

l'empreinte eau

Daniel Zimmer

L'EMPREINTE EAU

les faces cachées d'une ressource vitale

Préface de Ghislain de Marsily

ÉDITIONS Charles Léopold Mayer

38 rue Saint-Sabin 75011 Paris/France
Tél. et fax: 33 [0]1 48 06 48 86/www.eclm.fr

Les Éditions Charles Léopold Mayer, fondées en 1995, ont pour objectif d'aider à l'échange et à la diffusion des idées et des expériences de la Fondation Charles Léopold Mayer pour le progrès de l'homme (FPH) et de ses partenaires. Les ECLM sont membres de la Coredem (Communauté des sites de ressources documentaires pour une démocratie mondiale) qui rassemble une trentaine d'associations, d'instituts de recherche et de réseaux autour d'un moteur de recherche (scrutari), d'un glossaire commun, le LexiCommon, et de la collection « Passerelle » : www.coredem.info

Vous trouverez des compléments d'information, des mises à jour, l'actualité de l'auteur, etc., sur le site www.eclm.fr

Avertissement

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'UNESCO aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

Les avis et opinions exprimés dans cet ouvrage appartiennent à l'auteur. L'UNESCO décline sa responsabilité quant à l'exactitude des données.

L'auteur

Daniel Zimmer a une formation d'ingénieur agronome (INAPG) complétée par un doctorat d'hydrologie de l'université Pierre et Marie Curie (Paris VI). Après avoir travaillé sur le développement rural en Tanzanie, il a été directeur de recherches au Cemagref (aujourd'hui IRSTEA) dans le domaine du drainage et de ses impacts sur l'eau. Il a également participé à de nombreux travaux internationaux de recherche et d'expertise sur l'eau agricole et la salinisation des sols. De 2001 à 2009, il a ensuite dirigé le Conseil mondial de l'eau où il a coordonné l'organisation de trois Forums mondiaux de l'eau et la mise en place de sommets et tables rondes sur les grands enjeux et la géopolitique de l'eau. Depuis 2010, il combine des activités de consultant sur l'eau avec la direction du programme d'innovation de la « Knowledge and Innovation Community » (KIC) sur le Climat.

© Éditions Charles Léopold Mayer, 2013

Essai n° 198

ISBN 978-2-84377-176-7

Mise en pages : La petite Manufacture - Delphine Mary

Conception graphique : Nicolas Pruvost

REMERCIEMENTS

Ce livre est le fruit de nombreuses années d'interactions avec des centaines d'acteurs de l'eau que j'ai côtoyés dans mes pérégrinations aux quatre coins du globe et dans les Forums mondiaux de l'eau. Des acteurs très divers, de tous les continents. Pas uniquement des chercheurs ou des experts au sens classique du terme, mais plus généralement des personnes intéressées, préoccupées, motivées par un objectif simple : comprendre l'eau et les crises qui l'affectent afin d'agir pour que notre planète reste bleue et verte, deux couleurs dont il sera beaucoup question dans ce livre.

C'est d'abord à eux tous que ce livre est dédié car c'est dans la diversité de leurs opinions, dans la complémentarité de leurs visions que j'ai pu puiser et trouver les moyens d'éclairer les faces cachées de l'eau.

Il serait donc difficile de mentionner ici tous ceux dont il me semble être redevable des idées qui suivent. J'en citerai néanmoins trois. Tout d'abord Ghislain de Marsily qui, depuis mon travail de doctorat, a toujours été source d'inspiration, à travers, notamment les travaux de réflexion de l'Académie des Sciences auxquels il m'a associé. Je dois aussi beaucoup à Bill Cosgrove, avec qui je suis en contact permanent depuis mon travail au Conseil mondial de l'eau. Son exceptionnelle énergie et sa capacité d'écoute n'ont eu d'égal que ses encouragements à mon égard. Paul van Hofwegen enfin a été et reste l'instigateur de nombreux échanges aussi fructueux qu'éloignés des sentiers battus.

Merci aussi à Stéphanie pour sa patience, ses relectures attentives et son soutien continu pendant les mois qu'a pris la gestation de cet ouvrage.

« Mal nommer les choses, c'est ajouter au malheur du monde. »

Albert Camus

PRÉFACE

Ghislain de Marsily¹

Le 27 septembre 2013, j'ai eu l'immense plaisir d'écouter une allocution de Michel Rocard, ancien Premier ministre, lors des 4^{es} Assises mondiales du financement agricole et rural à Paris. Deux choses, parmi ses propos, m'ont frappé : ses reproches aux économistes et à la théorie économique actuelle de n'avoir pas su anticiper la crise économique, initiée en 2008, qui nous frappe encore durement aujourd'hui, et d'autre part l'importance que vont prendre, dans beaucoup de régions, les problèmes de l'eau, en particulier pour l'agriculture. En tentant de mettre en perspective ces deux points de vue, il apparaît clairement qu'une « crise de l'eau », au moins en certains points de la planète, est un danger imminent qui nous menace, et qu'il nous appartient à nous, hydrologues ou spécialistes de la gestion et de la planification des ressources en eau, de savoir l'anticiper, l'annoncer bien avant qu'elle ne se produise, pour être en mesure de l'éviter.

Tout le monde en conviendra. Mais, pour savoir anticiper, encore faut-il avoir les bons outils pour analyser la situation présente, comprendre les évolutions qui se déroulent sous nos yeux, et s'en servir pour prévoir. Il faut donc avoir les moyens de pleinement appréhender l'état de la ressource en eau et l'usage que nous en faisons. C'est ici que les critiques que faisait Michel Rocard aux économistes pour n'avoir pas su prévoir la crise de 2008 doivent nous faire réfléchir : avons-nous les bons outils pour prévoir une éventuelle crise de l'eau ? Il apparaît au contraire que notre vision de la nature des ressources en eau et surtout de leurs usages était jusqu'ici biaisée, partielle, incomplète. Nous ne regardions que l'une des composantes des ressources en eau, celle que l'on appelle désormais l'eau « bleue », celle qui coule dans les rivières ou les nappes souterraines,

1. Ghislain de Marsily est professeur émérite à l'université Pierre et Marie Curie et à l'École des Mines de Paris. Il est membre de l'Académie des Sciences, de l'Académie d'Agriculture de France et de l'Académie des Technologies.

celle que l'on peut capter et utiliser ; nous ignorions les deux autres, l'eau « verte », celle venue directement de la pluie, qui est provisoirement stockée dans les sols et alimente la transpiration de la végétation, en particulier toute l'agriculture non irriguée, dite « pluviale » ; cette eau verte ignorée est en fait le terme dominant de notre bilan en eau. Nous ignorions aussi l'eau « grise », qui est une mesure de l'intensité de nos rejets polluants dans les milieux naturels, qui affecte en la dégradant la qualité surtout de l'eau bleue, mais parfois également de l'eau verte. Avec cette vision partielle et réductrice des ressources en eau, nous étions incapables de raisonner correctement sur nos ressources et nos besoins en eau, et, partant, de comprendre les évolutions ou de savoir anticiper les crises.

Avec cet ouvrage *L'empreinte eau*, Daniel Zimmer remet, si je puis dire, nos pendules à l'heure. Il décrit tout d'abord pourquoi et comment il faut redéfinir la notion de ressources en eau, ses usages, ses pénuries et les liens essentiels entre eau, nourriture et énergie, qui font que ces sujets ne peuvent être traités séparément. Il nous raconte ensuite l'historique du développement du concept d'empreinte eau, depuis les premiers pas faits en Angleterre par Tony Allan (1993) avec l'eau « virtuelle », puis par Malin Falkenmark en Suède (1995), qui a défini l'eau bleue et l'eau verte, ainsi qu'un premier indice de « stress hydrique » à l'échelle d'un pays, jusqu'aux travaux de Arjen Hoekstra aux Pays-Bas (2002, 2012), qui a ajouté à ces deux concepts celui de l'eau « grise » et a défini l'empreinte eau. Daniel Zimmer analyse la relation entre l'empreinte eau et les autres « empreintes », l'empreinte carbone, la notion d'analyse de cycle de vie, etc. Et enfin il rassemble, sur l'empreinte eau, les éléments essentiels permettant de la calculer, avec les difficultés que cela comporte, les empreintes eau déjà estimées, par activité et par pays, et les enseignements que cette notion d'empreinte permet de tirer, pour mieux comprendre les problèmes de l'eau, les risques de pénuries, les solutions à envisager pour s'en prémunir. Ce livre regorge d'informations et de données sur la pénurie en eau, les échanges d'eau virtuelle entre pays, qui seuls ont permis jusqu'ici d'éviter que ne se produisent des catastrophes, même si la situation actuelle, qui perdure depuis plus de quinze ans, est en fait proprement insupportable : faute d'aménagements ruraux et d'équipements adéquats, il y a aujourd'hui près d'un milliard d'êtres

humains qui ne peuvent manger à leur faim, si bien qu'un enfant dans le monde meurt toutes les trente secondes de malnutrition...

Nul autre que Daniel Zimmer n'était mieux en mesure d'écrire un tel ouvrage. Sa formation initiale d'agronome, son expérience de chercheur sur les problèmes d'irrigation et de drainage, puis son rôle de directeur du Conseil mondial de l'eau² lui ont donné une expérience inestimable de l'ensemble des enjeux liés à l'eau. Il travaille aujourd'hui, au sein des instances européennes, sur les effets attendus du changement climatique, et la façon de s'en protéger. Il a déjà, sur ces sujets, beaucoup écrit, en particulier en contribuant à deux rapports de l'Académie des Sciences qui ont tenté de prendre la mesure des problèmes de l'eau³.

Ce livre est remarquable de pertinence, de contenu, d'information, et apporte une vision très nouvelle des problèmes de l'eau. Clair, pédagogique et agréable à lire, il constitue une ressource indispensable à quiconque s'intéresse aux enjeux planétaires liés à l'eau, depuis les spécialistes du sujet, dont ceux du réseau du Programme hydrologique international (PHI) de l'UNESCO, jusqu'à ceux qui veulent simplement être informés de ces questions.

2. Organisme associatif international chargé en particulier d'organiser tous les quatre ans les fameux « Forums mondiaux de l'Eau », où sont passés en revue tous les problèmes de l'eau, depuis l'eau urbaine jusqu'à l'eau agricole en passant par l'eau industrielle, où sont analysées les évolutions constatées, et où sont élaborées des propositions de politiques publiques aux niveaux national et international.

3. « Les eaux continentales » (2006) et « Démographie, climat et alimentation mondiale », publiés chez EDP-Sciences, Paris, consultables sur le site web de l'Académie www.academie-sciences.fr

INTRODUCTION

Depuis plus de vingt ans, nous sommes régulièrement nourris d'une actualité où se mêlent pollutions, pénuries, inondations. L'eau est présentée comme une ressource en passe de devenir de plus en plus rare, qu'il nous faut utiliser désormais avec plus de parcimonie. Le changement climatique amorcé ajoute à ces difficultés une incertitude lourde de menaces. Par ailleurs, bien que notre expérience quotidienne de l'eau nous donne facilement l'impression de les appréhender, de nombreux problèmes nous échappent. Ainsi le manque d'accès à l'eau potable de près de 1 milliard d'êtres humains est-il fréquemment annoncé comme un signe de l'épuisement des ressources. Pourtant, l'eau douce se renouvelle sans arrêt sous l'effet de l'évaporation de l'eau des océans qui génère la pluie, et celle disponible pour les hommes, dont les besoins quotidiens représentent une petite partie, reste sensiblement constante. En revanche, elle doit être partagée entre un nombre croissant d'acteurs aux intérêts souvent divergents.

