation de terres nouvelles, aujourd'hui espaces naturels (forêts, prairie, steppes, zones humides, ...) devra se faire avec le souci de préserver au mieux ces écosystèmes dès lors menacés, avec l'enjeu d'un maintien de la biodiversité. Le risque d'un appauvrissement considérable de cette biodiversité est grand, et devra être scrupuleusement surveillé. Pour les pays ne disposant que de peu de ressources non utilisées en terre, comme l'Asie, la solution ne peut venir que de « l'eau virtuelle », c'est-à-dire l'importation de nourriture. La façon dont les problèmes d'indépendance nationale et de financement de ces importations peuvent être résolus est du domaine de la politique et doit être directement abordée. La France devrait y contribuer.

Ces recommandations s'inscrivent naturellement dans notre esprit dans une perspective européenne, ou même internationale, en particulier pour les partenariats sur les effets des changements climatiques, le domaine de l'observation de la Terre, la santé, ou la collaboration avec les pays du Sud.

Enfin, il est clair que le problème de l'eau présente une complexité très importante, par l'imbrication des différents facteurs qui y contribuent, et que l'élaboration de plans d'aménagement, de gestion, de préservation, etc., demande de très nombreuses connaissances dans de multiples disciplines. Or, le processus de prise de décision dans le domaine de l'eau est de plus en plus restitué au citoyen, au travers d'une gouvernance participative qui lui confère de plus en plus de responsabilités, et que d'ailleurs la directive-cadre européenne sur l'eau s'efforce de promouvoir (phases de consultation du public par exemple). Ces deux observations montrent qu'il est de première importance d'informer le public, de lui permettre de se former aux problèmes en discussion, afin que cette gestion participative conduise à des prises de décisions objectives. La nécessité de l'appropriation par le public des problèmes de l'eau est une évidence dans les pays en développement, dans les banlieues des villes en croissance rapide et désordonnée, ou dans l'agriculture familiale. Elle doit aussi l'être dans les pays développés, en particulier en Europe où des lieux de débat se multiplient, et où la qualité des eaux est toujours en question.

Le rôle de la formation et de l'information, que nous avons peu développé ici, car ce n'était pas l'objet de ce rapport qui cherchait à rassembler quelques éléments techniques du dossier sans en nier bien au contraire les dimensions sociales, politiques ou géostratégiques, doit être placé au premier plan. À cet égard, le rôle fondamental de l'enseignement supérieur dans la liaison indispensable entre la recherche et la formation dans le domaine de l'eau doit être renforcé, en faisant explicitement figurer les disciplines liées à l'eau dans les écoles doctorales scientifiques. Nous espérons que ce rapport pourra, modestement, y contribuer.

RECOMMENDATIONS

1 | Research organisation

1.1 Climate change

There is at present a very strong presumption that populations and societies are much more vulnerable to hydrological changes than to changes that only affect the temperature. Nevertheless, although climate changes are considered inevitable, their impact on the hydrology is in fact much less well known than their effect on temperatures.

If the effects of climate changes on continental waters are to be anticipated, research on the hydrological components of the climate must be stepped up. This concerns not only the modelling of average climate conditions, together with improvements of model performance regarding water cycles, but also predictions of changes in the intensity/frequency of extreme hydrologic events for which present knowledge is quite insufficient. Additionally, one of our conclusions regarding the climate changes is that the evolution of vulnerability is more important than the evolution of random events. The consequences of extreme events are increasingly experienced as a “domino effect” (e.g., the effects of a Paris flood) as the systems become more interconnected, interdependent. This aspect of the vulnerability has been given little attention so far and it is important that those who design highly interconnected systems consider more robust schemes that will prevent or reduce the risks of a domino effect.

In France, the major problem caused by climate change is likely to be the risk of drought rather than floods. The temperature rise is an accepted fact and even

a weakly increasing trend has significant effects on evapotranspiration. The effects may be cumulative (year-on-year) although the annual evapotranspiration is limited by the water reserves in the soil. As opposed to rainfall, it acts as a trend and a small change in the trend might, on the one hand slightly reduce the winter recharge which occurs between December and mid-March and, on the other hand, exacerbate the summer deficit (simply by a somewhat higher evapotranspiration) with, in addition, the two effects being cumulative. The predicted higher frequency of heat-waves corroborates this prediction.

Research into ancient climates should also be strengthened. In Holocene times, for instance, the temperature was 2 °C higher than it is today. How much rain fell at that time? We know little about how our planet reacted to the melting of the glaciers 20 000 years ago; for example, the ancient climate of the Sahara is not reproduced in the models. This is one of the fields where the research might be intensified, both to validate the models by running them on the ancient periods and to understand how the hydrological phenomena (particularly, extreme events) and the ecosystems evolved during the ancient climate changes. The climate variations are recorded in natural archives together with their causes, the recurrence of extreme events, and they can contribute very usefully to the predictions of future climates and the Earth's response to the changes.

1.2 Ecology

Despite the tangible progress made in the understanding of continental aquatic ecosystems, they continue to deteriorate in France and across the world. This quantitative and qualitative degradation is of great concern because it is unevenly distributed and a source of future inequality and strife. However, the degradation of continental aquatic media is not inescapable and if research is focused on these systems, it may contribute to reverse the present situation and should therefore be encouraged.

From this standpoint, the present tendency in France to divide research on ecosystems into aquatic and terrestrial or surface and sub-surface media is not pertinent even if the time- and space-scales on which the different media evolve are not always compatible; it would be better to eliminate these divisions which isolate the scientists instead of allowing them to work together. The functioning of the system Earth in its totality, including atmospheric, terrestrial and aquatic phenomena, on the surface or at depth, all linked together by complex physical and biochemical processes and acting with different time constants should be the focal point of the research. The separation, adopted by the CNRS (French National Scientific Research Centre), between a solid and deep Earth and superficial fluid envelopes does not seem pertinent in this context.

Some years ago, the French Administration began structuring the research on continental aquatic media within a framework of environmental research observatories (ERO) but the financing of the project is already drying up and has been incorporated into the recurrent budget of the agencies. The result is that the long-term survival of these observatories is uncertain and their structuring and the coherence of their measurement programmes are no longer followed up. The structuring of the various research institutes could be co-ordinated by an organisation of the type GIP (grouping of public interest) or GIS (grouping of scientific interest) liaising with a network of workshop zones and operational observatories to be developed in collaboration with the water authorities who need them to implement the European framework directive on water. On these sites, research could be undertaken into the resilience and the engineering of the ecosystems and their rehabilitation. Observations from space are useful and efficient procedures of gaining a better understanding of the state of the environment but they cannot by any means replace field observations of the media: only a combination of the two systems would allow an extrapolation of some of the results. This type of co-ordination would fill the void created by the disappearance of the former GIP Hydrosystèmes and strengthen a common scientific endeavour. The observatories should, of course, work toward an ecological goal but should also form a monitoring network for climate changes, public health problems and water management. The vitality of French research activities in the field of continental waters also depends on vigorous actions to make their mark on current and future international programmes.

1.3 Data

The series of rainfall- and hydrologic measurements in the existing measurement networks are the main, globally useful instrument by which the hydrological components of the climate changes can be identified. Given that these components are intrinsically variable, detecting them requires a great deal of perseverance: monitoring for several decades at the very least. However, all over the world there has been a sharp fall in the availability of these data for the last ten years¹. In many developed countries, access to the data costs money and in many developing countries the data are no longer, or only sporadically, collected. This situation must rapidly be turned around. In France, hydrological and rainfall measurements should be made available to researchers without charge, at least after some time, which would make it possible to derive some economic benefit from industrial and public users, in the short term. The data collected in the environmental research observatories (ERO) must without fail be introduced into a data base and rapidly made available. Regarding hydrologic

¹E.g. Meybeck M., Vörösmarty C. (2005). Fluvial filtering of land-to-ocean fluxes: from natural Holocene variations to Anthropocene. *C.R. Geosciences*, **337**: 107-123.

and rainfall measurements, France should demand that they be treated in the same way, first across Europe and then internationally under the auspices of the WMO. Finally, in its programmes of co-operation with developing nations, France should endeavour to help restore the hydrologic-measurement networks.

It is also imperative to gather information on human impacts. The data on the effects of different land uses (forms of urban development, farming practices, ploughing, meadows, forests, etc.), inputs of crop treatment products or stock farming practices are, at present, insufficient. France lags far behind because it has not found a way of financing these observations which are vital to the research or simply for the adaptation of the methods of intervention. This shortfall is expensive because it leads to a lack of efficiency in national corrective measures (viz., the fight against pollution by agriculture and animal farming called PMPOA and control of the impact of pesticides).

2 | Management organisation

2.1 Regional predictions of demands and resources

The best management of water problems is one that anticipates future difficulties. Hydraulic engineering works that might be required to alleviate a water deficit or, on the contrary, an increase in the frequency of floods and inundations take a long time to become operational. Similarly, considerable preparation is required to achieve changes in farming practices or crop cultivation or even, in a more serious situation, eating habits (amount of meat in the food) in order to adapt them to the available water resources.

Thus, it is of the utmost urgency for France to equip itself with the means of predicting both the demand for water and its availability across its national territory. We have noted a lack of operational scenarios balancing demand and resources over the next 10 to 50 years, region by region. These scenarios should include: predictions of agricultural activity as a function of the markets, technical progress, demands for water other than for farming, e.g., cooling water for power plants, as well as of purely climatic conditions on the lines of the studies mentioned above. The protection against floods and inundations caused by a potential increase in climate variability is an intrinsic part of these scenarios. When the scenarios are analysed, one must take into account the safety of the dams whose flood release channels may not have sufficient capacity as well as the changes that may occur in the regimes of erosion and solid transport (if the land use stays the same or changes). Initially, high uncertainty will be attributed to long-term scenarios but the uncertainty will decrease as the precision of the predictions improves. This type of scenario exists already, for example in the

United States. It is highly desirable that such scenarios be available to provide criteria for the decisions to be made in the next series of new bids for concessions of hydroelectric dams some of which are expected to be relinquished within the next five years. Furthermore, it will be necessary to reserve the share of the water — the quantity, quality and at the appropriate time — that is needed to allow the ecosystems to function². This consideration is also a necessary element in the present debate on the economic yield of agricultural hydraulic engineering.

Artificial recharge of the aquifers is a technique that is developing rapidly, particularly abroad, and it would be desirable that France take an interest in this matter in order to alleviate potential deficits during drought years. Filtration of water by the river banks is also a field of research where knowledge is available but where additional experiments should be carried out.

Regarding the risks linked to extreme climatic events, recent years have revealed the vulnerability of human activities and demonstrated how such events can trigger a chain of domino effects. This has caused anxiety in the populations and doubts in the minds of politicians as to the reliability of the protective measures planned or already in place. The concentration of urban developments in the flood plains and the issues of managing heavy rainfalls, among many other concerns, contribute to the increasing burden of problems that have to be tackled. The recent creation of a central flood-alert agency in France (SCHAPI) is an excellent initiative; furthermore, it is necessary to develop, within the framework described above, risk analyses that take into account potential climate changes and the work that has to be undertaken to make less vulnerable the zones likely to be inundated and to protect and maintain their defences.

2.2 Health

The main recommendations for public health matters are the following:

1. set the targets for public health standards which have to be attained through the quality of drinking water and define the indicators of public health impact to be used to reach these standards;
2. proceed in the economic analysis of the elements of “Water and health” in order to make available the tools needed to make objective decisions on the evolution of the health standards in matters of water quality and on the investments in the services of drinking water and sewage treatment in developing countries;

²E.g., research in the US which argues in favour of hydrologic regimes that try to stay close to “natural” ones by, for example, conserving some flood events, see Sandra Postel and Brian Richter, *Rivers for life*, Island Press, 2003.

3. Improve the observation systems:

- create alarm and surveillance systems focused on epidemics of water-borne diseases;
 - develop measuring the risks of endemic water-born diseases by encouraging a better use of existing national data bases (e.g., SISE-water of the General health authority, Health insurance data bases;
 - strengthen the policies of limiting pollution at the source and protecting water resources to reduce the exposure of consumers to mixtures of organic micropollutants, in particular, pesticides, substances causing endocrine dysfunction and medicines; as a first step, we must improve our knowledge of discharges of such substances in order to develop, as a second step, tools to filter and treat them as close to their sources as possible; it must be ascertained, for instance, whether or not hospitals are important sources or if the discharges are more diffuse before the means of filtering and treatment are put in place; one might also examine the possibility of hospitals installing toilets with urine separation as these molecules are mainly contained in the urine;
 - enhance the monitoring of the quality of water resources destined for drinking water production and improve the measurement strategies, particularly, aimed at risks of infection, methods of microbiological analyses suited to untreated water and - regarding mutagenic, carcinogenic and reprotoxic risks - analysers or biological models able to provide a signal interpretable in terms of risks to humans;
4. encourage protection of the resources and the production of drinking water from such protected zones, devoid of contaminant sources.
5. ensure greater coherence between the actions of the various agents in the fields of water, health and environment and a stronger French presence in the international decision-making bodies by creating a centre of excellence "Water and Health".