Les grands enjeux de l'eau revêtent en fait deux aspects, souvent confondus dans les discours officiels et les médias. On soulève d'abord la question de l'accès à l'eau pour les besoins vitaux. En réalité, l'eau dont il est question ici n'est pas une eau potable comme celle qui coule des robinets dans les pays industrialisés, mais une eau ne présentant pas de risques graves pour la santé et disponible à une distance raisonnable de la maison. Dès que l'on met la barre un peu plus haut et que l'on exige soit un robinet, soit une qualité de traitement assurant la potabilité, ce sont plutôt 4 ou 5 milliards d'êtres humains qui se retrouvent dans le besoin. Dans la plupart des cas, ce n'est pas l'eau qui manque, mais les ressources financières pour construire les infrastructures, réseaux, usines de traitement de l'eau. À cet égard, une comparaison avec le téléphone portable qui a conquis le monde en quelques décennies est instructive. En 2011, on comptait près de 80 téléphones portables pour

100 personnes¹ dans les pays en développement, et près de 120 dans les pays industrialisés. Comment expliquer ce succès²? Si l'on raisonne en termes de rapport coût-bénéfice, le téléphone a un avantage sur l'eau en raison du relatif faible coût des infrastructures. De plus, ses bénéfices sont faciles à appréhender par ses utilisateurs, contrairement à ceux de l'eau qui, bien au-delà du confort, se déclinent en termes de santé, de force de travail, de mortalité infantile ou d'éducation, et sont donc difficiles à relier directement à l'eau. Ce contraste explique le manque d'investissements dans l'eau potable : bien qu'elle soit fondamentale pour le bon fonctionnement des sociétés, ses coûts d'infrastructure sont élevés et ses bénéfices sont difficiles à évaluer. Nous observons ici une caractéristique importante de l'eau, ses influences et ses bénéfices « cachés » qui sont au cœur de la réflexion de ce livre.

Le second enjeu est celui de la disponibilité en eau douce pour l'ensemble des usages humains. Il y a largement assez d'eau pour satisfaire nos besoins sanitaires et de boisson – quelques dizaines de litres par jour –, mais il n'en va pas de même pour la production de notre énergie, de notre alimentation et de l'ensemble de nos biens de consommation qui requièrent plusieurs milliers de litres par jour. Cette eau utilisée par des industries ou par l'agriculture ne se retrouve pas dans le produit final ; elle est donc invisible pour nous. Notre mode de vie a des conséquences sur l'eau qui nous échappent et qui peuvent affecter d'autres hommes en d'autres endroits de la planète : les ordinateurs que nous utilisons ont de fortes chances d'avoir pollué l'eau en Asie, et les vêtements en coton que nous portons d'avoir participé à l'assèchement de la mer d'Aral en Ouzbékistan.

Ainsi, à travers tous les produits que nous consommons, l'eau s'est globalisée et n'est plus une simple ressource locale. Environ un cinquième de l'eau utilisée par l'agriculture, le plus gros consommateur d'eau douce planétaire, entre ainsi dans les échanges internationaux. Les volumes échangés augmentent régulièrement et

fortement. Tant que l'eau douce de la planète était d'accès facile, cela n'avait sans doute pas grande importance, mais l'augmentation de nos prélèvements accroît les tensions en de nombreux endroits. Sans le savoir, nous sommes tous devenus des acteurs de la crise de l'eau, plus que nous ne l'imaginons.

Pour résoudre les problèmes, la première étape consiste à changer de point de vue, à développer une vision plus globale des problèmes, à comprendre leurs interactions. C'est ce à quoi nous allons nous attacher dans les pages qui suivent. De manière surprenante, cette évolution de la pensée doit d'abord gagner la communauté des experts de l'eau. Car c'est elle qui a des difficultés à sortir des schémas classiques qu'elle a développés, dans lesquels l'eau est une ressource essentiellement locale.

Les éléments d'une conception élargie et nouvelle de l'eau sont aujourd'hui disponibles, sans doute encore à l'état embryonnaire, mais suffisamment élaborés pour montrer la voie à suivre. Ils se fondent sur un réexamen et une redéfinition de termes aussi fondamentaux que ceux de « ressources » ou d'« usages ». De quelles quantités d'eau les hommes disposent-ils pour assurer leurs modes de vie ? Que signifie exactement « utiliser l'eau » quand cette dernière n'arrête pas de circuler sous forme liquide ou gazeuse, même après utilisation ? Et comment comptabiliser de manière cohérente des usages aussi différents que celui d'une turbine hydroélectrique qui relâche une eau de rivière brute, sans la transformer, celui d'un champ cultivé qui évapore tout ou presque de l'eau de pluie ou d'irrigation qu'il reçoit, ou celui d'une personne se brossant les dents qui rejette une eau potabilisée au préalable sous forme dégradée ? Tant que l'eau paraissait suffire largement à nos besoins, ces questions pouvaient sembler théoriques, voire incongrues. Mais pour peu que la rareté s'installe, elles gagnent en pertinence. Si l'on poursuit le raisonnement, on peut noter que le premier objectif d'une nouvelle comptabilité doit être de préciser comment chaque usage affecte la disponibilité ou la qualité de l'eau des autres utilisateurs et de bien tenir compte des différents types d'eau utilisés. Il faut ensuite pouvoir identifier les usages générateurs de tensions et les possibilités d'économies. Finalement, pour choisir comment et à qui allouer quel type d'eau, il faut pouvoir comparer la productivité de l'eau des différents usages en ne se limitant pas à la seule

1. Source : International Telecommunication Union. Voir <http://mobithinking.com/mobile-marketing-tools/latest-mobile-stats/a#subscribers>

2. Voir à ce sujet l'article de Francis Pisani, « Le portable révolutionne l'Afrique », *Le Monde*, 18 août 2013.

productivité économique, mais en intégrant également des productivités sociales et environnementales.

Ce livre ne prétend pas apporter une solution toute faite pour résoudre les problèmes, mais plutôt éclairer la logique et les enjeux sous-jacents aux différentes questions évoquées ci-dessus. Il souhaite aussi démontrer que le cheminement vers une telle vision élargie passe par la notion d'« empreinte eau », apparue dans la dernière décennie et à la base de plusieurs méthodes de quantification des usages de l'eau. L'empreinte eau n'a rien d'une « notion magique », elle n'est que le témoin des tentatives de différents groupes humains de jeter un nouveau regard sur la crise de l'eau afin d'y apporter de nouvelles solutions. Cet ouvrage est une contribution aux objectifs de la septième phase du Programme hydrologique international de l'UNESCO (PHI-VII, 2008-2013), intitulée « Systèmes en situation de stress et réponses de la société ».

Reconsidérer les ressources et les usages de l'eau constitue la trame de la première partie qui débouche sur un constat pour le moins surprenant : nous n'avons qu'une connaissance très approximative de l'eau disponible pour nos usages, et les évaluations de ces usages sont imprécises, incomplètes, ne rendant compte correctement ni des tensions ni des pénuries qui nous menacent.

La deuxième partie introduit les notions d'eau virtuelle et d'empreinte eau et les logiques dans lesquelles elles se sont développées jusqu'ici. Cette partie ne constitue en rien un manuel pratique, mais plutôt une revue des approches génériques ainsi que des difficultés théoriques et pratiques des méthodes mises en œuvre.

Enfin, la troisième partie illustre les nouvelles démarches mises en place et propose des recommandations pour l'action. La surprise vient ici du fait que l'innovation se développe souvent en marge, voire en dehors, de la communauté de l'eau. Ce sont d'autres acteurs, utilisateurs d'eau et consommateurs, qui sont les forces motrices des changements et qui développent des approches et des outils nouveaux pour concrétiser ce que la Vision mondiale de l'eau au XXI^e siècle proposait dès 2000 : « faire de l'eau l'affaire de tous³ ».

3. W. J. Cosgrove et F. R. Rijsberman, *World Water Vision: Making Water Everybody's Business*, World Water Council, Earthscan, Londres, 2000.

PREMIÈRE PARTIE
RESSOURCES ET USAGES
DE L'EAU

I. LES RESSOURCES EN EAU SUR LA PLANÈTE : QUELQUES NOTIONS À REDÉFINIR

L'eau, source de vie sur notre planète, est un fluide insaisissable. Entraînées dans un mouvement sans fin grâce à l'énergie du soleil, les molécules d'eau ne se perdent pas, ne se détruisent pas lorsque nous les utilisons, contrairement à de nombreuses matières comme le pétrole ou le gaz. Elles poursuivent simplement leur route en rejoignant les cours d'eau sous une forme dite « usée », ou l'atmosphère sous forme de vapeur. Comment, dès lors, en estimer les quantités disponibles pour les hommes ? Pouvons-nous détourner de leur cycle autant de molécules que nous le souhaitons ? Où se trouve la limite ? Ces questions qui paraissaient incongrues il y a quelques décennies reviennent régulièrement dans l'actualité. D'un monde où l'eau nous paraissait abondante, nous sommes passés à un monde de ressources limitées.

Le terme « ressource » implique l'accessibilité, la possibilité de se servir autant que de besoin. Mais pourquoi est-il utilisé pour l'eau et pas pour l'air ? Nous avons besoin d'air tout autant que d'eau pour vivre, et pourtant l'air ne fait pas débat, du moins pas de la même manière que l'eau. Une des raisons est que l'eau est mal répartie sur notre planète. Plus de 99 % se trouve en effet dans les océans, les calottes polaires, les grandes nappes souterraines et le manteau terrestre¹. Sur les continents, la richesse en eau est aussi très inégale, déterminée en grande partie par le climat qui en fixe les règles de distribution. Les phénomènes météorologiques, sous l'influence de

1. On trouve dans le manteau de la Terre (couche intermédiaire entre le noyau planétaire et la surface de la Terre) des quantités énormes d'eau, de l'ordre de deux ou trois fois les quantités présentes dans les océans. Environ 27 km³ par an seraient échangés entre la croûte et le manteau (source : *de Marsily*, voir note suivante).

l'énergie solaire, fournissent le moteur du cycle de l'eau, de sa circulation entre les océans et les continents.

Or la vie humaine nécessite des quantités et une qualité d'eau assez précises et ne peut notamment s'accommoder d'eau salée. La notion de ressource en eau trouve son origine dans des besoins étroitement définis et dans l'inégale répartition géographique de l'eau. Depuis les origines, les hommes ont cherché à s'installer à proximité d'une eau facile à utiliser, liquide, douce, tout en évitant d'être submergés par les inondations. L'eau-ressource n'est pas toute l'eau de la planète, mais l'eau liquide que les hommes peuvent utiliser et qu'ils doivent quelquefois accaparer au détriment d'autres hommes. Cette eau-ressource dépend des capacités techniques des hommes de la mobiliser pour se l'approprier. Si demain il devenait très simple d'utiliser l'eau de l'océan ou l'eau de l'atmosphère, les ressources à notre disposition en seraient considérablement augmentées. Une autre conséquence sur laquelle nous reviendrons est que l'eau de pluie n'est considérée comme une ressource qu'une fois captée et stockée. L'eau de pluie qui abreuve les cultures n'est donc classiquement pas comptabilisée comme une ressource en eau.

LA VARIABILITÉ DE L'EAU, SOURCE DES DIFFICULTÉS

L'hétérogénéité de la répartition de l'eau, tant dans le temps que dans l'espace, est un élément essentiel de la crise actuelle. Elle est due aux phénomènes météorologiques et aux variations climatiques et non à une diminution de la quantité d'eau sur notre planète. L'heure n'est plus à des apports importants via les comètes chargées de glace dont on pense qu'ils pourraient être à l'origine de la vie. Quelques molécules s'échappent bien de notre atmosphère vers l'espace intersidéral, mais globalement la quantité d'eau, et notamment d'eau douce, est stable. L'eau circule cependant entre tous les réservoirs de la planète, et ce, à des vitesses très variables. Ces dernières sont estimées comme des temps de résidence moyens, obtenus en rapportant les stocks d'eau contenus dans ces réservoirs aux flux annuels moyens entre eux. Par exemple, une molécule d'eau ne reste en moyenne dans l'atmosphère que 9,5 jours ; dans

les fleuves et les rivières, 17 jours ; dans les eaux souterraines, de quelques mois à quelques milliers d'années avec une moyenne de 1 500 ans ; dans l'océan, environ 3 000 ans.

Volumes et flux d'eau dans les principaux réservoirs terrestres

MILIEUX	VOLUMES (KM ³)	% DU VOLUME TOTAL	FLUX ANNUEL MOYEN (KM ³ /AN)	TEMPS DE RÉSIDENCE MOYEN*
Océans	1 335 millions	96,7	413 000	3 000 ans
Mers intérieures	0, 1 million	0,0076	inconnu	inconnu
Glaces Antarctique Groenland Montagnes Permafrost (x)	25 millions 3 millions 80 000 à 200 000 22 000	2,18	2 600 600 680 0	10 000 ans 5 000 ans 100 à 300 ans
Eaux souterraines	15 millions	1,1	10 000	1 500 ans
Eau de tous les lacs d'eau douce	176 000	0,013	5 900	30 ans
Eau des rivières	1 700	0,00012	36 800	17 jours
Eau des sols	122 000	0,0088	70 000	1,8 an
Eau de l'atmosphère	12 700	0,00092	486 000	9,5 jours
Eau des cellules vivantes	1 100	0,00008		quelques heures
Total	1 380 millions	≈ 100		

* Le temps de résidence moyen est le quotient du volume et du flux annuel moyen.

Source : G. de Marsily, *L'Eau, un trésor en partage*, Dunod, 2009.

Le cycle de l'eau auquel on se réfère classiquement est un zoom sur un de ces flux, celui qui, de l'océan aux sols et rivières en passant par l'atmosphère, reconstitue régulièrement l'eau essentielle pour notre vie quotidienne. Il ne tient pas compte des circulations de plus longue durée comme celles qui se produisent dans les nappes souterraines ou les glaces. Les quantités d'eau mises en jeu sont évaluées pour une année entière afin de couvrir un cycle entier de saisons.

Le cycle de l'eau est relativement stable : les quantités d'eau totales qui circulent sur tous nos continents au cours d'une année sont peu variables en moyenne. Bien sûr, comme nous l'expérimentons régulièrement, la variabilité locale de ces circulations peut être très grande. Nous ne risquons pas de manquer d'eau douce du fait d'un changement du cycle de l'eau. Si l'on exclut les manifestations, probables, du changement climatique, la seule raison de l'apparente raréfaction des ressources est en réalité l'intensification de la compétition pour l'eau douce disponible, due à la fois à l'augmentation de la population et à celle de la consommation d'eau pour nos activités. Ce ne sont pas nos ressources totales qui diminuent, mais bien le ratio des ressources par habitant.

Observons aussi que le réchauffement du climat accroît la teneur en eau de l'atmosphère, ce qui augmente d'autant l'effet de serre. Il accentue aussi l'hétérogénéité du climat : les régions arides ont tendance à le devenir davantage, et les régions humides à être plus arrosées².

LA DÉFINITION CLASSIQUE DES RESSOURCES EN EAU

La définition des ressources en eau telle qu'elle est présentée dans l'ensemble des ouvrages spécialisés peut maintenant être précisée. Ces ressources sont les quantités d'eau douce que l'homme pourrait en théorie puiser dans des rivières ou dans des nappes souterraines. Elles sont dites « renouvelables » lorsqu'elles sont mises en circulation dans le cycle annuel océan-continent. Ainsi, pour une nappe souterraine, seule la part de l'eau qui la recharge annuellement est une ressource renouvelable. L'eau stockée dans les glaciers n'est, pour l'essentiel, pas une ressource renouvelable.

Pour avoir une idée de la quantité de ressources en eau douce, il faut évaluer l'évaporation et les précipitations³ des océans et des continents sur l'ensemble de la planète et sur une année. La grandeur utilisée couramment est le kilomètre cube, soit le contenu

d'un cube d'un kilomètre de côté. Un kilomètre cube, c'est aussi 1 milliard de mètres cubes, ou encore l'équivalent de 500 000 piscines olympiques.

Globalement, comme on peut s'y attendre, c'est au-dessus des océans que les échanges d'eau sont les plus importants. 413 000 km³ s'en évaporent et 373 000 km³ y tombent sous forme de précipitations chaque année. Sur les continents, 73 000 km³ s'évaporent et 113 000 km³ tombent sous forme de précipitations. Sur les océans, il y a donc un surplus de 40 000 km³ d'évaporation qui est compensé par un surplus de précipitations d'un montant égal sur les continents⁴, lequel retourne vers les océans par les rivières et pour une partie par des circulations souterraines. Le cycle est « bouclé » et l'analyse conduit à la valeur maximale des ressources en eau douce renouvelables qui est donc de 40 000 km³.

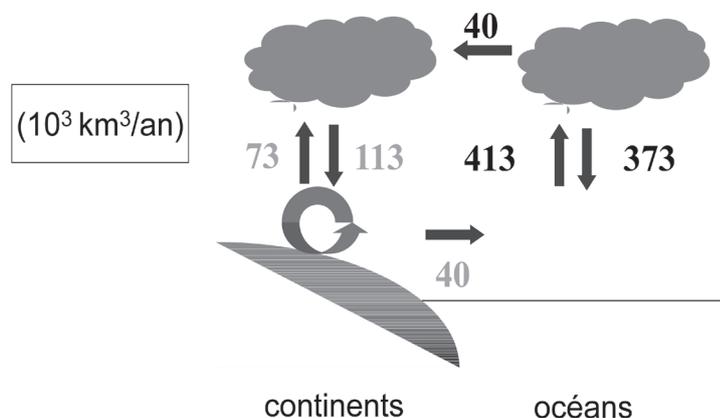
Il faut ajouter à ces écoulements ceux des cours d'eau qui, dans des régions arides ou continentales, n'atteignent pas l'océan. Ces cours d'eau se jettent dans des lacs ou des mers intérieures (comme par exemple la mer d'Aral en Ouzbékistan). Les volumes d'eau s'écoulant dans ces bassins dits « endoréiques » sont estimés à environ 1 000 km³⁵.

2. G. de Marsily (dir.), *Les Eaux continentales*, rapport RST n° 25, Académie des sciences, Éditions EDP Sciences, 2006.

3. Le terme de « précipitations » recouvre à la fois la pluie, la neige et la grêle.

4. Le raisonnement est ici simplifié car ce qui se mesure le plus facilement, ce sont les débits des cours d'eau, sur lesquels on se fonde pour évaluer l'évaporation, difficile à estimer à l'échelle d'un pays ou d'un continent.

5. P. H. Gleick (dir.), *Water in crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*, Oxford University Press, Oxford, 1993.

Le cycle de l'eau vu sous l'angle d'un échange entre océans et continents⁶

© D. Zimmer.

Ces chiffres démontrent incidemment l'existence d'un phénomène de « recyclage » de l'eau sur les continents (ou recyclage continental). Si ces derniers étaient arrosés par la seule eau des océans, les précipitations y seraient limitées à 40 000 km³. Une partie importante de l'eau évaporée sur les continents y précipite donc à nouveau. Nous reviendrons sur ce point.

Ce cycle de l'eau douce a conduit M. Falkenmark⁷ à distinguer deux sortes d'eau douce renouvelables, nommées « eau bleue » et « eau verte ». La pluie qui alimente les sols puis est évaporée par la végétation ou directement par les sols est l'eau verte. Son volume annuel est de 73 000 km³. L'eau qui s'écoule vers les rivières ou les nappes souterraines avant de rejoindre l'océan ou la mer est l'eau bleue. Son volume annuel est de 40 000 km³. Elle peut être pom-

pée, canalisée, transportée : c'est elle qui est comptabilisée classiquement dans les « ressources en eau ». Toutefois, ce volume n'est pas entièrement accessible aux hommes. Une large part s'écoule en effet soit vers les océans en des régions inhabitées, soit lors de crues importantes qu'aucun réservoir ne peut stocker. Il est très difficile d'estimer ces quantités « non accessibles » car les critères de calcul ne peuvent être qu'approximatifs, voire subjectifs. Aussi les chiffres fréquemment utilisés sont-ils fondés sur un simple bilan entre les précipitations et l'évaporation annuelle, car ces chiffres peuvent être calculés sans trop de difficultés. Tel est par exemple le cas des données nationales développées par la FAO⁸ et reprises dans de nombreux rapports.

LES RESSOURCES RENOUVELABLES PAR CONTINENT

À l'échelle continentale, l'hétérogénéité des dotations est très nette. L'Amérique latine et l'Asie sont les mieux dotées, avec plus de la moitié des ressources renouvelables théoriques de la planète pour un tiers de la superficie des continents. A contrario, l'Afrique, l'Europe de l'Est et l'Asie centrale sont très peu dotées et combinent 20 % des ressources sur 43 % de la superficie. La zone tempérée où se situe l'essentiel des pays de l'OCDE se trouve dans une situation intermédiaire.

6. Les valeurs sont celles de K. E. Trenberth, L. Smith, T. Qian, A. Dai et J. Fasullo, "Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data", *Journal of Meteorology*, vol. 8, 2007.

7. Voir M. Falkenmark et J. Rockström, *Balancing Water for Humans and Nature*, Earthscan, Londres, 2004. Le concept a été introduit dès 1995.

8. Voir la base de données Aquastat : <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html>

Précipitations et ressources en eaux continentales (moyennes de la période 1950-1996)

	ASIE	EUROPE DE L'EST ET ASIE CENTRALE	AMÉRIQUE LATINE	MOYEN-ORIENT ET AFRIQUE DU NORD	AFRIQUE SUB-SAHARIENNE	OCDE	MONDE
Superficies (millions de km ²)	20,9	21,9	20,7	11,8	24,3	33,8	133,4
Précipitations totales (milliers de km ³) (a)	21,6	9,2	30,6	1,8	19,9	22,4	105,5
Évaporation (milliers de km ³) (b)	11,9	2,5	8,3	1,5	15,5	14,3	54
Ressources en eau renouvelables totales (milliers de km ³) (a) - (b)	9,8	4,0	13,2	0,25	4,4	8,1	39,7
Ressources en eau renouvelables accessibles (milliers de km ³)	9,3	1,8	8,7	0,24	4,1	5,6	29,7
Fraction des ressources accessibles (%)	95	45	66	96	93	69	75

Source: Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau, *Water in a Changing World*, Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau, Unesco, Paris, Earthscan, Londres, 2009.

Comment tenir compte de l'accessibilité de ces quantités d'eau pour préciser les ressources? Le Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau (WWAP) retient une proportion de 75 % du total de 40 000 km³, soit un total de 29 700 km³, sans expliquer de manière précise comment ce résultat est obtenu. Ce ratio varie suivant les continents entre 45 % et 96 % en fonction d'au moins deux facteurs. Le niveau d'aridité tout d'abord, car il est plus facile de mobiliser des ressources peu abondantes. La densité

de population ensuite, car une forte population bien répartie dans l'espace, comme par exemple en Asie, conduit à une plus grande accessibilité des ressources. Il est intéressant de noter à ce propos que les cartes mondiales des densités de population et des disponibilités en eau présentent de forts contrastes. Les densités de population les plus faibles s'observent dans les régions où les ressources sont les plus abondantes, c'est-à-dire les grandes forêts de la planète (Amazonie, Sibérie ou Afrique centrale). Ailleurs, les densités de population sont plus conformes à la logique: les déserts et zones sèches ont de très faibles densités de population, les régions bien arrosées mais non couvertes de forêts combinent de fortes densités de population avec de grandes disponibilités en eau.