2.3 Integrated management

French institutional experience of integrated management at the scale of great watershed basins (water agencies and basin committees), of planning and programming practices (Sage - Plan for water development and management - and Sdage - Master plan for water development and management -, water agency programmes), recent progress in comprehensive modelling of entire watershed basins, the technical and organisational know-how of the drinking- water and water-treatment services offer a solid basis on which to meet the challenges of

the framework directive on water. The main areas where progress seems desirable are:

- the interface between the research programmes, the development of innovative engineering and management tools;
- public-sector demands for innovative tools and the ability to use them appropriately which ought to be a natural consequence of all these institutional assets. It must, however, be admitted that demands from the public sector are, in general, technically weak and do not necessarily put the French references in the front line. This weakness is an obvious handicap in the European arena as well as preventing French engineering skills from enjoying sufficient support to make its mark internationally. Strengthening of the technical and scientific capacities of services and organisations in charge of water management and of the consulting firms who assist them should be considered a priority;
- maintaining each sub-basin under permanent observation.

Social and economic evaluations are still at an embryonic stage and the capacity to conduct pluridisciplinary prospective exercises is clearly insufficient. One of the reasons for this is doubtless the permanent difficulties encountered by research teams when trying to set up pluridisciplinary programmes associating earth- and social sciences; another may be the hesitations shown by public authorities regarding evaluations of public policies. Still, it is through pluridisciplinary efforts and a capacity to evaluate and anticipate that the most significant progress will be made. The link between the management of the land and the hydrosystems deserves much closer attention.

Last but not least, the increased vulnerability of modern societies when faced with accidents, here in particular, floods. These catastrophes are as certain to happen as they are random as to when they strike. The link between resilience and development should therefore be studied further: our mode of development must not render us ever more vulnerable.

3 | Regarding problems in the developing world

3.1 Organisation of French institutions working on development

French institutions should be able to reconcile three aspects when making development decisions:

- the urgency, in a time-frame of 5 to 20 years, of the human problems (demography, alleviation of poverty, access to food and health, in particular, through access to water and waste-water treatment for billions of people);
- the increasing understanding of the complexity of hydrosystems and the time-scale of their evolution and of their reaction to engineering transformations;
- the existence of extreme events (floods and droughts) and climate change over a 50 to 100-year time span, likely to affect both the average regimes and the extreme events. The future population concentrations in the megapolises of the Third World are causing great concern because of the seemingly intractable problem of accommodating new arrivals in the already much degraded conditions that we observe today: how will Dhaka in Bangladesh be able to receive 9 million additional inhabitants or Lagos in Nigeria 10 million more? Will major “climatic migrations” occur in case of drought?

French research and the water-management institutions in France enjoy both a good international reputation and a high competence in the technologies and the social-political mechanisms that might help to answer these questions. This competence has been acquired after many years of trial and error and it represents an important asset in co-operative actions. France must not lose sight of the opportunities offered by the gigantic building-site, doubtless without precedent, of hydraulic engineering works of all types being undertaken at present on the continents where the demographic transformations are the strongest.

It is mainly sovereign decisions by the concerned Governments that will tackle the difficulties encountered by many countries desiring to put in place an integrated management of their water resources and find satisfactory means of facing the investments and management improvements required by their demographic evolution. However, French research can make great contributions both to the North-African countries and to the regions around the great West-African rivers as well as, in a more general sense, to large parts of the world where the difficulties are the same. It can:

- provide assistance, as requested, to oversee public works and to advise international finance providers. French research institutes and organisations are appreciated for their advice to national and local authorities. In these actions the links between the research sector (IRD, Cemagref, Cirad, etc.) and the operators (AFD, basin agencies, Ministry of ecology and sustainable development) is nevertheless insufficient;
- assist more usefully in the development of adequate international institutions by being more pragmatic and more sensitive to local reality.

For IRD, as well as for other partners, this means revising its notion of the separation of fundamental and applied research and accepting a stronger role in partnerships with engineering by recognising the value of expert missions in the curriculum of its scientists. From this point of view, the evolution in France over the last ten years has turned its back on the pragmatic and productive trend of the great European institutions in this sector (CEH-Wallingford, which is often quoted as a reference of excellence in matters of fundamental work while attributing great value to the expertise and targeted research but also the IHE, the DHI, etc.). Corporate expertise rather than an individual one, but expertise as a service to development, as desired by many scientists at the IRD, accompanied by strong international co-operation with, for example, the IWMI, international agencies for watershed management such as the OMVS, the OMVG or centres such as Agrhymet;

- develop research-engineering partnerships. Although the engineers from the consulting agencies and the researchers meet in the field, they all agree on the lack of synergy between the research efforts and the engineering demands. There are, however, sporadic initiatives that form an excellent basis as, for example, the collaboration by the CNR (National Rhone Company) with the IRD in the development and exploitation of the Hydromet system for collecting and managing hydro-meteorological data bases. Along the same lines, it is important to strengthen the links between research, engineering and development NGOs in order to define ways and means by which developing societies can acquire economically and ecologically pertinent management practices;
- assist in improving the training of future cadres and technicians: the efforts made so far have been positive and deserve to be further developed and encouraged. France has, however, not succeeded in establishing a strong training centre in the field of hydrology to fulfil the expectations of the countries in the South. Nevertheless, there are many partnerships with engineering schools, particularly successful ones in Morocco and Tunisia or in Africa (EIER and ETSHER in Ouagadougou, Ecole des travaux publics de Yamoussoukro, Université Cheick Anta Diop in Dakar, etc.) which have undoubtedly contributed to the training on the spot of many young cadres in public service and to the creation of an offer of high-quality private-sector engineering which is, in particular, able to export its know-how in a South-South co-operation, thus proving its dynamism. This undoubtedly successful endeavour should be pursued and strengthened, for example within the framework of the Nepad projects, to create African centres of excellence on water science and technology. A development of technical training centres on the model of the Mexican centre created with French financial and technical backing should be encouraged;

- the opportunities for French engineering of participating in major operations, which by their size would generate experience and competence for the future, occasions to innovate and form durable partnerships, depend on proved excellence, based on previous internal public demand. Without this demand which enhances their competitiveness, the consulting firms would soon be overwhelmed by their competitors. Without this experience of great engineering projects, the research is in danger of depriving itself of major fields of competence. What is expected of French scientists is no longer a very specialised and narrow cutting-edge knowledge (apart from specific innovations), which is available at local research institutes or can be obtained in the short term, but a pluridisciplinary capacity to understand the challenges surrounding engineering projects (management, optimisation, social and economic management, integration of matters of health, water quality and ecosystem functioning, morphology, capacity to carry out comprehensive evaluations and modelling, etc.).

3.2 How to feed the world

The problem of hunger in the world is already critical (860 million people are undernourished) and, barring some radical change, will continue to increase because of population growth. Three plants: rice, maize and wheat, today provide, in equal shares, 60% of the world food production (around 700 million tons/year each). Two of them, rice and maize, depend greatly on the water supply. It is important to favour the cultivation of hardier, less “thirsty” varieties, on the one hand and to try by genetic means to develop new ones that are more suited to semiarid conditions (30 to 40% of the earth’s surface is arid or semiarid) or even to slightly saline soils (several tens of millions of hectares).

In international organisations, French policy, in particular within the IWMI Challenge Programme “Water and food”, which it supports, should be based on the following two considerations:

1. Maintain or rapidly build up food reserves, primarily produced locally and distributed regionally, that can be used to help populations in times of a grave climate crises which are inevitable but whose arrival date is unknown. The current stocks that have been decreasing constantly for the last four years, seem insufficient. To begin with these reserves should be stored in northern countries but would in time be located in the most vulnerable countries in the South.
2. Increase the food production in the world. The first priority is to increase the yield in already cultivated areas and to save water. To achieve this,

the farmers in southern countries must receive a greater economic benefit from their work to be able to rise above the poverty line and put in place the technical improvements needed to use water more efficiently or to choose more suitable plants to grow. Local research centres focusing on better farming practices should be encouraged. However, if it becomes clear that it is necessary to undertake engineering works in order to increase the irrigated acreage and this work has to be done with the environment in mind, such actions cannot alone solve the problem. Development of rain-irrigated crops on presently uncultivated land is the only possible solution in the medium term. There is sufficient land left to do this, particularly in Africa and South America; there is available land in some northern countries as well. The new land that would be opened up to farming is today natural environments (forests, steppe, wetlands, etc.) and as their ecosystems would be threatened, the greatest care would have to be taken to safeguard them and their biodiversity. There is a great risk that the biodiversity would suffer considerable losses and it must therefore be carefully monitored. In countries where the resources of uncultivated land are scarce, for example in Asia, the only solution would be "virtual water", *i.e.*, imported food stuffs. The means by which problems of national independence and financing of such imports can be solved belong to the domain of politics and must be tackled directly and France should contribute to finding the solutions.

In our view, all these recommendations must, of course, be considered in a European, or even international, perspective, particularly regarding partnerships to face the effects of climate changes, observe the state of the Earth, protect health and co-operate with the countries in the South.

Finally, it is obvious that the problem of water is extremely complex because of the interrelations of the different contributing factors and because the setting-up of schemes to develop, manage, preserve, etc. require a great body of knowledge in a number of disciplines. However, the decision-making processes in the field of water are increasingly handed back to the citizens through shared control, which endows them with ever greater responsibilities and is promoted in the European framework directive on water (period of public consultation, for example). These two observations show that it is of primary importance to inform the public, allow the public to learn about the problems in question in order to ensure that this shared management leads to objective decisions. The necessity of public participation in solving water problems is obvious in developing countries, in the suburbs of rapidly and chaotically growing cities or in family-based agriculture. The case should be the same in developed countries, particularly in Europe where the number of debating venues is increasing and where the water quality is always in question. The role of education and information has hardly

been touched upon here because it is not the object of this report, which tries to concentrate on a few technical elements without denying the value of the social, political and geostrategic dimensions, but the importance of these actions must be emphasised. On this subject, the fundamental role of Higher Education as an indispensable link between research and training in the field of water must be strengthened by explicitly including water-related disciplines in the scientific Ph.D. programmes. We hope that this report will contribute, however modestly, to do so.

TABLE DES SIGLES

ABN	Autorité du bassin du Niger
ADN	Acide désoxyribonucléique
AEP	Alimentation en eau potable
AFD	Agence française pour le développement
Afssa	Agence française de la sécurité sanitaire des aliments
Afse	Agence française de sécurité sanitaire environnementale
Agrhimet	Centre du CILSS à Niamey, Niger, pour la formation dans le domaine de l'agro-écologie (agroclimatologie, hydrologie, protection des végétaux)
AMCOW	African Ministerial Conference on Water
ARN	Acide ribonucléique
AQEM	Aquatic Quality Evaluation Method
AVCI	Années de vie corrigées du facteur invalidité, DALY en anglais
AWTF	African Water Task Force
CEH	Centre for ecology and hydrology, Wallingford, Royaume-Uni
Cemagref	Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts
CILSS	Comité inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel
Cipel	Commission internationale de protection des eaux du Léman
Cirad	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CME	Conseil mondial de l'eau
CNR	Compagnie nationale du Rhône
CNRM	Centre national de recherches météorologiques, Toulouse
CSHPF	Conseil supérieur d'hygiène publique de France
DALY	Disability Adjusted Life Years
DCE	Directive cadre européenne sur l'eau

Ddass	Direction départementale de l'action sanitaire et sociale
DDT	Dichlorodiphényltrichloroéthane, un insecticide
DG	Direction générale (à la Communauté européenne à Bruxelles)
DGS	Direction générale de la Santé, ministère de la Santé, Paris
DHI	Danish Hydological Institute
DJT	Dose journalière tolérable
Drass	Direction régionale de l'action sanitaire et sociale
Drire	Direction régionale de l'industrie, de la recherche et de l'environnement
DVGW	Deutscher Verein des Gas und Wasserfaches
EDF	Électricité de France
EIER	École inter-États d'ingénieurs de l'équipement rural à Ouagadougou, Burkina-Faso
ENSO	El Niño Southern Oscillation
EPA	voir USEPA
ESCAP	Comité économique et social pour l'Asie-Pacifique (http://www.carnetsduvietnam.com/web/infos/mars2001.htm)
ETSHER	École inter-États des techniciens supérieurs de l'hydraulique et de l'équipement rural, Kamboinsé, Ouagadougou, Burkina-Faso
FAO	Food and Agricultural Organisation (Nations unies)
FMI	Fond monétaire international
GDF	Gaz de France
GEA	Gastro-entérites aiguës
GES	Gaz à effet de serre
GESI	Initiative mondiale d'assainissement environnemental
Gicc	Groupe interministériel sur les changements climatiques, Paris
Giec	Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat
GIWA	Global International Waters Assessment du PNUE
GMR	Great Man-Made River (Grande rivière artificielle), Libye

GRDC	Global Runoff Data Center
GWSP	Global Water System Project
G8	Groupe des huit pays les plus industrialisés
HACCP	Hazard Analysis, Critical Control Points
ICARDA	International Centre for Agricultural Research in the Dry Areas, Aleph, Syrie
Ifen	Institut français de l'environnement
IHE	Institute of Hydraulic Engineering, Unesco, Delft
IHS	Institute of Hydrological Sciences, Wallingford, UK, devenu maintenant CEH
InVS	Institut de veille sanitaire, ministère de la Santé, Paris
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, Giec en Français
IRD	Institut de recherche pour le développement, Paris
ITCZ	Zone de convergence intertropicale
IWMI	International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka
KIWA	Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen, Organisme néerlandais de certification dans le domaine de l'eau
Lp	<i>Legionella Pneumophila</i>
MEDD	Ministère de l'Écologie et du Développement durable, Paris
MODB	Matière organique bio-éliminable
MON	Matières organiques naturelles
MNHN	Muséum national d'histoire naturelle, Paris
Nepad	New partnership for african development
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration, États-Unis
OGM	Organismes génétiquement modifiés
OHRAOC	Observatoire hydrologique régional de l'Afrique de l'Ouest et Centrale
OMD	Objectifs du Millénaire pour le développement de l'ONU
OMM	Organisation météorologique mondiale

OMS	Organisation mondiale de la santé
OMVS	Office de mise en valeur du fleuve Sénégal
OMVG	Office de mise en valeur du fleuve Gambie
ONG	Organisation non gouvernementale
ONU	Organisation des Nations unies
ORE	Observatoire de recherche sur l'environnement
OSS	Office du Sahara et du Sahel, Tunis
PAGER	Programme d'alimentation en eau potable des populations rurales au Maroc
PED	Pays en développement
PIB	Produit intérieur brut
Piren	Programme interdisciplinaire de recherche sur l'environnement du CNRS
PME	Partenariat mondial pour l'eau
PMPOA	Programme de maîtrise des pollutions d'origine agricole
PNB	Produit national brut
PNSE	Plan national santé environnement
PNUE	Programme des Nations unies pour l'environnement
PPRI	Plans de prévention des risques d'inondation
RATP	Régie autonome des transports parisiens
RFF	Réseau ferré de France
RMC	River Mékong Commission
RTE	Réseau de transport d'électricité
Sage	Schéma d'aménagement et de gestion des eaux
SASS	Système aquifère du Sahara septentrional
Schapi	Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations
Sdage	Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux
SDT	Syndrome de dysgénésie testiculaire

SISE-Eau	Système d'information santé environnement-eau
SNCF	Société national des chemins de fer français
THF	Tétrahydrofurane
UICF	Union internationale des chemins de fer
UICN	Union mondiale pour la nature, Gland, Suisse
USEPA	United States Environmental Protection Agency
Unesco	Programme des Nations unies pour la culture
Unicef	United Nations International Children's Emergency Fund
VIH	Virus de l'immunodéficience humaine
Wateco	Groupe de travail européen sur l'eau, dans le cadre de la DCE
Whycos	Système mondial d'observation du cycle hydrologique (OMS)
WHO	World Health Organisation, ou encore OMS en Français
WRC	Water Research Centre, Royaume-Uni
WWAP	World Water Assessment Programme
WWF	World Water Forum ou aussi World Wildlife Fund

Groupe de lecture critique

COMPOSITION DU GROUPE DE LECTURE CRITIQUE

Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts (Cemagref)

Pierrick GIVONE

Directeur scientifique adjoint et hydrologue

Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad)

Patrick LEGOULVEN

Directeur de recherche à l'Institut
de recherche pour le développement (IRD)
— Directeur adjoint de l'UMR G-EAU
à Montpellier

Centre national de la recherche scientifique (CNRS)

André MARIOTTI

Directeur adjoint de l'Insu et département
Environnement et développement durable

Conseil supérieur d'hygiène publique de France — Direction générale de la santé

Yves LÉVI

Professeur à l'université Paris XI
et à la faculté de pharmacie

Direction de l'eau — Ministère de l'Écologie et du développement durable

Jean-Claude VIAL

Directeur adjoint, représentant Pascal
Berteaud

Direction de la recherche et de la prospective — Ministère de l'Écologie et du développement durable

Karine GENDROT

Chargée de mission « Eau »

Électricité de France (EDF)

Frédéric HENDRICKX

Ingénieur chercheur au Laboratoire national
d'hydraulique et environnement**Institut d'astronomie et de géophysique Georges Lemaître**

André BERGER

Directeur

Institut national de recherche agronomique (Inra)

Daniel GERDEAUX

Département Écologie des forêts, prairies
et milieux aquatiques**Institut français de la biodiversité (IFB)**

Jacques WEBER

Directeur

Institut de recherche pour le développement (IRD)

Jean ALBERGEL

Directeur de recherche et chargé de mission
« Eaux et sols »**Laboratoire techniques, territoires et sociétés (LATTS)**

Bernard BARRAQUÉ

Chercheur

Muséum national d'histoire naturelle (MNHN)

Philippe KEITH

Professeur — Département « Milieux
et peuplements aquatiques »**Office international de l'eau (OIEau)**

Jean-François DONZIER

Directeur

Société hydrotechnique de France

René COULOMB

Président

Véolia Environnement

Francis LUCK

Directeur des programmes de modélisation
des milieux naturels –
Direction de la recherche, du développement
et de la technologie (DRDT)

WWF France

Paul BARON

Membre du Conseil scientifique du WWF

Les membres du Groupe de lecture critique, désignés par le président ou le directeur général de leur établissement, ont examiné le texte provisoire du rapport puis, au cours d'une réunion qui s'est tenue à l'Académie des sciences le 20 octobre 2005, ont entendu la présentation de M. Ghislain de Marsily, animateur du groupe de travail, et se sont exprimés.

Ils ont formulé des remarques, dont certaines ont été intégrées, avec leur accord, dans le rapport ; cinq commentaires font l'objet de contributions signées des auteurs : elles sont présentées ci-après.

Ont également été consultés, à titre personnel, par les auteurs : Irène ALMERAS (Fondation Ensemble), Yves LE BARS (Cemagref) et Charles SAOUT (ministère de la Santé).

COMMENTAIRE DE EDF

Frédéric Hendrickx
Ingénieur chercheur

Introduction

L'introduction précise bien les objectifs du document :

- anticiper l'arrivée de situation de crise ;
- recommander des actions de recherche, et des actions préventives quand l'on dispose de bases scientifiques solides.

Les causes des crises seront examinées au travers de trois clés :

- changement démographique ;
- changement technico-économique ;
- changement climatique.

Le rapport, face à la difficulté d'arriver à être exhaustif sur l'ensemble des sujets que touchent les eaux continentales, affiche clairement les choix de ne pas trop se centrer sur la problématique de l'eau potable ou encore de l'eau et énergie.

On regrette à ce stade certains choix notamment celui de ne pas aborder la problématique « eau et énergie » ou encore celle du partage de la ressource entre différents usages.

L'ordre des chapitres aurait pu être inversé : d'abord parce qu'il peut apparaître utile de rappeler ce qu'est le cycle hydrologique et les différents stockages d'eau à la surface de la planète. Par ailleurs, le changement climatique, même si incertain dans sa future réalisation, est bien un élément nouveau dans lequel on doit ensuite positionner toutes les perspectives, qu'elles soient démographiques, technico-économiques, . . . Chaque analyse menée dans les chapitres 1, 2 et 3 aurait ainsi pu mieux tenir compte des incertitudes qu'ajoute le changement climatique annoncé.

Chapitre 1

Ce chapitre est riche d'illustrations sur les enjeux avec beaucoup d'encadrés. On y retrouve des visions à différentes échelles d'espace puisque l'on va du monde à l'échelle de la ville.

Des programmes scientifiques et des outils de modélisation sont mis en avant dans ce chapitre (Piren-Seine, GICC, etc.). Si l'on ne peut qu'approuver l'utilité de tels programmes et de développements d'outils de prospective, si l'on ne peut que constater aussi la faiblesse des moyens consacrés, il apparaît important à ce stade de ré-insister sur l'importance des données. Ces travaux scientifiques nécessitent beaucoup de données pour espérer aboutir ou encore être validés. Ils ne sont souvent réalisables qu'à la condition de l'existence de bases de données complètes (pluie, température de l'air, température de l'eau, débit, et autres paramètres physicochimiques ou encore biologiques) couvrant de longue période (supérieure à dix ans). L'absence de bases de données gratuites est souvent citée comme un frein à l'avancement de la recherche.

Une recommandation à ce stade pourrait être d'aller vers des bases de données facilement accessibles à tous les acteurs publics et industriels de la recherche.

Dans le même ordre d'idées, il y a peut être un intérêt à ce que des équivalents du Piren-Seine, en termes de richesse des thématiques abordées, en termes de valorisation des travaux, existent sur tous les bassins français et pourquoi pas européens.

On note par ailleurs que la dépendance des usages envers la qualité de la ressource est pas ou peu abordée, notamment dans le cas de la situation européenne.

De manière plus large, les problématiques concernant le territoire européen semblent peu marquées, un peu comme s'il n'y avait pas ou peu de risque. Or, le changement climatique, en influant sur la disponibilité en eau dans le temps et dans l'espace, devrait faire naître des tensions plus grandes sur le partage de la ressource : l'agriculture aura besoin de plus d'eau plus tôt dans l'année, pouvant par là même aggraver les situations d'étiage, le maintien des débits réservés pour la protection des milieux aquatiques en aval d'ouvrages sera peut-être plus difficilement tenable dans un contexte d'étiages plus sévères et plus longs, les besoins en énergie sur les périodes estivales iront croissant (usage de la climatisation, chaîne du froid, ...) alors que, dans le même temps, la ressource en eau deviendrait plus rare sur ces mêmes périodes, ... Si l'on peut espérer que nos sociétés occidentales pourront s'adapter en comptant sur

leur capacité d'innovation, il apparaît important à ce stade de bien marquer la nécessité de se préparer à ce très nouveau et encore très incertain contexte climatique.

Chapitre 2

Ce chapitre est remarquable par la qualité de sa rédaction. Il illustre parfaitement la complexité des écosystèmes aquatiques et l'importance de les voir à différentes échelles spatiales et temporelles. Il définit clairement la notion de résilience et la nécessité de gérer cette résilience. Il rappelle aussi l'importance d'observatoires pérennes.

La forme des paragraphes se finissant sur des questions clés rend très lisible et très pédagogique la lecture de ce chapitre.

Le texte démarre très rapidement sur la difficulté d'atteindre et d'assurer le bon état des eaux continentales. Il aurait été nécessaire avant tout de rappeler la difficulté de définir un bon état ainsi que les indicateurs associés. Ce travail paraît d'autant plus difficile que le climat va évoluer, et que l'on doit se poser la question du bon état dans un nouveau contexte climatique. Quel est alors dans ce nouveau contexte climatique le bon état écologique? Si l'on prend un indicateur comme l'indice poisson, indicateur fortement dépendant de la température de l'eau, on constate que l'on va dans les prochaines années essayer d'atteindre un objectif en perpétuel évolution si le régime thermique des cours d'eau évolue. *A contrario*, un indicateur qui ne tiendrait pas compte d'une dépendance au contexte hydroclimatique et à sa future variabilité resterait stable en termes d'objectif, mais peut-être de plus en plus difficile à atteindre que le contexte hydroclimatique évolue.