L'accessibilité de l'eau n'est toutefois pas le seul élément à prendre en compte. Il faut aussi se demander combien les hommes peuvent prélever de ces « ressources » sans mettre en péril les écosystèmes aquatiques des milieux fluviaux et côtiers⁹. Cette question fondamentale a donné lieu, ces deux dernières décennies, à un abondant travail visant à évaluer les « flux environnementaux » nécessaires, autrement dit les flux d'eau minimaux à préserver pour maintenir les écosystèmes en bon état de fonctionnement¹⁰. Cette approche écosystémique a en elle-même profondément modifié les réflexions et les pratiques de gestion de l'eau¹¹. Car préserver les ressources en qualité et quantité, c'est avant tout s'assurer que les écosystèmes, à travers lesquels l'eau circule, fournissent leurs services pour filtrer, purifier l'eau des polluants qu'on y déverse et aussi pour réguler les débits. Une des conclusions essentielles de ces travaux est qu'il faut pour cela non seulement maintenir un minimum d'eau dans les cours d'eau lors des périodes d'étiage, mais aussi reproduire ou maintenir la variabilité naturelle des débits, ce que les spécialistes appellent le « régime » du cours d'eau.

9. Un rapport du Water Resources Group (*Charting our Water Future*, 2010) retient ainsi, en tenant compte de l'accessibilité et des besoins environnementaux, une valeur totale des ressources en eau bleue de 4 200 km³ par an.

10. Voir le site www.eFlow.net.org

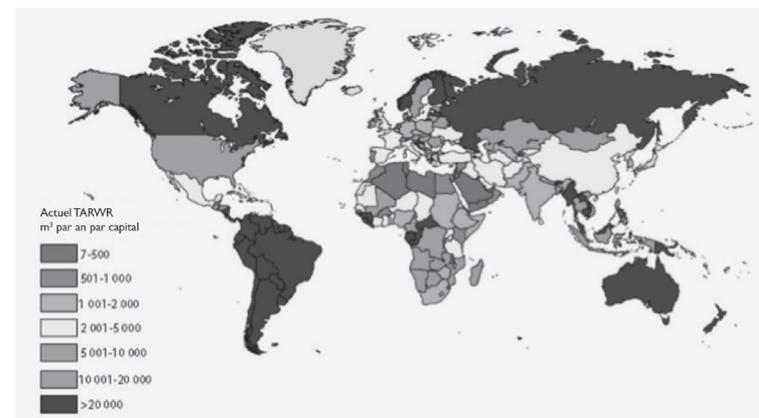
11. Voir à ce propos *GWSP Digital Water Atlas* (2008), carte 71 : "Environmental Water Requirements" (V1.0), <http://atlas.gwsp.org>, qui montre que de 20 à 40 % des écoulements devraient être maintenus.

Toutefois, opposer les écosystèmes aux hommes est dangereux et simpliste. En fait, ces questions sont de plus en plus abordées sous l'angle des bénéfices des flux environnementaux pour les humains. Ainsi, quand le fleuve Jaune s'est progressivement asséché pendant la plus grande partie de l'année et sur plusieurs centaines de kilomètres depuis son embouchure dans les années 1990, c'est la chute de la production ostréicole et conchylicole de la zone côtière fertilisée par les limons du fleuve qui a en premier lieu motivé les gestionnaires du fleuve à réduire les prélèvements et à maintenir un débit environnemental. Cette production est en effet essentielle pour les consommateurs de la Chine de l'Est. De manière générale, la diminution des débits des fleuves a des répercussions sur les pollutions et les coûts de traitement de l'eau, et réduit les capacités de production d'énergie ou de poissons. D'environnemental, le problème devient rapidement économique car l'homme a tendance à se plaindre plus rapidement que les poissons ou les autres espèces aquatiques...

Ainsi, la question des ressources en eau disponibles pour les usages humains et, en contrepoint, celle des quantités nécessaires au maintien des écosystèmes se sont-elles progressivement transformées en un débat sur la valeur des services fournis par les écosystèmes, débat devant servir à mieux arbitrer les allocations entre les différents usages au service des hommes. Cette approche a sans doute le mérite de donner des arguments à la nature et à ses aménités. Elle n'en trouve pas moins ses limites dans sa capacité à donner une valeur et à intégrer dans les raisonnements les nombreuses fonctions (gibier, abris, qualité des paysages, stockage de carbone...) des écosystèmes qui devraient théoriquement être prises en compte. La conclusion est qu'aujourd'hui il reste impossible de donner une estimation des véritables quantités d'eau renouvelables accessibles aux activités humaines.

Les ordres de grandeur des ressources totales annuelles par habitant varient dans des proportions importantes, de 1 à 40. Les régions les mieux dotées, avec plus de 10 000 m³ par habitant par an, sont les Amériques, l'Afrique centrale, l'Europe du Nord, l'Asie du Sud-Est et l'Australie. À l'opposé, on trouve l'Afrique du Nord et la péninsule Arabique. Les fortes densités de population en Inde et en Chine réduisent drastiquement la disponibilité par habitant.

Évolution et variabilité du cycle hydrologique : les régions arides doublement désavantagées



Source : FAO AQUASTAT database (<http://.fao.org/nr/aquastst>, accessed in 2011).

La variabilité de l'eau n'est pas que géographique, elle est aussi temporelle. À l'échelle mondiale, le cycle hydrologique varie assez peu : les ressources maximales peuvent osciller entre 38 600 et 42 600 km³ selon le WWAP, soit une variabilité de l'ordre de 5 %. En revanche, au niveau plus local, la variabilité est très grande, et elle augmente de surcroît dans les milieux arides. Dans la plupart des régions moyennement ou peu arrosées, l'écart entre le débit moyen annuel et le débit le plus faible atteint 90 % une année sur dix. Ce n'est pas le cas dans toutes les régions humides précédemment mentionnées, où ce même écart est souvent inférieur à 25 %. Cette variabilité accrue se double d'une évolution déjà perceptible liée au changement climatique : les régions les plus sèches deviennent encore plus sèches, les régions les plus humides deviennent encore plus humides¹². Cette tendance est déjà observée sur les continents, et seule l'Amérique du Sud échappe à la règle puisqu'elle devrait plutôt voir ses ressources en eau décroître dans les années à venir.

12. G. de Marsily (dir.), *Les Eaux continentales*, op. cit.

Quant à la France, elle se trouve précisément à la frontière entre régions sèches et régions humides, ce qui rend les prédictions difficiles. Les océans aussi témoignent de ces évolutions du cycle de l'eau à travers leur salinité. Ainsi, la salinité des zones de l'océan où l'eau de surface est la moins salée devrait encore diminuer, et celle des régions de plus forte salinité devrait encore augmenter.

Évolution des précipitations entre la seconde moitié du xx^e siècle et l'année 2050

ZONE GÉOGRAPHIQUE	PÉRIODE DÉCEMBRE À MARS	PÉRIODE JUIN À SEPTEMBRE
Afrique équatoriale	+ 25 %	+ 10 %
Sahel africain	Incertain, +/- 10 %	+ 30 %
Afrique du Nord	- 15 %	- 10 %
Europe du Sud	Incertain, +/-10 %	- 20 %
France	+ 15 %	Incertain, +/- 10 %
Europe du Nord	+ 25 %	+ 15 %
Amérique du Nord	+ 20 %	+/- 10 %
Amérique du Sud	- 10 %	- 20 %
Australie	- 20 %	- 30 %

Source : G. de Marsily, *L'Eau, un trésor en partage*, op. cit.

LE RECYCLAGE CONTINENTAL

La difficulté d'estimation des ressources se heurte aussi au recyclage perpétuel de l'eau : quoi qu'on fasse, où que l'on prélève, une molécule d'eau n'est jamais perdue. Même si l'homme prélevait toute l'eau disponible pour ses usages, la perturbation ne serait que temporaire ou localisée, du moins tant que les grands écosystèmes terrestres demeurent fonctionnels et continuent d'assurer le *recyclage continental* qui, comme nous l'avons vu, fait passer de 40 000 km³ à 113 000 km³ les précipitations sur les continents.

Comment et où ce recyclage continental se produit-il ? Les activités humaines comme la déforestation ou l'irrigation peuvent-elles le modifier ? Jusqu'à récemment, nous ne disposons que de très peu

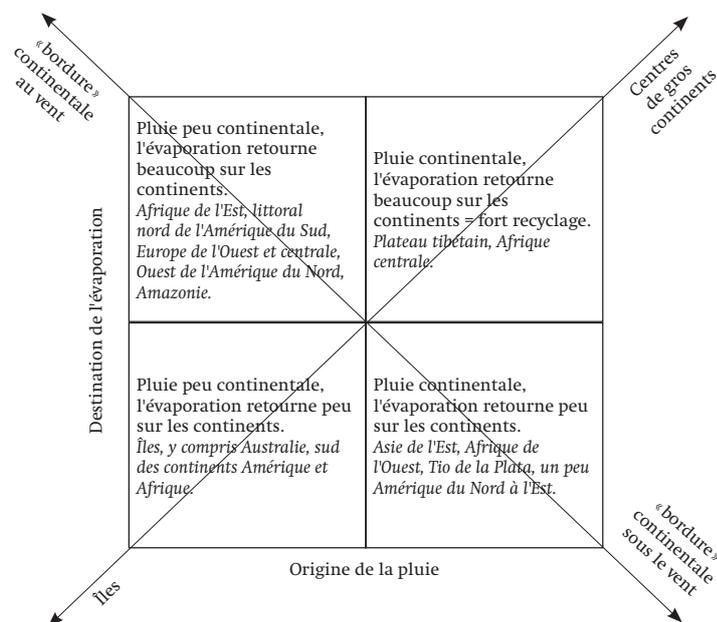
d'informations à ce propos. Les outils et les données n'étaient pas disponibles, et la communauté des hydrologues s'y était peu intéressée. Mais le changement climatique et le développement d'outils de mesure et de simulation à l'échelle planétaire ont modifié la donne et permettent d'améliorer notre compréhension du phénomène¹³. Alors, que sait-on aujourd'hui ?

Le phénomène de recyclage continental se produit dans la direction des vents dominants. Par exemple, lorsqu'une région est côtière et exposée à des vents en provenance de l'océan, une grande part de la pluie, d'origine océanique, s'évapore et reprecipite plus à l'est dans l'intérieur du continent. Dans l'hémisphère Nord où les vents dominants sont orientés d'ouest en est, le recyclage se produit donc selon cette même direction ; en revanche, dans la zone inter-tropicale africaine, il se propage d'est en ouest, dans la direction principale des alizés. Dans les tropiques d'Amérique du Sud, il se produit du nord-est vers le sud-ouest.

On peut schématiquement distinguer quatre situations : des régions largement sous l'influence des océans (îles, sud des continents africain et américain, Océanie) où le recyclage continental est peu important ; des régions proches des océans et situées au vent (Europe de l'Ouest, Afrique de l'Est, nord-est du Brésil), où les précipitations proviennent essentiellement de l'océan et l'évaporation est ensuite recyclée sur le continent ; des régions proches des océans mais situées « sous le vent » (Asie de l'Est, Afrique de l'Ouest, sud du Brésil et nord de l'Argentine), où les précipitations dépendent fortement de l'évaporation des terres situées à l'amont par rapport au vent ; enfin, des régions situées au centre des grands continents, et notamment de l'Afrique et de l'Asie, où se produit un recyclage local à la fois de l'évaporation et des précipitations.

13. R. Van der Ent, H. Savenije, B. Schaeffli, S. Steele-Dunne, "Origin and fate of atmospheric moisture over continents", *Water Resources Research*, 2010.

Mécanismes et zonage du recyclage continental



© D. Zimmer.

Plusieurs grandes régions ont donc des ressources en eau fortement dépendantes du recyclage continental. Il s'agit tout particulièrement de l'Asie de l'Est, de l'Afrique de l'Ouest, du sud du Brésil et du nord de l'Argentine, dont les ressources dépendent respectivement de l'évaporation de l'Europe, de l'Afrique de l'Est et de la côte nord-est et de l'Amazonie au Brésil. L'importance de ce recyclage a aussi été précisée en comparant les volumes d'eau totaux arrivant de l'océan aux volumes des précipitations. Le facteur multiplicateur des précipitations varie entre 1,25 pour l'Océanie et 1,95 pour l'Afrique, où les précipitations sont donc quasiment doublées grâce au recyclage. L'Asie est proche de l'Afrique, les autres continents ont des facteurs multiplicateurs intermédiaires et similaires à la valeur moyenne mondiale de 1,67.

Facteurs multiplicateurs des précipitations liés au recyclage continental

CONTINENT	FACTEUR MULTIPLICATEUR DES PRÉCIPITATIONS
Amérique du Nord	1,45
Amérique du Sud	1,65
Afrique	1,95
Europe	1,53
Asie	1,91
Océanie	1,25
Tous continents	1,67

Source : R. Van der Ent et al., *op. cit.*, 2010.

La connaissance des mécanismes continentaux du cycle de l'eau en est à ses débuts. Elle permet de situer des couples critiques de régions interdépendantes. L'évaporation de la forêt amazonienne est par exemple essentielle pour les ressources en eau du bassin de la Plata dans le sud du Brésil. Les précipitations du Sahel en Afrique dépendent, elles, de l'évaporation des pays situés plus à l'est.

◆ ◆ ◆

Les ressources en eau renouvelables, c'est-à-dire les quantités d'eau dont l'homme peut disposer pour ses usages de manière durable, ne sont pas connues avec précision. On sait combien d'eau bleue est mise en circulation dans le cycle hydrologique annuel, de l'ordre de 40 000 km³, ce qui fournit une valeur maximale de ces ressources. Mais cette limite ne correspond ni à ce qui peut être physiquement utilisé, de 50 % à 95 % du total selon les continents, ni à ce qui peut être prélevé sans dommages sérieux pour les écosystèmes de la planète. Selon les dernières estimations disponibles c'est de 20 % à 40 % des écoulements qu'il faut préserver pour éviter des dégradations irréversibles.

À l'échelle mondiale, le cycle annuel de l'eau est peu variable. Les ressources théoriques maximales renouvelables en eau sont

quasi constantes. S'il y a pénurie d'eau, c'est d'abord parce que les prélèvements d'eau augmentent et non parce qu'il y a moins d'eau.

À l'échelle locale, la variabilité tant spatiale que temporelle de l'eau disponible est considérable. Les régions arides sont, à ce titre, triplement défavorisées. En premier lieu par la faiblesse des ressources en eau. Ensuite, parce que la variabilité temporelle des ressources y est la plus grande. Enfin, parce que le changement climatique accentue encore ces tendances.

Par ailleurs, la définition classique des ressources en eau n'inclut pas toute l'eau que l'homme utilise. Elle ne comprend que l'eau bleue, soit l'eau liquide douce et renouvelable des nappes souterraines, des lacs et des rivières qu'on peut prélever. Une part importante de l'eau que nous utilisons, et tout particulièrement l'eau verte stockée dans les sols, n'est pas intégrée dans les ressources en eau.

Retenons enfin que les pressions exercées par les hommes sur l'eau et les écosystèmes de la planète altèrent progressivement le cycle hydrologique global. Si les conséquences régionales commencent à être prévisibles, il reste difficile de pronostiquer les conséquences globales, en particulier sur la redistribution régionale et le recyclage continental de l'eau.

II. L'APPROCHE CLASSIQUE DES USAGES DE L'EAU : EXCÈS DE PRÉLÈVEMENTS ET PÉNURIES

Sans surprise, l'analyse classique des usages de l'eau suit une approche similaire à celle des ressources en eau : elle s'attache d'abord à comprendre combien d'eau bleue des nappes souterraines, des rivières et des lacs d'eau douce est utilisée. Quels sont aujourd'hui ces usages traditionnels de l'eau et quelles quantités d'eau mobilisent-ils ?

Pour commencer, il faut nous interroger : que signifie exactement « utiliser » l'eau, sachant que les molécules d'eau, intactes après usage, reprennent leur course dans le cycle hydrologique. Les usages ne sont en fait pas tous équivalents. Lorsque l'eau s'évapore après usage, on dit qu'elle est consommée. Dans le cas contraire, elle est simplement prélevée, puis rejetée dans le milieu naturel à l'état liquide, généralement avec une qualité dégradée. Cette dichotomie, source de nombreuses confusions, est importante. L'eau consommée est perdue localement, mais rejoint le cycle atmosphérique de l'eau. L'eau prélevée puis rejetée à l'état liquide reste disponible pour d'autres usages. Prenons quelques exemples.

Dans le cas de l'eau potable, l'eau est très peu consommée. Après prélèvement dans une rivière ou une nappe souterraine, l'eau est traitée, distribuée, puis utilisée avant d'être collectée pour traitement et rejet. Seuls quelques pourcents s'évaporent. L'impact de cet usage vient de la qualité amoindrie des rejets dans le cours d'eau récepteur. Il est réduit, sans être toutefois supprimé, lorsqu'un traitement est opéré au préalable par une station d'épuration. En effet, un tel traitement ne restitue pas au milieu une eau exempte de substances polluantes car certaines molécules passent au travers. Par ailleurs, à l'échelle mondiale, l'épuration des eaux usées reste

aujourd'hui l'exception et manque cruellement dans les pays émergents et en voie de développement. De nombreuses industries ont un usage du même type avec peu de consommation et des impacts dus à des rejets d'eau dégradée.

La situation est plus complexe pour produire de l'énergie. Pour l'hydroélectricité associée à un barrage, l'eau est stockée puis relâchée pour générer de l'électricité, ce qui modifie la périodicité et l'intensité des écoulements, ainsi que la qualité de l'eau car de nombreuses particules sont piégées par le barrage. D'autre part, le stockage de l'eau s'accompagne d'une évaporation d'eau accrue qui consomme de l'eau. Dans une centrale électrique nucléaire ou thermique classique, l'eau est utilisée à la fois pour la production de l'électricité et pour le refroidissement de la vapeur. Une partie s'évapore et elle est consommée lors du refroidissement. Une autre partie est rejetée à une température relativement chaude, ce qui perturbe les écosystèmes des fleuves.

Les activités agricoles utilisent de l'eau bleue pour l'irrigation, avec pour objectif d'en évaporer l'essentiel. Toutefois, une partie de l'eau finit par se perdre et rejoint des nappes ou des rivières, transportant avec elle des résidus de produits phytosanitaires, d'engrais et, dans les régions arides, des sels minéraux.

Ces différents usages ne peuvent donc s'appréhender de la même manière. Le long d'un fleuve de l'amont à l'aval, la même ressource peut par exemple être utilisée et réutilisée plusieurs fois. Dans le cas du Nil, on estime que le long de son parcours en Égypte, l'eau est utilisée cinq à six fois. Il est donc possible d'utiliser davantage d'eau que ce que les ressources fournissent, tant qu'elle ne s'évapore pas ! Ce point est très important lorsqu'on compare les ressources et les usages.

Par ailleurs, les notions, souvent débattues, de pertes et d'efficacité des différents usages doivent être maniées avec précaution. Ainsi, lorsque l'irrigation est efficace, presque toute l'eau est évaporée par les cultures et donc perdue pour la ressource en eau. En revanche, dans un réseau d'eau potable, l'efficacité s'évalue en fonction des fuites dans les tuyaux. Ces dernières se traduisent par un gaspillage d'eau qui alimente généralement les eaux souterraines. Mais en règle générale, les quantités perdues sont faibles et l'impact sur la ressource en eau est négligeable, contrairement

à celui sur l'énergie et les produits nécessaires au transport et au traitement de l'eau. Il faut aussi se méfier de la notion d'efficacité hydraulique qui néglige les possibilités de réutilisation de l'eau perdue. Il convient enfin de se souvenir que la qualité de l'eau diffère selon les usages. Les gros utilisateurs d'eau que sont les secteurs de l'énergie et de l'agriculture prélèvent de l'eau brute non potabilisée, contrairement aux municipalités et à de nombreux industriels. Or les pertes d'eau brute n'ont pas du tout le même impact économique et environnemental que celles d'eau potable où d'autres ressources sont perdues en plus de l'eau.

LA VISION CLASSIQUE DES USAGES

La manière traditionnelle de comptabiliser les usages de l'eau repose sur une estimation des prélèvements¹⁴ d'eau bleue. On distingue trois grandes catégories d'usages : l'industrie, l'agriculture et les municipalités. Chacune de ces catégories représente dans les faits une agrégation d'usages différents. Ainsi, les prélèvements municipaux regroupent les usages domestiques pour les divers besoins sanitaires, de boisson ou de préparation de nourriture et les usages urbains tels que l'arrosage des parcs ou le nettoyage des rues. Les prélèvements industriels incluent les prélèvements d'eau pour l'industrie manufacturière et ceux du secteur de l'énergie. Les prélèvements pour l'agriculture sont ceux de l'irrigation. Ils sont limités à ce qui est mesurable et ne prennent pas en compte l'eau pompée des nombreux puits individuels qui ont fleuri à travers le monde depuis les années 1980.

À l'aube du xx^e siècle, la planète comptait 2 milliards d'hommes, et les prélèvements totaux annuels étaient estimés à 600 milliards de mètres cubes. En 2000, avec une population de 6 milliards, ils étaient de 3 800 milliards de mètres cubes, soit l'équivalent de 2 milliards de piscines olympiques. En un siècle, les prélèvements ont donc été multipliés par six alors que la population a seulement

14. Les prélèvements désignent les pompages d'eau dans les fleuves ou les nappes souterraines. Ils se distinguent des consommations qui se réfèrent aux quantités d'eau évaporées par les usages.

triplé. La pression sur les ressources en eau bleue s'est ainsi accrue deux fois plus rapidement que la population, une tendance qui se poursuit avec le développement économique.

La répartition entre les trois secteurs, ainsi que son évolution, diffère suivant les sources. Retenons ici celle des Nations unies et du Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau qui, pour l'année 2005, donnait 70 % (soit 2 740 km³) de prélèvements pour l'agriculture, 18 % (soit 700 km³) pour l'industrie et 12 % (soit 470 km³) pour les municipalités¹⁵.

L'agriculture irriguée est le premier utilisateur d'eau bleue. Mais à la différence des deux autres secteurs, sa part dans les prélèvements décroît lentement : elle représentait près de 83 % en 1900, 69 % en 2000 et elle devrait être proche de 60 % en 2050. Dans les pays industrialisés de l'hémisphère Nord, elle n'est plus d'ores et déjà que de 30 % à 40 %. Les usages industriels, qui viennent en deuxième position selon les Nations unies, sont ceux qui ont augmenté le plus rapidement puisque, au cours du xx^e siècle, ils ont été multipliés par 16 ! Les prélèvements urbains ont eux aussi augmenté très fortement, à un rythme deux fois supérieur à celui de la population. Des hausses substantielles sont encore attendues dans les prochaines années, l'urbanisation étant amenée à se poursuivre, dans les pays émergents notamment. La population urbaine représente aujourd'hui la moitié de la population mondiale, et cette proportion devrait atteindre 70 % en 2050¹⁶.

15. Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau, Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau (WWAP), Unesco, Paris, Earthscan, Londres, 2012.

16. Ces données globales sont sujettes à variations selon les sources. Ainsi, pour le Water Resources Group, cité plus haut, les prélèvements totaux de 2010 étaient de l'ordre de 4 400 km³ par an, dont 70 % (soit 3 100 km³) pour l'agriculture, 14 % (soit 600 km³) pour les municipalités et 16 % (soit 700 km³) pour l'industrie.