Dans le paragraphe 1.3, une question clé reprend l'importance de « *minimiser les effets des barrages* ». Le changement climatique va modifier le signal naturel des régimes hydrologiques. Ces nouveaux régimes seront plus marqués avec sans doute plus d'eau l'hiver et des étiages plus sévères l'été. Ils peuvent donc devenir incompatibles par exemple avec des objectifs de protection des milieux aquatiques ou encore avec certains usages, comme le besoin en eau pour l'agriculture. On sent bien alors que le rôle des barrages pourraient s'accroître dans une fonction de soutien des débits. Ainsi, l'accompagnement du changement climatique dans un tel cas de figure nécessite non pas de minimiser l'effet des barrages (c'est-à-dire la modification du signal naturel en provenance de l'amont), mais bien plutôt de minimiser la modification des régimes, quitte à renforcer l'effet des barrages. On pourrait en effet faire plus appel, si le besoin en était exprimé, à la capacité des barrages à déplacer dans le temps

des volumes d'eau pour la satisfaction de certains usages, usage par le milieu aquatique compris.

Il serait apparu peut-être plus judicieux d'exprimer ce point sous la forme d'une question : « faut-il minimiser l'effet des barrages ou renforcer leur effet pour minimiser la modification des régimes hydrologiques ? »

Par ailleurs, dans le paragraphe 4.2, il peut être utile de compléter que les besoins des organismes aquatiques ne se résument pas à un besoin de débit réservé. Les travaux du groupe de travail national « Cellule Débits Réservés » (rapport de synthèse EDF/Cemagref/Conseil supérieur de la pêche/ECOGEA/INP-ENSAT, mai 2005) montrent sur les populations de truites que l'augmentation du débit réservé améliore en général les conditions d'habitat. En revanche, cette amélioration des conditions d'habitat n'est pas systématiquement suivie par un accroissement des populations piscicoles. La seule augmentation de la qualité d'habitat peut en effet ne pas suffire à produire les effets escomptés sur une population de truites. Il faut aussi tenir compte des aptitudes saisonnières du milieu à satisfaire aux exigences de la truite, les auteurs de cette synthèse concluant sur le fait qu'« *un relèvement réussi du débit minimal implique donc de réunir toutes les conditions de fonctionnalités nécessaires à l'expression du gain écologique* ».

Chapitre 4

Ce chapitre fait une revue synthétique de ce que l'on sait du cycle de l'eau et de ses perspectives d'évolution dans le contexte du changement climatique annoncé. Comme on l'a déjà exprimé, il aurait paru plus judicieux que ce chapitre soit placé en premier dans ce document.

Les éléments proposés reprennent bien ce qui est connu du changement climatique et de toutes ces incertitudes. Quelques compléments sont suggérés ci-après.

L'évolution des moyennes n'est pas nécessairement synonyme d'une évolution des valeurs extrêmes. Ce schéma de pensée est sans doute aujourd'hui trop simpliste et dans tous les cas aucunement étayé pour toutes les variables d'étude. Par exemple, de nombreux travaux actuellement en cours sur les crues extrêmes tendent à montrer que bien que de nombreux climats se soient succédés dans les siècles passés, on a beaucoup de difficulté à trouver des instationnarités sur l'occurrence des extrêmes de crue. Pourtant, dans le même temps, les perspectives sur la ressource en eau annoncent des évolutions à la hausse de certaines moyennes mensuelles de débit. Il faut donc, selon chaque variable d'étude (débit, température de l'air, température de l'eau, . . .), toujours se poser ces deux

questions : Quelle est l'évolution probable des moyennes ? Quelle est l'évolution probable des extrêmes ?

La conclusion de ce chapitre est assez contradictoire. Au premier paragraphe, on note « ... la simulation hydrologique et la prédiction de son devenir, par les modèles climatiques, restent difficiles et encore assez imparfaites ». Au deuxième paragraphe, on trouve « ... la simulation climatique nous donne d'ores et déjà une relativement bonne image, pour ce qui concerne tant les régimes moyens que quelques extrêmes ». La simulation climatique est en fait encore bien incertaine : à la dispersion possible des scénarios d'émissions, s'ajoute la dispersion des modèles climatiques entre eux pour un même scénario d'émission. Cette incertitude est aujourd'hui peu illustrée, les simulations climatiques partageant assez souvent une même hypothèse d'émission de gaz à effet de serre (scénario A2 en majorité).

On dispose ainsi de nombreux jeux de possibles des futures moyennes climatiques. On n'en a certainement pas une bonne image. On dispose encore de bien moins d'éléments sur l'évolution des distributions autour de ces moyennes, tout au plus des intuitions. Les efforts de recherche dans ce domaine sont bien encore à conduire, et ce de manière peut-être plus intense que l'on prend conscience de la sensibilité de nos sociétés à d'éventuels changements climatiques.

Conclusion

La conclusion fait une très bonne synthèse des différents chapitres et parfois même complète utilement certains points.

De même, il apparaît utile aussi d'être méfiant vis-à-vis d'analyses de tendance faites sur la base de vingt ans. C'est sans doute trop court pour espérer avoir un résultat significatif.

En ce qui concerne les dérogations aux seuils réglementaires de rejet thermique, il convient de dire qu'elles ont été très peu utilisées (six jours sur une période de canicule supérieure à deux semaines) et qu'elles l'ont toujours été pour les besoins de sécurité d'alimentation du réseau électrique. Il peut aussi être utile de rappeler l'importance de la continuité d'alimentation en électricité (par exemple pour la chaîne du froid ou encore aujourd'hui pour les personnes sensibles à de fortes chaleurs) pour ne pas limiter l'angle d'analyse. Il y a donc véritablement besoin de bien mettre en balance la question des effets de l'utilisation de telles dérogations sur les milieux aquatiques devant les enjeux que sous-tend le besoin d'une fourniture continue d'électricité.

Recommandations

Nombre de recommandations proposées sont partagées.

Il convient sans doute de ré-insister sur le besoin de continuité dans l'acquisition de données d'un maximum de variables et sur des échelles de temps qui dépassent souvent celles des projets. La pérennité des observatoires, la centralisation et la diffusion des données de ces observatoires sont des éléments essentiels pour le travail de la recherche publique et industrielle.

Par ailleurs, la température de l'eau apparaît comme une variable peu étudiée, que ce soit pour elle-même ou pour ses incidences, notamment sur les hydrosystèmes. Pourtant, cette variable est essentielle car c'est en fait à un changement du référentiel thermique et hydrologique des hydrosystèmes auquel il faut se préparer. Comment caractériser le régime thermique des cours d'eau par des grandeurs pertinentes pour l'hydrobiologie ? Comment prévoir et identifier les conséquences du changement climatique en cours ? Une meilleure connaissance des relations entre température et biologie est la condition première pour avancer dans la prévision des évolutions hydro-écologiques à long terme. La question d'une surveillance adaptée à la mise en évidence des dérives biologiques sous l'effet du changement climatique se pose également ; notamment, peut-on définir des taxons indicateurs qui feraient l'objet d'un suivi particulier ?

COMMENTAIRE DE L'INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT

Jean Albergel

Directeur de recherche

Impressions générales

Le rapport sur les eaux continentales dans la perspective des changements globaux a été organisé en quatre chapitres :

- eau, aménagements et usages ;
- écosystèmes aquatiques ;
- eau et santé ;
- eau et climat.

L'accent mis sur ces quatre thèmes est justifié par une volonté de considérer les besoins de nos sociétés par rapport à cette ressource vitale qu'est l'eau. Les quatre parties sont bien présentées et bien documentées, elles sont illustrées d'encadrés de spécialistes.

Les enjeux sociétaux sont très bien exposés en considérant d'une part les sociétés des pays avancés et d'autre part celles des pays en voie de développement. L'introduction signale que l'objectif de ce rapport visait à faire le point sur les problèmes à venir dans l'usage de l'eau en France, dans les Dom-Tom et dans le reste du Monde et en particulier dans les pays en développement. Les spécificités du contexte métropolitain et celles des pays en développement sont bien rendues à la fois par le texte et par les encadrés. Par contre celles des Dom-Tom (Rom Com) sont assez absentes. Il aurait été possible d'aborder dans chaque partie des problèmes plus particuliers aux Rom Com :

- aménagement hydro-électrique et écosystème amazonien avec le barrage de Petit-Saut et impacts sur l'estuaire du Sinnamary ;

- pollutions agricoles des eaux par les pesticides des cultures de la banane aux Antilles. Problèmes de santé liés aux pollutions des sources par le Chloredecone ;
- dégradation des hydrosystèmes continentaux et lagunaires liée à l'exploitation des bauxites (nickel et chrome) en Nouvelle-Calédonie.

Les enjeux de connaissance et de recherche sont par contre moins bien présentés surtout dans les deux premières parties. Chaque partie fait un état de l'art sur sa question, la première à partir de rapports des grandes agences de l'eau, les trois autres plutôt à partir d'articles récents parus dans les revues scientifiques du domaine. Les encadrés choisis sont adéquats dans la majorité des cas. L'encadré sur la gestion des eaux du Sénégal me paraît dépassé et pas suffisamment documenté.

Remarques sur le premier chapitre

Encadré 18

On doit apporter une nuance sur la performance des modèles hydrologiques dans la gestion des bassins versants. Les batteries de modèles présentés comportent encore de grandes incertitudes, tous les processus présentés sont loin d'être modélisés de manière totalement déterministe. Par ailleurs, toutes les données nécessaires à l'application de modèles déterministes et spatialisés à l'échelle d'un grand bassin sont rarement disponibles.

De gros progrès sont encore attendus dans (1) la représentation mathématique de processus géochimiques, (2) la formulation mathématique de la production et du transport de particules solides, (3) la spatialisation des paramètres des modèles. Ce dernier point est crucial pour toute la modélisation des milieux anthropisés où la multiplication des singularités augmente fortement la complexité. Il y a là un enjeu de recherche à mettre en évidence.

Section 2.6, 3^e alinéa

Les métiers d'ingénieurs et de chercheurs sont des métiers différents. Les expertises collégiales sur les états de l'art des connaissances utilisées par les bureaux d'études sont des travaux confiés à des chercheurs. Les passerelles entre recherche et ingénierie sont nécessaires et à l'origine des innovations technologiques. Ces travaux peuvent et doivent être valorisés par des publications et

des dépôts de brevets. Ce serait un mauvais service que de donner un prétexte aux chercheurs pour ne pas publier.

Les cloisons entre l'expertise, l'ingénierie et la recherche ne sont pas aussi importantes que le laisse croire la conclusion de cette partie. Une première preuve est donnée par le nombre des chercheurs de l'IRD (ou autre) affectés sur des temps plus ou moins longs dans des structures typiques d'expertise ou dans les agences de développement et de gestion des eaux : IWMI, secteur hydraulique de la Banque mondiale... ou par la participation sur des temps plus courts de manière institutionnelle aux grandes expertises de ces agences et dans les secteurs qui nous intéressent. Pour parler de l'IRD, on peut citer la participation à l'élaboration du Challenge programme « water and food », de l'EFAR ou de l'IASSTD, les programmes en partenariat avec les organisations de gestion des grands bassins (OMVS, OMVG, ABN, etc.).

Dans le paragraphe suivant (dernier paragraphe), je pense que limiter les travaux de partenariat recherche – ingénierie de l'IRD à des initiatives ponctuelles relève d'une mauvaise connaissance de son activité dans le domaine. En Afrique, on a déjà cité la mise au point du modèle de gestion des aménagements de l'OMVS, mais on peut parler des progrès réalisés dans la modélisation des courbes de remous des grands barrages et du fonctionnement des hydrosystèmes aménagés (étude de Garafiri en Guinée Conakry) ou de « petits sauts » en Guyane.

Remarques sur le deuxième chapitre

Section 4.1

De manière générale, il faut atténuer le rôle de l'agriculture dans les quantités d'eau consommée, si le chiffre de 70 % de prélèvement du milieu naturel n'est pas contestable, ces quantités sont en grande partie restituées sous forme d'infiltration vers la nappe ou par drainage. La partie consommée n'est que transférée vers l'atmosphère. Dans des cas particuliers, c'est l'irrigation qui crée la ressource en eau : nappe de la Crau (par exemple) ou nappe superficielle de nombreuses oasis (Palmyre, etc.).

Conclusion

Je pense que l'on peut un peu plus insister sur l'importance de ORE, et reprendre cette idée dans les recommandations en conclusion générale. Un encadré sur les ORE serait appréciable.

Remarques sur le troisième chapitre

Section 1.6

La fièvre de la vallée du Rift est aussi associée à la première mise en eau de grand barrage : Assouan en Égypte, Diama aux Sénégal – Mauritanie.