Prélèvements mondiaux d'eau bleue dans les trois catégories d'usages¹⁷

	1900	1925	1950	1975	2000	2005	2025
Population (millions)	2 000	2 100	2 542	3 700	6 181	7 058	8 000
Prélèvements agricoles (km ³ /an)	513	770	1 080	1 900	2 663	2 740	3 053
Prélèvements municipaux (km ³ /an)	54	85	115	208	382	470	609
Prélèvements industriels (km ³ /an)	50	119	210	655	784	700	1 161
Prélèvements totaux	617	974	1 405	2 763	3 829	3 910	4 823

Source: Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau, *op. cit.*

Les quantités et les proportions d'eau prélevées dans une région donnée dépendent à la fois de l'abondance ou de la rareté des ressources et du niveau de développement économique. Les pays arides sont doublement pénalisés : ils ont peu d'eau et ne peuvent nourrir leurs populations sans irriguer car leur agriculture pluviale est peu productive et soumise aux aléas du climat. Nombre d'entre eux mobilisent une large part de leurs ressources potentielles en eau. L'Égypte, pays des extrêmes, dispose chaque année, en vertu du traité qui la lie au Soudan depuis 1959, de 55,5 km³ d'eau du Nil. Cette ressource est entièrement prélevée et consommée sur son territoire : quasiment aucune goutte du Nil ne rejoint plus la Méditerranée. Autre pays aride de la rive sud de la Méditerranée, la Tunisie dispose d'environ 4,6 km³ de ressources en eau potentielles et en mobilise 3,1 km³, soit 67 %.

17. Voir aussi la fiche sur les usages, téléchargeable sur le site www.eclm.fr

Quant au développement économique, il génère à la fois des besoins en eau élevés pour l'agriculture, mais surtout une demande forte du secteur de l'énergie qui s'accroît ces dernières années en raison de la production de biocarburants qui entre en compétition avec la production agricole alimentaire. Les trente pays de l'OCDE illustrent cette soif d'eau bleue des sociétés industrialisées. Les prélèvements moyens annuels y sont de 840 m³ par habitant et par an contre environ 570 en moyenne mondiale. Les États-Unis et le Canada arrivent de loin en tête avec plus de 1 200 m³, suivis par des pays pauvres en eau (sud de l'Europe, Australie, Mexique). Même si l'agriculture continue à être le premier utilisateur mondial d'eau, la compétition avec l'énergie va marquer les prochaines décennies. Les économies émergentes vont en être les premières affectées : leur demande en énergie devrait en effet augmenter de plus de 80 % d'ici à 2035, contre 14 % pour les pays de l'OCDE. Le triptyque eau, alimentation, énergie devient donc progressivement le nœud gordien des tensions hydro-géopolitiques. Les relations entre ces trois ressources essentielles à nos sociétés sont bien plus complexes que celles esquissées ci-dessus. Nous y reviendrons.

L'exemple de la France est particulièrement instructif. Les ressources en eau bleue du pays sont abondantes avec 200 km³ d'eau potentiels, soit plus de 3 000 m³ par habitant et par an. Sur ce total, seuls 33,4 km³ sont prélevés, soit de l'ordre de 510 m³ par habitant et par an, dont 9 % pour l'irrigation et 64 % pour la production électrique.

Ressources et prélèvements d'eau bleue en France (2001)

Le cycle de l'eau annuel et les ressources

Apports de pluie et neige (a)	503 km ³	
Apports des fleuves voisins (b)	11 km ³	
Évaporation totale (c)	314 km ³	
Bilan, total des ressources potentielles (a) + (b) - (c)	200 km ³	
→ Écoulements vers la mer	176 km ³	
→ Écoulements vers d'autres pays	18 km ³	
→ Consommation/évaporation par les usages humains	6 km ³	
Irrigation	3 km ³	9 %
Usages domestiques et urbains	5,7 km ³	17 %
Électricité	21,4 km ³	64 %
Total des prélèvements	33,4 km ³	100 %
Prélèvements d'eau de surface	27,4 km ³	82 %
Prélèvements d'eau souterraine	6 km ³	18 %

Source : site internet Eaufrance, http://www.eaufrance.fr/spip.php?rubrique187&id_article=449

L'importance des prélèvements pour l'électricité tient au fait que l'eau du refroidissement des centrales électriques thermiques est ici incluse dans les chiffres. Cette manière de faire est peu courante, la plupart des données internationales n'incluant que les prélèvements industriels classiques.

Les prélèvements d'un pays tempéré représentent en général une fraction assez faible de l'ensemble des ressources disponibles. Ce résultat ne s'explique pas par une volonté consciente de réduire les usages, mais par deux phénomènes interdépendants. Tout d'abord, dans un pays tempéré, une plus faible proportion d'eau de pluie est évaporée. Un apport donné de précipitations y produit donc proportionnellement plus de ressources en eau bleue que dans un pays sec. Ensuite, lorsque l'évaporation est forte, il faut davantage irriguer les cultures. En France, les cultures devant être irriguées sont surtout celles produites en été (maïs, tournesol). Dans des pays plus secs, c'est pendant une grande partie de l'année qu'il faut irriguer si

l'on souhaite un rendement correct. L'importance des prélèvements d'eau bleue pour l'irrigation passe donc facilement de quelques dizaines de pourcents des ressources sous climat tempéré à 80 % ou plus dans les pays arides.

LES PÉNURIES EN EAU À TRAVERS LE MONDE

La question de la durabilité des prélèvements d'eau est régulièrement posée au vu des pénuries qui frappent de nombreuses régions du monde. Mais comment se manifestent ces pénuries, comment mesurer les risques et, enfin, comment la situation va-t-elle évoluer ?

La mer d'Aral fournit l'exemple le plus frappant d'une catastrophe écologique liée à des prélèvements d'eau excessifs. Le développement de la culture irriguée du coton par l'Union soviétique dans les années 1950 a progressivement réduit les volumes d'eau du fleuve Amou-Daria qui alimentent cette mer intérieure non connectée à un océan : d'une cinquantaine de kilomètres cubes par an, les apports se sont réduits à moins d'une dizaine au fur et à mesure du développement de l'irrigation. Après quelques décennies, la mer d'Aral s'est asséchée sur la moitié de la superficie qu'elle occupait, générant une catastrophe sans précédent. L'économie de la pêche a été anéantie, et avec elle toute la population qu'elle faisait vivre. Des vents de poussière riche en sels affectent les régions environnantes. En réponse à cette crise, l'Ouzbékistan et les pays riverains ont mis en place une coordination de la gestion de l'eau visant à réduire les prélèvements d'eau d'irrigation. Par ailleurs, une digue a été construite dans l'ancienne mer pour maintenir en eau sa partie nord et en préserver une petite partie. Ce programme est pour l'instant parvenu à stabiliser la situation, mais n'a pas réussi à inverser la tendance. La production ouzbeke de coton a chuté lentement et régulièrement des années 1980 jusqu'en 2000 pour se stabiliser ensuite. Le coton a en fait été remplacé par des cultures vivrières afin de faire face à l'augmentation de la population sans modifier fondamentalement la demande en eau. L'Ouzbékistan reste malgré tout aujourd'hui le troisième exportateur mondial de coton.

Le fleuve Jaune, dans le nord de la Chine, présente un autre exemple saisissant de ces problèmes de pénurie. Riche en limons fertilisants arrachés au gigantesque plateau de loess qu'il traverse, ce fleuve a vu ses écoulements vers la mer se réduire d'année en année à partir de 1980 en réponse au développement de l'irrigation et de l'hydroélectricité¹⁸. Ce ne sont pas moins d'une quarantaine de barrages qui ont été construits le long des 5464 kilomètres du fleuve. La situation est devenue inquiétante dans la décennie 1990, peu pluvieuse, le fleuve s'asséchant totalement dans sa partie aval chaque année pendant plusieurs mois. Le summum a été atteint en 1997 quand le fleuve a été à sec sur près de 700 kilomètres depuis son embouchure, et ce, pendant trois cents jours de l'année ! En 2000, les prélèvements totaux étaient de 50 km³, dont 81 % pour l'irrigation. Ils étaient supérieurs aux ressources totales, estimées à 44 km³ ! Cela illustre bien le fait que la réutilisation successive de l'eau d'un fleuve peut conduire à des prélèvements supérieurs aux ressources théoriques.

Les impacts environnementaux de cette réduction des écoulements ont été rapidement désastreux. Tout d'abord pour la production piscicole et conchylicole proche de l'embouchure du fleuve, qui représente une part essentielle de la consommation des citadins du nord-est de la Chine. Un minimum de 5 km³ d'eau a été estimé nécessaire pour maintenir cette production. Par ailleurs, une autre quinzaine de kilomètres cubes sont nécessaires pour évacuer les limons charriés par le fleuve et éviter qu'ils n'exposent la plaine alluviale à des risques accrus d'inondations. Car l'histoire du fleuve Jaune est tout autant émaillée de phénomènes de sécheresses que d'inondations dévastatrices. Comme pour de nombreux grands fleuves, les sédiments charriés par le fleuve Jaune ont surélevé le lit du fleuve par rapport à la plaine alluviale, ce qui augmente les risques d'inondations, dont les plus importantes peuvent aller jusqu'à déplacer ce lit. Ces risques ont conduit le gouvernement à aménager des digues de protection tout au long du fleuve. Avec les faibles écoulements de la décennie 1990,

18. *Yellow River Comprehensive Assessment: Basin Features and Issues*, International Water Management Institute, Yellow River Consultancy Commission, IWMI Working Paper n° 57, Colombo, Sri Lanka, 2003.

les limons se sont accumulés au point de provoquer la surélévation du lit de 5 à 17 mètres et de menacer d'inondations une population de 90 millions d'habitants dans la partie aval proche du delta du fleuve.

Il faudrait donc, selon l'Agence du fleuve Jaune, qu'une vingtaine de kilomètres cubes d'eau rejoigne la mer de Chine chaque année pour remédier à la situation. En réponse à cette crise, le gouvernement a pris une série de mesures. Les lois et les réglementations donnent à l'Agence du fleuve jaune l'autorité pour réguler les débits de manière plus stricte. Un programme important de lutte contre l'érosion du plateau de loess a été mis en place, mais ce programme, s'il stabilise les limons du plateau, requiert également de l'eau d'irrigation, étant donné la relative aridité de la région. Enfin, et surtout, un gigantesque programme de diversion des eaux du bassin du Yangzi Jiang, situé plus au sud, va être lancé. La seule diversion de l'ouest de ce programme fournira 17 km³ d'eau supplémentaires au fleuve Jaune, pour un montant de près de 30 milliards d'euros.

Ces deux exemples ne sont pas isolés. De nombreux grands fleuves du monde, surtout dans les pays émergents, voient leurs écoulements vers les mers et océans se réduire progressivement comme ceux du bassin de la mer d'Aral ou ceux du fleuve jaune. On dit que leurs bassins se ferment. Il n'existe malheureusement pas d'état mondial de la situation, mais le continent le plus touché est l'Asie, où la demande en eau a explosé avec le développement économique. Les autres zones critiques sont l'Ouest américain, le Moyen-Orient et l'Afrique australe.

Il est important de tirer les leçons de ces exemples. Et d'abord, de bien comprendre que les pénuries dont il est question n'ont en général rien à voir avec la sécheresse et la difficulté de trouver de l'eau pour les usages humains liés à la boisson ou à l'hygiène. L'eau manque d'abord à cause des usages économiques très consommateurs que sont l'agriculture et l'énergie. Les pénuries opposent les trois grands « utilisateurs » que sont les agriculteurs, les producteurs d'énergie et les écosystèmes – surtout aquatiques. La crise de l'eau est donc une crise de l'allocation des ressources entre ces utilisateurs. Le secteur agricole est le premier d'entre eux, du fait des quantités qu'il prélève, mais aussi parce que les plantes ont

des besoins élevés pendant les périodes chaudes, souvent sèches. Il entre en compétition avec la production d'énergie de différentes façons. Lorsque la demande énergétique est forte en saison froide, de l'eau peut être utilisée pour produire de l'hydroélectricité alors que les plantes n'ont pas de besoins. Toute eau lâchée alors par les barrages risque fort d'être perdue pour l'irrigation. En saison chaude, la production d'énergie peut aussi requérir de l'eau, notamment pour refroidir les centrales thermiques. Les prélèvements de l'agriculture et de l'énergie sont donc susceptibles de nuire au bon fonctionnement des écosystèmes qui, tout au long du fleuve, contribuent à réduire naturellement les différents risques associés à l'eau en termes de santé ou d'inondations. En aval, ce bon fonctionnement assure aussi la productivité et l'économie de la zone côtière.