Un autre exemple d'influence de la variation du climat sur la santé que j'ai publié avec des médecins est la répartition de la borréliose en Afrique sahélienne en fonction du déplacement de l'isohyète 500 mm.

J'aimerais aussi signaler les études menées par l'IRD sur les impacts des aménagements hydrauliques sur la santé qu'il s'agisse de nutrition, de maladies infectieuses directement liées à l'eau (colloque de Ouagadougou, 2000) : bilharziose, malaria mais aussi des maladies moins directement liées à l'eau comme la leishmaniose dont les risques semblent augmenter avec les aménagement de récolte de l'eau en relation avec la prolifération de rats qui sont les hôtes pour la transmission de la maladie.

Remarques sur le quatrième chapitre

C'est la partie où les enjeux de connaissance sont le mieux développés. . .

Remarques sur la conclusion et les recommandations

Reprendre des recommandations plus spécifiques pour les Dom-Tom (maintenant Rom Com) :

- transferts d'eau ;
- aménagements hydrauliques en Amazonie guyanaise ;
- pollution agricole et santé aux Antilles ;
- dégradation des hydrosystèmes continentaux et lagunaires calédoniens avec l'exploitation minière.

La section 3.2, « Alimentation mondiale », est très importante : citer le Challenge Program Eau et alimentation de l'IWMI, largement soutenu par des FSP de la coopération française.

COMMENTAIRES DE LA SOCIÉTÉ HYDROTECHNIQUE DE FRANCE

René Coulomb, président

Avec la participation de

Daniel Duband, président de la division « Eau & environnement »

et de

Thierry Pointet, animateur de sa section « Eaux souterraines »

I. Limites du rapport

Si le rapport n'aborde théoriquement que les « eaux continentales » il aurait néanmoins été souhaitable de :

- parler de l'eau des mers et océans à cause du dessalement permettant d'assurer une fourniture d'eau douce qui sera de plus en plus importante à l'avenir ;
- traiter ce qui concerne le débouché en mer des eaux continentales, celles-ci influençant le « trait de côte » et l'évolution des estuaires et des deltas. Le réchauffement climatique, élevant le niveau des océans, agira sur le débouché en mer des eaux continentales ;
- traiter de la pollution marine liée aux eaux continentales, problème important sur le littoral et jusqu'aux limites du plateau continental.

II. Bien que ce rapport prenne en compte des problèmes très actuels, tels que « l'eau virtuelle » et les variations climatiques, il nous aurait paru souhaitable que le rapport soit plus volontariste sur les sujets suivants.

Si le problème posé par l'augmentation de la population mondiale est soulevé, le sujet sensible du contrôle de la démographie n'est pas abordé. Au-delà d'une évolution naturelle vers une limitation de la croissance des populations (pour laquelle des données récentes auraient mérité d'être recueillies sur les « transitions démographiques » en cours dans des pays à forte natalité), les

politiques menées dans certains pays (La Chine notamment) montrent qu'un plafonnement de la population est possible, ce qui permettrait de résoudre bien des problèmes.

Limiter la migration des populations rurales vers les villes et éviter la création de gigantesques mégapoles grâce à un aménagement volontaire du territoire par les pays en développement est également essentiel. Le Rapport aurait pu aborder cette question : malgré ses imperfections, la politique d'aménagement du territoire, poursuivie en France depuis un demi-siècle, a permis d'éviter à cet égard les catastrophes « Paris et le désert français » qui avaient été annoncées.

III. L'eau ne manque pas : seule sa qualité, sa répartition dans l'espace et dans le temps et sa répartition entre les différents usages posent problème et ces problèmes sont locaux plus que planétaires, car l'eau ne se transporte que d'une façon très coûteuse sur de longues distances.

Le partage des usages de l'eau pose effectivement de graves problèmes dans beaucoup de régions du monde, y compris en France, en raison de la croissance des besoins face à une ressource limitée. Aussi est-il regrettable que cette question ne soit pas traitée dans le rapport sous ses différents angles : économique, social et environnemental.

Le sujet du « partage des usages de l'eau » est difficile. Aussi l'Académie de l'eau avait-elle essayé de l'aborder à partir de cas concrets. Lors d'une conférence-débat le 13/06/2003 avaient été ainsi présentés par des conférenciers :

- les cas de la nappe de la Beauce, du bassin de la Neste et du bassin du Lot en France ;
- le cas de la Californie (avec l'emploi d'instruments de marché et une gestion par la demande).

Les « actes » de cette conférence-débat ont été établis. Le 3 juin 2005, le cas du bassin de la Durance et du Verdon a été présenté lors d'une autre assemblée générale de l'Académie de l'eau.

IV. Le problème majeur du traitement des eaux usées, à savoir :

« Que faire des boues résultant de ce traitement ? » n'est pas abordé alors que leur principal débouché, l'amendement des sols pour l'agriculture, pose des problèmes techniques et sociaux (acceptabilité de ces boues) et est refusé par l'industrie agroalimentaire.

V. Le rapport n'aborde pas, ou très insuffisamment, les questions relatives aux traitements, procédés et méthodes non conventionnels pour résoudre les problèmes de l'alimentation en eau ou de l'irrigation dans les régions où l'eau manque. Et pourtant, il s'agit de connaissances remontant à des années et qui sont susceptibles d'importants développements à l'avenir.

a) Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres

Le dessalement nucléaire n'est pas une technologie spécifique de dessalement, mais on peut dans un complexe intégré construire sur le même site, avec des services partagés, une installation de dessalement et une installation de production d'électricité, qui fournit également l'énergie nécessaire au dessalement par distillation ou osmose inverse.

Le prix du dessalement, en particulier par osmose inverse, est appelé à baisser encore à l'avenir. En outre, pour les eaux peu salées ou saumâtres, le coût du dessalement par osmose inverse baisse beaucoup au m³ produit et est déjà de 0,30 à 0,40 dollar.

b) Alors que l'utilisation de variétés nouvelles adaptées aux sols légèrement salés (plusieurs dizaines de millions d'hectares) n'est évoquée qu'à la fin des recommandations, ce genre de questions est étudié depuis plusieurs années, y compris l'usage d'eau salée pour l'irrigation (avec tous les problèmes que cela pose pour le sol et les espèces végétales à cultiver) car l'enjeu est important pour certains pays comme l'Égypte. (cf. « Mediterranean Water Ressources : major challenges towards the 21st century » par Atef Hamdy et Cosimo Lacirignola, mars 1999 – Chapitre V1 : Use of low quality water for irrigation : major challenges).

c) L'accent n'est pas non plus mis sur l'importance que peut revêtir à l'avenir, notamment pour l'agriculture, la réutilisation des eaux usées.

(cf. entre autres, la même référence d'Atef Hamdy et Cosimi Lacirignola, Chapitre V2-Sewage water : prospects and challenges for use).

d) Même si l'on évoque au chapitre 3 la réalimentation des nappes, la place donnée à une gestion active des aquifères paraît largement insuffisante. On s'intéresse aux flux, mais il ne faut pas oublier que l'on peut jouer aussi sur une gestion dynamique des stocks souterrains d'eau.

VI. Le rapport nous paraît faire une place insuffisante aux événements extrêmes (crues et inondations-étiages) et aux risques en général.

a) En créant des aménagements qui s'approchent au plus près des milieux naturels à « géométrie variable » ou, dit plus scientifiquement, dont la situation ne relève pas d'un état mais d'une dynamique – une rivière, une nappe, un océan – et dont on n'a retenu que la position dynamique moyenne (que par anthropocentrisme on qualifie d'ailleurs de « normale »), on expose tous les biens et les personnes qui sont situés dans la plage de variabilité. Ainsi :

- construire au plus près du niveau d'un cours d'eau (dans un but de recherche de qualité de vie, de foncier moins cher, etc.) ;
- tabler sur le débit moyen d'un cours d'eau pour un usage économique (pisciculture, dilution d'effluents, flux d'eau de refroidissement, etc.) ;
- exploiter l'eau d'une nappe par des forages insuffisamment profonds alors que cette nappe bouge ;
- dimensionner des ponts pour un débit moyen, qui deviennent de vrais verrous lors d'une forte crue, etc.

Il faut apprendre d'une manière générale à respecter sous toutes leurs formes les plages de variabilité des milieux aquatiques. Les zones d'expansion des crues en sont une expression mais il y en a bien d'autres. Ne pas « s'approcher au plus près », faute de quoi on est amené à compenser par des ouvrages régulateurs, protecteurs, ou au pire détruire puis réédifier ailleurs ; les plans Barnier en sont l'illustration extrême.

b) Il ne faut pas fragmenter, et ainsi la rendre elliptique, l'analyse d'un phénomène intégrateur. Ainsi, dans le paragraphe 1.1 des recommandations (changements climatiques), les pénuries liées à des pluies moindres et les pénuries liées à des températures plus élevées (« à des températures plus élevées, évapotranspiration plus forte ») sont présentées d'une façon distincte. Ce n'est pas aussi simple : l'évapotranspiration dépend autant de l'hygrométrie de l'air, que du couvert végétal saisonnier, de l'ensoleillement, de la saison à laquelle la pluie tombe, qui peut se modifier, etc. Rien ne dit qu'une température plus forte n'entraînera pas plus de nuages et plus d'humidité de l'air, donc une évapotranspiration peut-être moindre. Il me semble qu'il vaudrait mieux regrouper tous ces paramètres et parler de disponibilité de l'eau, en tant que phénomène intégrateur, dont rien ne démontre qu'elle baissera dans les proportions que l'on dit, plutôt que de parler de l'eau versus les pluies (seulement) ou de l'eau versus la température de l'air (seule).

Rares sont les approches intégrées qui prennent en compte l'état des sols, l'infiltration, le stockage – donc le retard – souterrain. Hydrologie, météorologie, géologie et pédologie sont intimement liées. Il est donc souhaitable d'éviter des approches exclusivement sectorielles.

c) En ce qui concerne les variations de climat, il faut se référer à 100, 200, 500 voire 1 000 ans et non pas à 20 ans. Actuellement il n'y a pas de tendance lourde sur les données de précipitations et de débits dans les pays disposant de 100 à 200 ans d'observations. Le paramètre qui présente une tendance à long terme est la température de l'air.

Comme l'indique le rapport, rien ne démontre que le risque de crue soit en augmentation : on n'est pas sorti de la plage de variabilité qui est le propre des climats tempérés, et si les journalistes font de chaque « hautes eaux » un événement, même avec répétition, cela n'a pas valeur de démonstration. Il faut comprendre les mécanismes et de raisonner plus souvent que l'on ne le fait par approche analytique et moins par approches analogiques. L'approche analogique conduit à dire qu'en un même lieu d'un bassin versant toutes les pluies identiques provoquent des effets identiques. Or on sait qu'une pluie de janvier sur l'est de bassin parisien ne produira pas du tout le même effet selon qu'elle rencontre un sol gelé ou non. Une pluie de 200 mm sur les Cévennes provoquera une crue, ou bien rien, selon qu'elle rencontre un sol très sec ou semi-humide. Analyser, comprendre et expliquer pour modéliser sont ce que nous ne faisons pas assez pour gérer les crues.

d) En ce qui concerne le § 1.1 les risques de crue nous paraissent mériter autant d'attention que le risque de sécheresse. L'estimation des lois des précipitations extrêmes est par exemple, une question fondamentale pour le dimensionnement des évacuateurs de crues des barrages notamment. La Houille Blanche y a consacré des articles dans ses numéros 6/2003 et 3/2004 et d'autres paraîtront en 2006 et 2007.

Il faut, dans les recommandations relatives à la recherche, maintenir la nécessité de poursuivre les études de phénomènes (événements) locaux, observés depuis 100 à 250 ans avec des mesures ou reconstitués depuis plus longtemps.

Il faudrait sans doute aussi poursuivre les études et recherches concernant l'usage des radars et des satellites tant pour l'hydrologie que pour les ressources en eau.

VII. Un point particulier : le § 4.4 du chapitre 3

Le pouvoir épurateur des berges est probablement réel dans un certain nombre de cas. Mais il ne faut pas commettre de faux sens. Il n'est épurateur que par des réactions d'oxydoréduction ou par un captage des nitrates par des cordons d'arbustes. Ces cordons sont connus sous le nom de « bandes enherbées ». Jamais des bactéries n'ont dégradé des sels métalliques sans un

apport nutritif : il faut des matières organiques. Deuxièmement ce genre de réactions est tellement dépendant de chaque combinaison particulière « condition redox/bactérie/substance » qu'il faut se défier d'en faire une recette paravent — encore — par laquelle on résoudrait miraculeusement les problèmes de pollutions diffuses et de pollutions ponctuelles sans avoir à les comprendre plus avant, alors que l'enjeu est plus en amont sur la façon de réduire ou de séquestrer les pollutions diffuses. L'idée est certes intéressante mais la présentation qui en est faite reflète, me semble-t-il, trop honnêtement l'expression « écologique » qui a pu en être faite lors du colloque du 15 au 17 septembre 2003 organisé par l'Académie des sciences Elle mériterait d'être reprise dans le cadre plus large du fonctionnement du bassin et de ses compartiments, de l'amont jusqu'à la rivière.