Cette analyse souligne toute la difficulté de bien décrire la pénurie et de trouver des critères pour la caractériser. Le terme même de « pénurie » n'est pas forcément approprié car il évoque plus le manque que la surexploitation. De surcroît, estimer le degré de compétition pour l'eau bleue n'est pas facile, son utilisation différant selon les secteurs : l'agriculture fait s'évaporer l'eau, l'hydroélectricité la fait circuler dans des turbines, les écosystèmes bénéficient simplement de la présence d'eau et n'ont besoin, ni de la prélever, ni de la consommer. Ces usages ne peuvent donc pas s'additionner, ils sont à la fois complémentaires et antagonistes. Ils varient de plus continuellement pour s'ajuster aux conditions météorologiques. Dès lors, mesurer les tensions potentielles et anticiper les crises que ces tensions pourraient générer se révèle très difficile, voire impossible.

LES PÉNURIES DE NATURE ÉCONOMIQUE

Les pénuries décrites ci-dessus sont dues à une pression excessive sur les ressources en eau bleue par les différents usages. Elles sont classées en pénuries « physiques ». On distingue aussi des pénuries dues à une insuffisance des infrastructures de protection, de captage, de stockage et de transport, et non à une insuffisance d'eau. Ces dernières sont classées en pénuries « économiques ».

Les premières affectent des économies avancées ou émergentes, alors que les secondes s'observent dans des pays en développement. Le terme de « pénurie » pourrait paraître inapproprié dans ce cas et il vaudrait peut-être mieux parler de « vulnérabilité aux conditions météorologiques ». En effet, comme l'ont bien montré David Grey et Claudia Sadoff de la Banque mondiale¹⁹, les pays ayant un déficit d'infrastructures ont un PIB et une croissance fortement dépendants de la pluie. L'agriculture et le développement économique y sont fortement soumis aux aléas du climat par manque d'irrigation en périodes sèches et par manque de systèmes permettant d'évacuer les excédents d'eau en périodes humides. La croissance du pays est alors étroitement liée aux conditions météorologiques.

Le concept de pénurie économique a été popularisé par l'Institut international de gestion de l'eau²⁰ et ne répond pas à des caractéristiques très précises. Les cartes de pénurie économique en eau²¹ placent l'Afrique subsaharienne, une zone d'Asie s'étendant du nord de l'Inde au Vietnam et une partie de l'Amérique du Sud allant du nord du Pérou à l'Équateur dans les régions du monde affectées par ce type de pénurie.

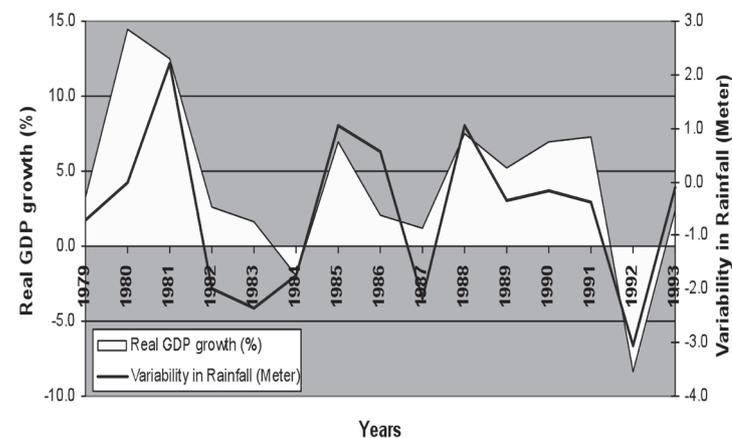
Ici encore, la pénurie n'est donc synonyme ni d'absence d'eau ni de sécheresse.

19. 4th World Water Forum, Thematic Document, Framework Theme 1, Water for Growth and Development, World Bank, Colegio de México, World Water Council, 2006.

20. Plus connu sous le sigle IWMI, International Water Management Institute.

21. Voir par exemple : http://www.grida.no/graphicslib/detail/areas-of-physical-and-economic-water-scarcity_1570# ou : http://abonnes.lemonde.fr/planete/visuel/2013/05/14/trois-zones-sensibles-sur-la-carte-mondiale-du-stress-hydrique_3201617_3244.html

Influence des précipitations sur la croissance du produit intérieur brut au Zimbabwe



Source: 4th World Water Forum, Thematic Document, Framework Theme 1, Water for Growth and Development, Grey D., Sadoff C., World Bank, Colegio de Mexico, World Water Council, 2006

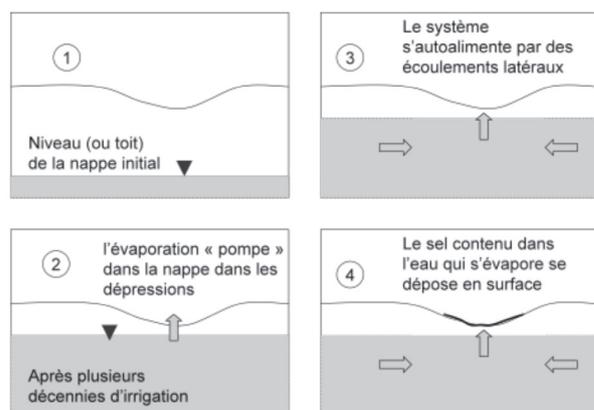
LE MINAGE DES EAUX SOUTERRAINES

Le dernier aspect de la crise des ressources en eau commence tout juste à faire surface grâce à des travaux de recherche utilisant à la fois des données satellitaires et des outils de simulation à l'échelle planétaire. Il s'agit du « minage » des eaux souterraines, terme désignant leur surconsommation en raison de pompes supérieures à la recharge naturelle. Le toit des nappes s'abaisse et il faut pomper l'eau toujours plus profondément. Ce minage revêt deux aspects différents : l'utilisation de nappes souterraines fossiles (dont le renouvellement n'est pas assuré) et la surexploitation des nappes phréatiques renouvelables. Ce second phénomène est celui qui nous intéresse ici, vu son ampleur planétaire et son rôle dans l'histoire récente des grands périmètres irrigués qui mérite un rapide détour.

Depuis le début du xx^e siècle, l'ingénierie hydro-agricole a développé et perfectionné des systèmes irrigués très sophistiqués qui

couvrent des régions entières, voire des pays. Tel est le cas du Pakistan qui possède, dans la vallée de l'Indus, le système irrigué le plus étendu au monde, couvrant une vingtaine de millions d'hectares, soit autant que la superficie agricole de la France. Des systèmes comparables, mais de taille plus réduite, ont été installés dans de nombreux pays, tout particulièrement en Asie, où l'eau est abondante et les traditions d'irrigation sont très anciennes. Ils ont accompagné la révolution verte qui a permis à ce continent de réduire la sous-nutrition. Les apports réguliers d'eau par l'irrigation ont progressivement « rechargé » les nappes d'eau souterraines dont le toit se trouvait initialement souvent à plusieurs dizaines de mètres de profondeur. Après quelques décennies, les réservoirs souterrains ont été remplis et le toit des nappes s'est retrouvé à proximité de la surface du sol. Un phénomène dangereux peut alors se produire : l'évaporation peut se mettre à « pomper » directement dans cette nappe. Ce phénomène se produit particulièrement dans toute zone en légère dépression topographique où la nappe est proche de la surface du sol. Il se forme alors un véritable puits : l'évaporation abaisse localement le niveau de la nappe, ce qui fait migrer l'eau et les sels qu'elle contient vers la zone en dépression. En s'évaporant, l'eau dépose les sels qu'elle contient à la surface du sol.

Illustration du phénomène de salinisation des périmètres irrigués en situation de nappe sub-affleurante



© D. Zimmer.

Ce phénomène a marqué les décennies 1970 et 1980 dans de nombreux périmètres irrigués de tous les continents et a suscité une mobilisation internationale, la salinisation des terres menaçant la production agricole. Pourtant, cette alerte a été de courte durée car, pour les agriculteurs, la disponibilité d'eau à faible profondeur était avant tout une opportunité. On a donc vu se développer, à partir des années 1980, l'irrigation non plus à partir des eaux de surface apportées par les canaux, mais à partir de pompes d'eaux souterraines. Cette pratique a bouleversé la gestion de l'eau des zones irriguées. Le niveau des nappes s'est rapidement abaissé, rompant ainsi la connexion entre la nappe et l'évaporation et donc le phénomène de salinisation. On a vu également les agriculteurs progressivement réhabiliter les zones salinisées et les remettre en culture.

Depuis lors, le développement du pompage n'a eu de cesse de se répandre dans le monde. Ce mode d'irrigation coûte plus cher aux agriculteurs, qui doivent payer le carburant ou l'électricité, mais il présente l'avantage de la souplesse. Dans un système où l'eau est distribuée par des canaux, l'agriculteur n'est pas libre d'irriguer quand il le souhaite. Il dépend du « tour d'eau » mis en place par le gestionnaire du canal. Le pompage lui permet de faire face aux éventuelles déficiences du système et d'assurer sa production. Les avantages économiques sont souvent suffisants pour justifier le surcoût, et dans certains pays comme l'Inde ou le Mexique, ils sont encore accrus par des politiques de subventionnement du gazoil ou de l'électricité.

La première conséquence de ce chantier quasi planétaire de pompage des eaux souterraines est l'abaissement continu du niveau des nappes phréatiques sur de vastes surfaces, qui témoigne d'une utilisation supérieure aux capacités de recharge annuelles et donc non durable de l'eau. De récents travaux de recherche, s'appuyant sur des données satellitaires comme la mission GRACE²², ont permis de photographier l'état des nappes d'eau dans le monde. Ils ont montré que le niveau des nappes s'abaisse dans de nombreux pays du monde de plusieurs centimètres par an. Ces résultats sont cor-

22. Gravity Recovery and Climate Experiment.

roborés par d'autres estimations selon lesquelles le minage atteint environ 256 km³ par an et se retrouve particulièrement en Asie et en Amérique. À elle seule, l'Inde est responsable de 28 % de cet excès de pompage.

Pompage et surpompage dans les nappes souterraines de zones irriguées et consommation en eau des cultures en zones irriguées en 2000 des six principaux pays responsables du minage des eaux souterraines, en km³/an

PAYS	QUANTITÉS D'EAU POMPÉES ANNUELLEMENT	SURPOMPAGE ANNUEL	CONSOMMATION D'EAU DES CULTURES IRRIGUÉES
Inde	190	71	600
États-Unis	115	32	204
Chine	97	22	403
Pakistan	55	37	183
Iran	53	27	59
Mexique	38	11	71
Planète	734	256	2510

Source: Nonsustainable groundwater sustaining irrigation, Wada Y., van Beck L., Bierkens M., *Water Resources Research*, 2012.

De manière plus dramatique, le minage des eaux souterraines a conduit au suicide de nombreux agriculteurs indiens surendettés dans l'Andhra Pradesh²³. Les coûts nécessaires à l'approfondissement régulier de leurs puits ont, semble-t-il, contribué dans nombre de cas à cette catastrophe humaine et sociale. Sans atteindre nécessairement de telles extrémités, la situation risque de devenir critique dans les pays affectés par ce problème. Dans l'ouest des États-Unis, si le minage des eaux souterraines se poursuit, 35 % de la superficie des Grandes Plaines pourrait ne plus être irrigable d'ici à trente

ans. Pour les autres pays mentionnés plus haut, les prévisions ne sont pas disponibles, mais les risques encourus devraient inciter à la mise en place de suivis et de mesures appropriées.

Dans un tout autre registre, il a été démontré que les pompages d'eau souterraine contribuent à la remontée du niveau de l'océan. Entre 1961 et 2003, ils auraient été responsables de 42 % de la hausse observée de 0,77 mm/an.