COMMENTAIRE DE VEOLIA

Francis Luck

Département ressources et modélisation

Ce rapport est destiné à donner aux ministres en charge de la Recherche et de l'Environnement, un éclairage sur les difficultés susceptibles d'être rencontrées dans le domaine de l'eau, que ce soit en France, dans les Dom-Tom ou dans le reste du monde.

Il a aussi pour ambition, face à ces difficultés potentielles, de proposer des mesures devant prévenir la survenue de situation de crises, soit par le lancement de programmes devant combler le déficit de connaissance d'une part, ou encore au moyen d'actions préventives, qu'elles soient réglementaires ou économiques.

Sont abordés dans ce rapport essentiellement les problèmes de ressources en eau, de production alimentaire, d'écosystèmes et de qualité d'eau, et de risques d'inondation.

Sur l'ensemble de ces thématiques, de très nombreuses données sont présentées et commentées ; cette richesse, appropriée pour un ouvrage de référence, risque de brouiller les idées-force et les conclusions qui sont à tirer de ce rapport. De ce fait, et faute de disponibilité pour une analyse approfondie, nous nous sommes limités à suggérer quelques points complémentaires qui pourraient y être développés. À noter que le rapport n'apporte pas d'informations sur la situation dans nos Dom-Tom.

Chapitre 1 – Eaux, aménagements et usages

De façon générale, la place qu'occupe la thématique « eaux souterraines » dans le rapport est trop succincte, car limitée au risque global de surexploitation, aux aquifères fossiles (nord-) sahariens, aux échanges à l'interface des eaux souterraines avec les eaux de surface (chapitres 2 et 3), ainsi qu'à la présence de pesticides dans les nappes françaises (chapitre 3). L'état des ressources françaises d'eau souterraine, qui assurent de façon prépondérante l'alimentation en eau de notre pays, aurait dû être développé davantage.

Chapitre 2 – Écosystèmes aquatiques

Ce chapitre bien structuré et documenté aurait mérité d'être suivi par un chapitre spécifique sur l'état des eaux souterraines (*cf.* remarque ci-dessus).

Chapitre 3 – Eau et santé

1.3 Pollution des ressources en eau par des substances chimiques produites par l'activité humaine

La question du risque à long terme lié à l'ingestion de « mélanges de médicaments » à très faible dose *via* l'eau potable restera sans doute encore longtemps sans réponse. Comme l'écart typique entre la dose thérapeutique quotidienne et la dose individuelle ingérée quotidiennement par l'eau de boisson dans les cas extrêmes, est de huit ordres de grandeur, le risque lié semble extrêmement difficile voire impossible à quantifier. De plus, les médicaments sont eux aussi le plus souvent ingérés en mélange, que ce soit en traitement ponctuel ou chronique. L'effet des résidus de médicaments sur les écosystèmes aquatiques nous paraît plus pertinent à étudier, dans le cadre d'un effort concerté au niveau européen, qu'un improbable effet sur la santé humaine.

En revanche, les derniers progrès des connaissances sur l'élimination des hormones et résidus de médicaments dans les stations d'épuration, notamment dans le cadre du projet Poséidon cité, devraient être présentés.

Ce sont les données sur la toxicité aquatique chronique qui font pour l'instant défaut pour la majorité des produits pharmaceutiques, et non celles sur la toxicité aiguë ou à court terme.

Rappelons en tout état de cause, qu'en raison de l'augmentation considérable des taux de raccordement et de dépollution en France depuis une quinzaine d'années, suite à l'application de la directive européenne sur le traitement des eaux résiduaires urbaines, la pollution de nos ressources d'eaux de surface par les perturbateurs endocriniens et médicaments a fortement diminué, même si l'absence d'analyses ne permet pas de quantifier de façon précise les progrès effectués.

6.2 Contrôle de la qualité microbiologique de l'eau

Les progrès considérables dans la rapidité de réponse des analyses microbiologiques gagneraient à être mis en parallèle avec les développements plus récents de méthodes d'analyse spectroscopique des bactéries, notamment aux États-Unis dans le cadre du programme de R&D « Homeland Security ». Un exemple d'analyseur actuellement en phase de validation en usine d'eau potable est l'analyseur en ligne « Biosentry » (<http://www.jmar.com/2004/pdf/JMARBioSentryProductBrochure.pdf>)

Chapitre 4 – Eau et climat

5 Les événements extrêmes et les possibles surprises climatiques

Il serait utile de préciser que des études récentes ont montré que les phases passées de refroidissement du climat (glaciations) se sont établies très rapidement, en quelques dizaines d'années, en liaison avec le ralentissement de la circulation thermohaline.

Conclusion

Les conclusions présentées sur chaque élément-moteur des évolutions à venir dans la gestion et l'utilisation des ressources en eau ont tout d'abord le mérite de remettre en perspective un certain nombre d'effets globaux/locaux et court/long terme et, de ce fait, d'en relativiser les impacts potentiels.

Nous partageons à la fois ce parti pris, salutaire dans le contexte actuel de successions de situations de crises, et la quasi-totalité des conclusions présentées. Toutefois, dans la partie consacrée à la qualité des eaux, des aspects quantitatifs de la pollution des ressources d'eaux de surface et souterraines auraient dû être mentionnés et commentés.

COMMENTAIRE DU WWF-FRANCE

Paul Baron

Membre du comité scientifique du WWF-France

1 | Eau, aménagements et usages

Au niveau mondial, les ressources sont globalement suffisantes vis-à-vis des besoins, même si des transferts d'eau sont à mettre en œuvre. Parmi ces transferts, le rapport insiste sur l'eau virtuelle transférée des zones plus humides vers les zones sèches par les importations de produits alimentaires ; je pense qu'il serait utilement complété par la prise en compte plus systématique des transferts d'eau virtuelle dans l'autre sens par le développement des cultures d'exportation des PED, comme la tomate et les légumes de contre-saison, mais aussi l'olive, les agrumes, le latex, etc.

Au niveau régional, les solutions passeront par deux pistes à développer simultanément : la coopération politique internationale, d'une part, pour « se partager équitablement la ressource » ; en effet, de nombreuses zones de conflit potentiel sont liées à cette question ; l'expertise collégiale et pluridisciplinaire, d'autre part, pour préparer les programmes et évaluer les politiques publiques.

Au niveau local, en plus des questions liées au schéma de développement des mégapoles, le rapport évoque deux aspects de la gestion des eaux indésirables : la maîtrise des eaux pluviales, dont la gestion risque de se compliquer si les événements météorologiques extrêmes sont plus nombreux et qui fait peser des risques sur la santé publique par dissémination des sources de contagion, et le risque d'inondation mal maîtrisé en France, malgré les dispositions réglementaires et pour lequel il faudrait s'interroger sur l'influence néfaste des lois d'indemnisation des catastrophes naturelles pour une gestion de l'urbanisme diminuant la vulnérabilité.

2 | Écosystèmes aquatiques

Trois points particuliers semblent à retenir dans ce chapitre :

- un écosystème (pas seulement aquatique), n'est jamais en équilibre, mais résulte d'une série de déséquilibres permanents ; en conséquence, les perturbations naturelles sont indispensables au maintien de leur intégrité ;
- la résilience des écosystèmes est mal connue, la rupture étant brutale dès le franchissement d'un seuil et le retour à l'état initial lié au franchissement d'un autre seuil, différent du précédent ; la recherche dispose là d'un grand domaine à approfondir. La notion de « débit minimum biologique » est effleurée ; je pense qu'elle devrait être approfondie, dans la poursuite des réflexions conduites, entre autres, par le Cemagref il y a une dizaine d'années ;
- le rapport introduit la notion de socio-écosystème, que j'approuve totalement, la gestion des espaces naturels ne pouvant pas ignorer les hommes qui y vivent et les utilisent ; c'est donc bien un ensemble de spécialistes allant des sciences de la Terre à celles de l'homme et de la société qu'il faut associer pour la gestion de ces milieux.

3 | Eau et santé

J'ai apprécié l'examen détaillé des divers risques sanitaires que le rapport passe en revue ; je retiens trois questions évoquées :

- le problème sanitaire posé par la réutilisation des eaux usées, alors que ce processus se développe rapidement pour l'irrigation dans les PED (voir la vallée du Sebou au Maroc à l'aval des égouts de Fès) ; dans ce domaine la recherche, couplée à l'industrie (techniques et matériels adaptés) est à développer en priorité, tandis que des mesures réglementaires conservatoires doivent être proposées ;
- la fixation par les autorités, en lien avec la population (comment ?), du niveau sanitaire acceptable pour l'eau potable ;
- le rappel que les questions de santé-environnement ne disposent pas d'un corps de spécialistes de haut niveau, absolument indispensable.

4 | Eau et climat

Ce chapitre décrit les incertitudes qui demeurent sur l'importance du changement climatique en cours, en particulier sur le cycle de l'eau, et recommande d'accélérer la recherche dans ce domaine.

Il présente l'avis, que je partage, que l'évolution de la vulnérabilité, liée au développement de l'urbanisation et des activités en bordure de mer et dans les vallées, est un phénomène plus urgent à maîtriser que l'évolution de l'aléa.

Conclusion et recommandations

J'approuve entièrement la conclusion « que la résolution des problèmes de l'eau passe pour beaucoup par les sciences de l'homme et de la société et que les sciences de la vie et de la Terre permettent de poser les problèmes et d'imaginer les solutions, mais ne sont pas, à elles seules, capables de concevoir comment ces solutions pourraient être mises en œuvre et couronnées de succès ».

Il est dit aussi que la solution des questions d'alimentation des populations est plus un problème d'organisation sociale qu'un problème de ressource. C'est vrai, à condition de se placer à l'échelle internationale.

Parmi les recommandations auxquelles j'adhère globalement, je souhaite insister sur :

- la gratuité des données météorologiques et hydrologiques pour les besoins de la recherche ; cette demande constitue la proposition n° 12 du Livre blanc publié en 2005 par l'Association française de prévention des catastrophes naturelles : *S'informer pour réduire les risques naturels* ;
- la nécessité de disposer d'observatoires des écosystèmes aquatiques, opérant selon des protocoles cohérents ;
- l'urgence de relancer une recherche publique, en particulier, sur l'ingénierie écologique et l'analyse économique pour permettre aux bureaux d'études français et aux entreprises de poursuivre leur présence à l'international et d'assurer une meilleure représentation française dans les instances de décision internationales.

Présentation à l'Académie
des sciences
par Paul Caro

Correspondant de l'Académie des sciences

– 22 novembre 2005 –

Ce rapport est très riche et aborde un grand nombre de questions. Il traite plutôt des situations de crise réelles ou potentielles et des réponses à apporter. Toutes les questions n'ont pu être abordées au même niveau de profondeur. Par exemple celles qui touchent à l'eau industrielle et aux affaires liées à l'énergie comme les barrages hydroélectriques et les rejets d'eaux des centrales nucléaires n'ont pas été traitées. Les Dom-Tom également auraient demandé un grand effort d'analyse en raison de la diversité des cas qui ne pouvait être mené à bien dans le temps imparti. Vous avez reçu avec la convocation pour cette séance un texte de Ghislain de Marsily qui présente l'introduction, les conclusions et les recommandations du rapport. Je vais donc m'attacher à décrire essentiellement le contenu des quatre chapitres qui présentent les travaux de la Commission.

Rédigé à la demande des ministres chargés de la Recherche et de l'Environnement, ce rapport « s'est donné pour objectif d'apporter un éclairage sur les difficultés que nos sociétés sont susceptibles de rencontrer dans le domaine de l'eau, à court, moyen et long terme en France, dans les Dom-Tom, mais aussi dans le reste du monde et en particulier dans les pays en développement ». On note naturellement que cet objectif est très ambitieux et couvre un très vaste domaine. Il s'agit « d'anticiper l'arrivée de situations de crises » et de proposer des actions publiques qui peuvent être le lancement de programmes de recherche ou d'acquisition de données ou, lorsque celles-ci sont déjà suffisantes, de suggérer une action préventive réglementaire ou économique. Il s'agit en premier lieu d'appliquer les connaissances acquises au territoire national. Toutefois en raison de l'importance de la recherche institutionnelle française dans les pays du Sud et les pays en développement et de l'engagement de la France dans les programmes internationaux et les questions humanitaires, le rapport évoque des problèmes plus globaux, régionaux ou planétaires.

Les situations de crise dans lesquelles interviennent les problèmes liés à la ressource en eau sont de diverses natures : la sécheresse, le manque d'eau, ou encore l'inondation, l'excès d'eau, mais aussi la détérioration de la qualité de l'eau et des écosystèmes. Toutes ces crises ont des conséquences économiques, politiques, environnementales, et de santé publique. Les problèmes et leurs solutions potentielles dépendent de facteurs qui évoluent constamment comme les démographies, les migrations de population, l'urbanisation, mais également des changements technologiques et socio-économiques, facteurs qui dépendent plus ou moins de l'organisation des sociétés humaines mais auxquels se superpose le risque extérieur d'évolution climatique ou la menace périodique d'événements climatiques extrêmes.

Dans l'**introduction** du rapport, Ghislain de Marsily met en évidence tous ces problèmes de façon à définir l'orientation générale du travail.

Le premier chapitre traite de « **l'eau, aménagements et usages** », il est rédigé par Pierre Alain Roche et Daniel Zimmer. Il s'agit d'une vision très globale du

problème. Les auteurs constatent qu'il n'y a plus à la surface du globe de système hydrologique continental qui ne soit aménagé ou anthropisé. Cela revient à mettre, au premier rang des disciplines concernées, l'ingénierie des hydrosystèmes qui va devoir traiter à la fois les questions de gestion et d'aménagement, de préservation des écosystèmes, les aspects sociaux et économiques, les questions de santé publique et les aléas climatiques. Ces questions se posent à des échelles différentes selon la dimension du territoire sur lequel on souhaite agir : planétaire, grands bassins fluviaux, échelle métropolitaine.

La première partie analyse les disparités des bilans besoins-ressources en eau à l'échelle mondiale sous l'angle du rapport entre démographie et alimentation. Elle pose la question des rapports entre eau, agriculture et alimentation. À l'échelle planétaire, la question de l'agriculture est fondamentale parce qu'elle est, et de loin, le plus gros usager de l'eau et qu'en conséquence, le marché des denrées alimentaires est le facteur le plus important de couplage des questions d'eau et de démographie. Le rapport présente une évaluation quantitative des mouvements d'eau (précipitations, évaporation, écoulements...) à la surface de la planète. La définition de ce que l'on entend par « ressource en eau » mérite d'être soulignée car strictement elle se limite « aux eaux liquides accessibles aux usages humains » et par conséquent ne tient pas compte de l'eau de pluie utilisée par l'agriculture non irriguée. Cette distinction entre agriculture irriguée et non irriguée intervient en plusieurs points du rapport. Au final les ressources renouvelables utilisables sont de l'ordre de 10 à 12×10^{12} m³/an à comparer avec $1,35 \times 10^{18}$ m³ d'eau salée dans les océans, $2,4 \times 10^{16}$ m³ de glaces, 10^{16} m³ d'eaux souterraines et 9×10^{14} m³ d'eaux de lacs... Les prélèvements dus aux activités humaines représentent environ 30 % des ressources renouvelables utilisables et la consommation (eau non restituée au milieu) environ 15 %. À l'échelle planétaire, il n'y a donc pas de risques de pénurie d'eau. Le problème se situe bien sûr dans l'inégalité spatiale et temporelle des ressources disponibles car des seuils de pénurie peuvent être observés localement si le seuil de 40 % de prélèvement est atteint ou dépassé ce qui en 1995 affectait 35 % de la population humaine. Le rapport donne des détails, tableaux et graphiques, sur l'évolution des prélèvements et des consommations d'eau hors agriculture pluviale. Les prélèvements par habitant sont passés de 300 m³/an en 1900 à 720 m³/an en 1980 et depuis décroissent légèrement. Des tensions apparaissent en particulier parce que les usages agricoles de l'eau sont concurrencés par les usages industriels et les usages domestiques (eau potable, assainissement) ce qui a conduit certains pays à puiser dans les nappes fossiles souterraines. L'augmentation de la population devrait conduire à accroître fortement dans le futur les prélèvements d'eau de façon à assurer la production agricole.

Si l'agriculture a autant besoin d'eau, c'est à cause de la physiologie des plantes. Elles perdent au niveau des stomates beaucoup d'eau pour absorber du gaz carbonique. Les stomates sont un niveau de couplage des cycles globaux

du carbone et de l'eau. Selon les mécanismes de la photosynthèse utilisés par le végétal, pour assimiler un gramme de CO₂ certaines plantes (dites en C3) perdent par transpiration 600 grammes d'eau alors que d'autres (dites en C4) perdent seulement 300 grammes. Il faut compter un millier de litres d'eau transpirée par kg de matière brute végétale produite. Mais cela diffère beaucoup selon les productions agricoles : les pommes de terre demandent 100 litres par kilogramme alors que la production d'un kilo de bœuf a consommé 13 000 litres d'eau. . . Pour réguler la consommation d'eau, les régimes alimentaires ont donc une très grande importance.

Devant la nécessité de nourrir une population de plus en plus nombreuse, la consommation d'eau agricole mondiale ne peut que croître. Le rapport montre que l'on ne peut attendre de l'irrigation suffisamment de progrès, il faut donc s'efforcer d'améliorer les rendements de l'agriculture pluviale et plus généralement de perfectionner l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour avoir « plus de récolte par goutte ». Le rapport suggère que, pour assurer l'alimentation mondiale, une augmentation des surfaces cultivées serait souhaitable notamment en Afrique et en Amérique latine où les terres cultivables ne couvrent que 20 % de la superficie. Cette proposition risque de se heurter à de vives critiques écologiques. Par contre la pression en Asie du Sud et au Moyen-Orient est très forte puisque déjà 85 % des sols cultivables sont utilisés.

L'utilisation des biotechnologies, des méthodes de modification génétiques, pourrait améliorer la résistance des plantes à la sécheresse (stress hydrique) mais par contre l'échange eau-carbone au niveau des stomates semble trop complexe sur le plan génétique pour laisser espérer une diminution artificielle de la quantité d'eau perdue dans l'échange. La répartition très différente des ressources en eau se traduit par un transfert de matière alimentaire d'une région vers une autre, d'un continent vers un autre. Les exportations alimentaires des pays développés augmentent. Cela revient à un transfert d'eau virtuelle des pays sans problèmes hydriques vers ceux qui en ont, c'est-à-dire les pays les plus pauvres. Ces transferts d'eau virtuelle augmentent énormément et la tendance va se poursuivre. Elle risque évidemment de rendre les pays qui ont un déficit de production alimentaire dépendants des marchés mondiaux, de vider de sens la production agricole dans des zones difficiles et d'augmenter le flux migratoire des paysans vers les villes où se posent d'autres problèmes d'eau évoqués plus loin dans le rapport.

La deuxième partie du chapitre 1 présente les problèmes liés à l'eau à une échelle intermédiaire de gestion des ressources, de préservation des milieux et d'aménagement intégré, c'est-à-dire celle des grands bassins versants et des grands aquifères. Les situations sont très différentes en raison de la diversité des régimes hydrologiques, de la pression anthropique ou des possibilités d'action. Les auteurs passent en revue un certain nombre de zones géographiques pour illustrer les problèmes, ce qui fait que cette partie du rapport contient un grand

nombre d'encadrés. On présente d'abord l'Afrique « continent de tous les dangers » en commençant par le Maghreb, en soulignant notamment l'importance des nappes d'eau souterraines fossiles, les aquifères du Sahara septentrional et la « Grande Rivière Artificielle » de Lybie, une eau exploitée sur un mode minier. Pour les grands fleuves d'Afrique de l'Ouest, comme le Sénégal, la gestion doit se faire à une échelle internationale. L'historique des programmes et des projets est déroulé et les difficultés rencontrées pour une nécessaire coopération soulignées. Le rapport évoque ensuite les problèmes de la Chine et de l'Asie du Sud-est, décrivant brièvement le projet chinois de transfert d'eau du sud vers le nord du pays, et évoquant avec précision le cas particulier du bassin du Mékong. L'exemple français qui vient ensuite est basé sur la description de la mise en œuvre en France de la directive cadre européenne (2000) sur l'eau. Cela implique le développement d'outils de modélisation des districts hydrographiques qui permet de simuler les effets des politiques publiques et d'analyser les relations entre pressions anthropiques et réponses biologiques. L'exemple du Pire-Seine est donné. Les programmes de simulation de la qualité du milieu aquatique peuvent se projeter sur une quinzaine d'années. Ce sont des outils d'aménagement du territoire. Des efforts de prospective à plus long terme sont par ailleurs engagés mais ils gagneraient à être mieux soutenus par les pouvoirs publics, en particulier dans la perspective du changement climatique. Les auteurs insistent sur la nécessaire synergie entre les actions de recherche et l'offre d'ingénierie. Une meilleure collaboration entre chercheurs et ingénieurs a besoin d'être développée dans ces domaines, en particulier la reconnaissance des missions d'expertise dans le parcours professionnel des chercheurs.

La troisième partie du chapitre 1 est consacrée à la question plus locale des rapports entre l'urbanisation et l'eau, aussi bien la fourniture d'eau potable pour l'alimentation que la question de l'évacuation des eaux de pluie et des eaux usées ou la lutte contre les crues des rivières. La croissance démographique de la population urbaine se combine à l'exode rural, phénomène social bien connu, si bien qu'une population pauvre vient grossir sans cesse des mégapoles où se multiplient les risques sanitaires et où les conditions d'hébergement sont douteuses sur des terrains de plus en plus marginaux (marécages, ravins...). Le rapport donne plusieurs exemples de contraintes d'approvisionnement d'eau pour des villes comme Singapour, Mexico, Jakarta. Une des difficultés majeures que rencontrent beaucoup d'implantations urbaines est la maîtrise des eaux pluviales qui apportent des risques sanitaires liés à leur stagnation ou à la pollution qu'elles véhiculent. Les risques rares d'inondation sont renforcés par la fragilité des grands systèmes urbains. Plusieurs de ceux-ci (exemple de Shanghai) sont construits sur des sols bas et marécageux près de la mer dans des zones à cyclones. L'exemple le plus frappant est celui de Paris, les auteurs montrent qu'une crue de la Seine de l'envergure de celle de 1910 produirait des perturbations considérables dans la vie urbaine et dans les transports, en particulier à cause du développement des technologies électriques et électroniques très sensibles à

l'eau. L'étude des risques naturels pour les villes modernes est encore trop peu développée.

Le chapitre 2 est intitulé « **Écosystèmes aquatiques** », rédigé par Henri Décamps. La directive cadre européenne sur l'eau fixe pour ambition à l'horizon 2015 de conserver les écosystèmes dans un état qui ne s'écarte que légèrement d'une situation de référence, celle d'un milieu peu modifié par les activités humaines. Or les eaux continentales correspondent à des systèmes instables. Elles peuvent passer d'un « état » à un autre sous l'influence de nombreux facteurs dans un régime dynamique soumis à des ruptures soudaines, rarement prévisibles. L'écologie propose un objectif et des méthodes pour atteindre un état satisfaisant. Il faut rendre les écosystèmes plus **résilients** c'est-à-dire capables de se régénérer après une perturbation. Pour cela une technique d'observation et de mesure est possible, elle se base sur l'évaluation de la richesse et de la diversité des communautés aquatiques animales et végétales. Les organismes vivants sont les témoins des états des eaux continentales et fournissent des indicateurs qui permettent d'évaluer l'effet des perturbations naturelles ou provoquées. Un écosystème en bonne santé est capable de s'autorenouveler. Sous une influence extérieure, par exemple l'activité humaine, un tel système peut évoluer et atteindre un seuil au-delà duquel il est « en mauvaise santé ». Mais la définition du seuil peut dépendre des intérêts des utilisateurs de la ressource (les poissons et les amateurs de sports aquatiques peuvent avoir une appréciation différente. . .). L'expérience montre qu'un état (par exemple la transparence de l'eau d'un lac) peut subsister assez longtemps et s'effondrer brusquement (prolifération d'algues liée à un état de turbidité). Le basculement vers une crise peut se produire sous la contrainte d'une légère évolution des conditions extérieures. Il est difficile à prévoir et à gérer. Le retour à une situation proche des conditions initiales peut être long et difficile (hystérésis) même si la cause extérieure est supprimée (rejets de phosphates par exemple). La gestion de la résilience doit s'appuyer sur la biodiversité et être considérée à divers niveaux d'organisation biologique et à diverses échelles : facteurs climatiques (température, écoulement), facteurs géomorphologiques du bassin versant, profondeur des eaux, environnement terrestre des eaux continentales, etc. Des exemples africains sont donnés ainsi que celui du Lac Léman et du delta du Rhône. Les risques liés aux espèces envahissantes végétales ou animales et à l'eutrophisation sont précisés. L'importance des territoires est soulignée ainsi que la nécessité de préserver dans les aménagements les besoins prioritaires intrinsèques des écosystèmes, par exemple : les rivières doivent conserver un certain débit.

La surveillance biologique permet d'appuyer les politiques de gestion environnementales. Elle repose sur l'usage d'indices multimétriques (par exemple pour les poissons : nombres d'espèces natives, etc.). En Europe on utilise le système AQEM (Aquatic quality evaluation method) qui s'appuie sur 9 557 espèces de macro-invertébrés. Les perturbations naturelles (crues, sécheresses) risquent

d'augmenter avec le changement climatique. Ce type de perturbation est nécessaire au renouvellement des écosystèmes, mais il est difficile de prévoir les réponses aux perturbations anthropiques car elles se caractérisent par un temps de latence indéterminé et par l'accumulation d'impacts différents. On note l'importance des échanges à l'interface entre eaux de surface et eaux souterraines, zone qui entretient un écosystème d'assemblages faunistiques dont l'étude apporte des informations précieuses en particulier au niveau des plaines alluviales où sont construites de grandes villes. Tout ceci met en évidence le « capital nature » que constituent, au service de l'humanité, les écosystèmes aquatiques continentaux. Il est nécessaire de préserver leur intégrité là où ils sont menacés. Ils se dégradent d'une manière inégale à travers le monde. Le rapport suggère de développer la recherche, l'observation et l'ingénierie dans le domaine des zones humides et des bassins versants associés.

Le chapitre 3 traite de la question de l'**eau et de la santé**, rédigé par Jacques Labre, Jean-François Loret et Olivier Schlosser. Les publicités nous ont habitués à associer l'eau au plaisir, à la belle santé, au sport, à la jeunesse radieuse. L'idée de l'eau considérée comme un risque est moins courante. Si on peut imaginer que l'eau pose des problèmes dans le Tiers Monde pour des raisons d'hygiène, on fait généralement confiance dans les pays développés aux capacités de traitement de l'eau. Dans la perspective du risque, il y a cependant des pathologies hydriques émergentes : bactéries, virus et parasites ont été associées à des épidémies parfois importantes comme les gastro-entérites. L'eau de boisson serait responsable de 5 à 40 % de celles-ci. Virus entériques et protozoaires résistent bien aux traitements comme la chloration. L'Europe ne dispose pas encore d'un système fiable de détection et de notification des épidémies d'origine hydrique. Les efforts faits pour améliorer les choses sont décrits dans le rapport. Un cas bien connu est celui des légionelles qui a fait l'objet d'un plan gouvernemental de prévention.

La vulnérabilité de la population augmente car le nombre de personnes qui souffrent de déficit immunitaire est en augmentation. Paradoxalement cette situation pourrait être une conséquence de l'amélioration de la qualité de la médecine et de l'hygiène dans les pays développés comme le suggère un encadré rédigé par Jean-François Bach. Les épidémies à *Cryptosporidium* concernent particulièrement les malades du Sida, dans d'autres cas des bactéries opportunistes, présentes dans l'eau du robinet, profitent d'une faiblesse de l'organisme. Les risques chimiques de l'eau de boisson sont particulièrement préoccupants. La question des résidus de pesticides est critique car la France est le premier utilisateur de produits phytosanitaires en Europe. Ils sont responsables d'un quart des cas de non-conformité des eaux pour l'alimentation des populations. Le problème de santé posé par l'abondance des nitrates est finalement mineur mais ces produits provoquent l'eutrophisation des eaux en favorisant la prolifération des algues et aussi celle des cyanobactéries associées à des toxines qui

peuvent conduire à interdire l'usage d'eaux de baignade par exemple. Autre problème le rejet dans l'environnement de perturbateurs endocriniens qui simulent les effets d'hormones naturelles et de résidus de médicaments notamment des antibiotiques qui peuvent conduire à l'apparition de souches bactériennes résistantes. Ces problèmes font l'objet d'intenses recherches pluridisciplinaires. Les substances chimiques d'origine naturelle comme l'arsenic et le fluor peuvent être dangereuses pour la santé au-delà d'une certaine dose, la consommation d'eaux minérales en bouteille riches en fluor est un risque dû au comportement sélectif du consommateur qui devrait être mieux informé. Le changement climatique peut induire des risques de santé dus notamment à l'expansion des vecteurs du paludisme et de la dengue. Des chutes de pluie importantes suivies d'inondations peuvent favoriser le transport et la diffusion de pathogènes comme des protozoaires.

Il est nécessaire de hiérarchiser les dangers émergents pour définir les priorités de la recherche. L'évaluation des risques étant dispersée au sein de nombreux organismes, aucune structure française ne permet de dégager la synergie nécessaire. Il faut agir dans ce domaine.

Le chapitre comporte une section sur les enjeux spécifiques aux pays en développement avec un exemple édifiant, l'histoire du retour du choléra en Amérique latine en 1991 qui montre l'importance du contrôle continu des eaux de consommation. La section suivante décrit l'évolution des outils méthodologiques et normatifs qui permettent l'analyse et la gestion du risque sanitaire, et précise la nature des indicateurs d'impact sanitaire et des normes de qualité de l'eau. Puis on aborde les perspectives d'action, il s'agit de prévenir les risques d'abord par une meilleure gestion de la ressource en contrôlant les pollutions d'origine agricole (exemple des pesticides), de réduire l'impact des eaux résiduaires, de recourir s'il le faut au génie écologique et d'utiliser les processus hydrogéochimiques naturels (comme la filtration sur berges). Les deux dernières sections proposent d'améliorer le traitement des eaux de distribution et de contrôler la qualité de l'eau par des outils analytiques et de modélisation et aussi de former et d'informer le public.

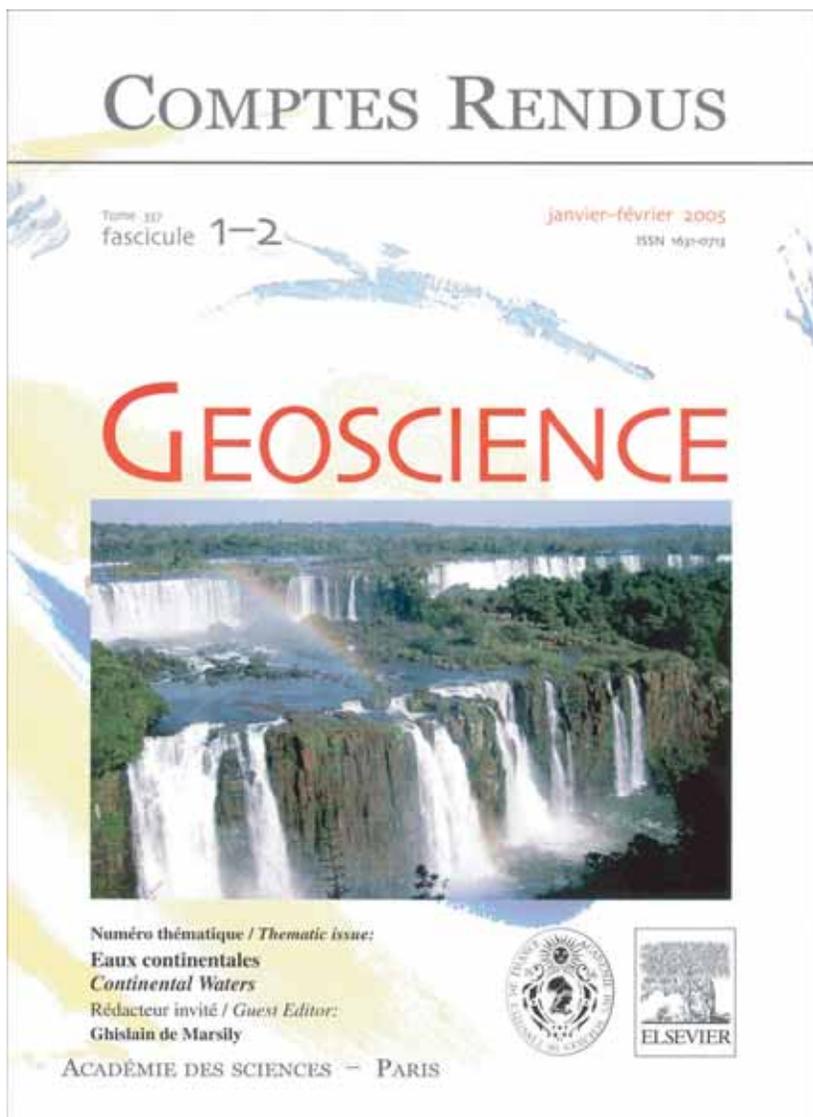
Le quatrième et dernier chapitre du rapport traite des liens entre **eau et climat**, rédigé par Hervé Douville, Katia Laval, Daniel Cariolle, Serge Planton et Jean-Claude André. L'eau joue un rôle important dans le cycle énergétique de l'atmosphère à travers deux propriétés physiques fondamentales. Une propriété thermodynamique : les échanges de chaleur latente aux interfaces entre phases, solides liquides ou gazeuses et une propriété structurale, la réflexion, la diffusion l'absorption et l'émission du rayonnement électromagnétique par les phases de l'eau. Le cycle de l'eau dépend beaucoup du climat, en particulier de la température, et un réchauffement est susceptible de modifier la répartition des ressources en eau sur la Terre. Le rapport fait le point de l'état des prévisions climatiques à long terme pour la France (plus de pluies en hiver,

moins en été). Le cycle de l'eau est décrit en détail avec les données quantitatives sur les bilans énergétiques et des informations sur les durées de vie des systèmes nuageux. La grande diversité des phénomènes est soulignée. Les rôles des principaux composés qui interviennent dans la chimie de l'atmosphère sont rappelés, notamment celui du radical OH. Le changement climatique d'origine anthropique provoqué par le déstockage du carbone fossile ne doit pas faire oublier que l'eau est le principal gaz à effet de serre et il assure ainsi une température moyenne élevée à la surface de la planète. La manière dont le cycle de l'eau réagit à l'augmentation du CO₂ est donc critique. Il semble actuellement devoir être amplifié (accroissement des précipitations globales) mais cela ne semble pas encore avoir influencé l'évolution des réserves en eaux continentales. Le changement climatique dépendra beaucoup de la répartition des nuages (une couverture nuageuse basse aura un effet modérateur, une haute conduira à une amplification du réchauffement). Parmi les effets anthropiques sur les nuages il faut signaler les traînées des avions en vol qui influencent la fréquence des nuages élevés de type cirrus. Les prévisions des modèles mathématiques qui permettent l'étude du cycle hydrologique en climat perturbé sont présentées. Ces modèles ne sont pas encore susceptibles de conduire à des prévisions locales suffisamment fiables, par exemple aucun modèle ne reproduit les conditions humides du nord du Sahara il y a 6 000 ans. Les variations de contenu en eau des sols (risques de sécheresse) sont difficiles à prédire et ne devraient se manifester au-delà du bruit des fluctuations climatiques naturelles que vers le milieu du XXI^e siècle si le réchauffement se confirme. L'influence de la fonte des neiges et les fluctuations potentielles du débit des fleuves sont décrites ainsi que l'évolution potentielle du régime des événements extrêmes. Le risque d'accélération des vagues de chaleur estivales est souligné pour leur influence sur la qualité des eaux continentales et sur les seuils réglementaires retenus pour les rejets d'eau industrielle.

Les *recommandations* du rapport portent sur trois secteurs. L'activité de recherche dans le domaine des changements climatiques, des données et de l'écologie. L'activité d'administration et de gestion pour les prévisions régionales en besoins et ressources, pour la santé et pour la gestion intégrée. Les problèmes des pays en développement, en particulier l'organisation des institutions françaises travaillant sur le développement et les questions d'alimentation mondiale.

Ce rapport, riche en informations dans un domaine typiquement pluridisciplinaire, mérite à mon avis d'être publié.

Également disponible, sur le même sujet, un numéro thématique de la revue *Les Comptes Rendus de l'Académie des sciences* :



À commander sur www.lavoisier.fr