◆ ◆ ◆

Ce survol des usages mondiaux d'eau bleue et des pénuries associées est relativement conforme à l'image classique véhiculée dans de nombreux sommets sur l'eau et dans les médias. La situation de l'eau douce est critique dans de nombreux pays. Plus d'un tiers de la population mondiale vit dans des régions où les pénuries menacent. La surexploitation de nombreuses nappes souterraines constitue de plus une épée de Damoclès, tant les prélèvements paraissent non durables.

Cette vision inquiétante doit être pondérée par un fait étonnant : ce n'est pas tant l'eau qui se raréfie que les prélèvements qui s'accroissent sans concertation entre les usagers et au détriment des écosystèmes aquatiques. Dans plusieurs régions, et notamment en Afrique subsaharienne, les pénuries sont même de nature purement économique, dues à un manque d'infrastructures de stockage et de gestion de l'eau. C'est ce constat qui a conduit la communauté internationale de l'eau à parler de crise de « gouvernance » pour décrire la situation.

Nous allons maintenant voir que cette analyse qui s'appuie uniquement sur l'eau bleue ne reflète qu'une partie de la réalité.

23. Plus de 17 000 agriculteurs se seraient suicidés en 2009 dans toute l'Inde d'après le quotidien *The Hindu*. <http://www.thehindu.com/opinion/columns/sainath/article995824.ece?homepage=true>

III. LE TRIPTYQUE EAU, ALIMENTATION, ÉNERGIE, OU COMBIEN D'EAU UTILISONS-NOUS VRAIMENT ?

Appréhender les usages de l'eau sous le seul angle des prélèvements d'eau bleue donne une image tronquée de l'utilisation que les hommes font de la ressource en eau. En effet, si l'eau était uniquement prélevée puis rejetée sans dégradation, les risques de pénurie n'existeraient pas. Nous avons déjà noté que l'eau usée rejetée peut être réutilisée plusieurs fois le long d'un cours d'eau. De même, lorsque les techniques de recyclage d'eau se développent, notamment dans l'industrie, les quantités d'eau utilisées dans les méthodes de production restent identiques alors que les prélèvements se réduisent. Les quantités d'eau prélevées ne reflètent donc pas les quantités d'eau utilisées et, de ce fait, ne peuvent rendre compte correctement des tensions sur la ressource et de leurs évolutions. Il importe de prendre en compte l'eau réellement soustraite aux autres usages après prélèvements, et tout d'abord celle qui s'évapore et ne sera réutilisable que si elle est recyclée sous forme de nouvelles précipitations. Cela peut se produire grâce au recyclage continental, mais en général à des centaines ou des milliers de kilomètres du lieu d'évaporation. Il faut aussi tenir compte de l'eau rejetée sous une forme dégradée, nommée classiquement « eau usée ». Dans la plupart des situations, le rejet rejoint un cours d'eau où la pollution est diluée. Lorsque les milieux aquatiques sont écologiquement fonctionnels, ils sont capables d'assimiler la charge polluante. L'eau est dans ce cas réutilisable à l'aval, mais les coûts de traitement sont plus élevés et les types d'usages possibles peuvent alors être réduits en raison de coûts de traitement prohibitifs. Ainsi, dans le sud de la Chine, bien que l'eau soit abondante, sa qualité est parfois telle que son traitement pour la rendre potable

est quasi impossible. De fait, des villes comme Guangzhou ont, dans les dernières années, fait face à de grosses difficultés pour produire leur eau potable.

Par ailleurs, ne raisonner qu'en termes d'eau bleue est insuffisant dans la mesure où l'agriculture, même dans les zones irriguées, mobilise de grandes quantités d'eau verte, l'eau de pluie mise en réserve dans les sols. Cette eau, mise à disposition gratuitement quoique de manière irrégulière et incertaine, est aussi essentielle à notre alimentation qu'au bon fonctionnement des écosystèmes terrestres. Ne pas l'intégrer dans le raisonnement était logique en période d'abondance. Étant donné l'importance de l'agriculture dans les prélèvements d'eau bleue et les impacts de l'agriculture sur les écosystèmes terrestres, ne pas la comptabiliser dans les usages conduit à l'exclure des raisonnements et des solutions à la crise de l'eau.

Dans cette partie, nous examinerons donc tout d'abord les relations entre l'agriculture et l'eau avant de proposer une estimation plus globale des usages de l'eau tenant compte également de la production d'énergie.

L'AGRICULTURE, LES PLANTES ET L'EAU

Il n'est un secret pour personne que, pour avoir la main verte, la première règle est d'arroser régulièrement. Mais pour quelle raison les plantes ont-elles besoin de beaucoup d'eau ? Qu'en font-elles exactement ? Pour l'essentiel, cette eau ne se stocke pas et n'est pas utilisée pour la croissance, mais elle est évaporée en permanence par une série de petites perforations situées sur leurs feuilles, appelées stomates et constituées de deux cellules en forme de reins. Ces stomates sont surtout abondants sur les faces inférieures des feuilles, mais peuvent aussi se trouver sur la face supérieure et sur les tiges. Ils sont le lieu des échanges de la plante avec l'air et jouent un rôle essentiel dans la photosynthèse car ils contrôlent l'ouverture d'une petite cavité où les échanges entre les cellules et l'atmosphère se produisent : la plante y fixe le gaz carbonique que la photosynthèse va transformer en glucides et en biomasse, mais, ce faisant, perd de la vapeur d'eau. Lorsque la plante est bien

alimentée en eau, les cellules en forme de reins sont gorgées d'eau et leur tension ménage une ouverture qui rend les échanges entre la plante et l'air environnant possibles. Mais dès que la plante est moins bien alimentée en eau, les deux cellules se dégonflent littéralement et l'ouverture se ferme. La plante flétrit et sa capacité à capter du gaz carbonique et à photosynthétiser des glucides se réduit, voire s'annule.

Ainsi, pour fixer beaucoup de carbone, une plante « doit » perdre beaucoup d'eau. Il existe toutefois de grandes variations de l'efficacité hydrique des plantes – définie par la quantité de matière organique générée par la quantité d'eau absorbée. Les plantes tolérantes à la sécheresse ont la capacité de produire avec peu d'eau suffisamment de matière organique pour se développer. Cette efficacité dépend de nombreux paramètres d'origine génétique, et notamment du type de mécanisme de photosynthèse. À cet égard, deux principaux types de plantes ont été identifiés. Le premier type produit, lors de la première étape de la photosynthèse, un acide organique à trois carbones par une enzyme responsable du captage du gaz carbonique peu efficace. Les plantes appartenant à ce type sont dites « en C3 ». C'est le type le plus ancestral, qui est apparu alors que l'atmosphère terrestre était encore riche en gaz carbonique. D'autres plantes produisent d'abord un acide à quatre carbones et sont dites « en C4 ». Elles sont apparues plus tardivement, alors que la teneur en gaz carbonique avait déjà diminué et que l'enzyme responsable de leur captation du gaz carbonique était nettement plus efficace. Les céréales comme le blé, l'orge sont des plantes en C3, alors que le maïs, le sorgho sont des plantes en C4. Les plantes en C4 ne représentent que 3 % des plantes, mais elles assurent 25 % de la photosynthèse terrestre.

Comme l'absorption du gaz carbonique et la perte d'eau vont de pair, une plus grande efficacité dans l'absorption du gaz carbonique se traduit aussi par une plus grande transpiration d'eau. Ainsi, pour assimiler 1 gramme de gaz carbonique, les plantes en C3 transpirent plus de 600 grammes d'eau, alors que les plantes en C4 en perdent seulement 300 grammes. Cela se traduit par un apparent paradoxe : une culture telle que le maïs, accusée de mobiliser de grandes quantités d'eau, a besoin de moins d'eau que le blé pour produire une même quantité de matière organique. L'explication tient au fait que

le maïs se développe pendant l'été dans nos régions. Il doit donc être irrigué car l'eau verte disponible pendant l'été est insuffisante à sa croissance.

Il existe aussi un troisième type de métabolisme, caractéristique des plantes de milieux très secs qui ont inventé la sobriété en eau. Ces plantes n'ouvrent tout simplement leurs stomates que la nuit et, ce faisant, captent le gaz carbonique tout en minimisant les pertes d'eau. Dans la journée, leurs stomates demeurent fermés, mais les plantes captent l'énergie lumineuse qui leur permet alors de transformer le carbone stocké la nuit précédente grâce à la photosynthèse.

Les plantes se révèlent donc généralement gourmandes en eau, comme le montre la disproportion gigantesque entre captage de gaz carbonique et transpiration d'eau : il faut des centaines, voire des milliers, de litres d'eau pour produire 1 kg de biomasse (voir tableau ci-dessous). Ces chiffres sont des ordres de grandeur et varient suivant les techniques agricoles mises en œuvre, les variétés et la disponibilité en eau.

Ordres de grandeur des consommations spécifiques d'eau des bases de notre alimentation en l/kg [ou m³ d'eau par tonne]. Ces chiffres se rapportent à la partie consommée brute (non exprimée en matière sèche) des différents produits

PRODUITS VÉGÉTAUX	TYPE	LITRES D'EAU NÉCESSAIRES PAR KG DE PRODUIT
Blé	C3	700-2000
Orge	C3	540-1500
Riz	C3	900-1900
Maïs	C4	700-1400
Canne à sucre	C4	100-200
Pomme de terre	C3	100-400
Maraîchage	-	200-400
Agrumes	-	200-500

Source : Water Footprint Network. www.waterfootprint.org

En moyenne, les céréales en C3 requièrent entre 1 000 et 1 500 l/kg de grains, avec des valeurs généralement plus élevées pour le riz. Les céréales en C4 en consomment un peu moins, les fruits et légumes moins encore. Enfin, le record absolu de sobriété en eau est détenu par la pomme de terre qui n'a besoin que d'une centaine de litres d'eau par kilogramme.

DES VÉGÉTAUX AUX PRODUITS TRANSFORMÉS

L'alimentation humaine n'est toutefois pas constituée seulement de produits végétaux ! Elle provient aussi de la transformation de la biomasse végétale, soit par des processus industriels (huiles, par exemple), soit par les animaux (viande, lait, œufs...). Cette transformation démultiplie les quantités d'eau nécessaires dans des proportions importantes : le fait d'extraire une substance d'une plante reporte la quantité d'eau totale nécessaire à la production de cette plante à sa seule partie utile. S'il faut 1 000 litres d'eau pour produire 1 kg de tournesol et que ce kilo de tournesol ne produit que 200 grammes d'huile, il faut 5 000 litres au moins par kilo d'huile. De même, si pour produire un poulet de 1 kg il faut le nourrir pendant six mois avec 1 kg de maïs par mois, il faut en tout six fois la quantité d'eau requise pour produire 1 kg de maïs, soit au moins 4 200 litres. Le tableau ci-dessous donne une idée des ordres de grandeur auxquels on parvient. Le record est sans conteste détenu par la viande de bœuf qui requiert de l'ordre de 13 000 litres par kilo de viande produite.

Ces chiffres sont utiles pour donner des ordres de grandeur. Cependant, ils doivent être utilisés avec précaution : suivant les conditions de cultures, ils peuvent varier dans des proportions importantes. Le rendement des cultures ne dépend pas en effet que de l'eau ! Les techniques culturales, la variété cultivée, les conditions climatiques, les maladies et parasites des cultures ont une influence aussi déterminante que l'eau sur le rendement.

La manière dont on calcule et on répartit les quantités d'eau utilisées a aussi son importance. Ainsi, lorsqu'on produit un bœuf, on produit de la viande, des os, de la peau, de la graisse, des abats. La répartition de l'eau nécessaire à la production de ce bœuf dépend

de la manière dont est valorisé cet animal. Suivant que l'on en vend, outre la viande, du cuir ou la graisse pour des produits cosmétiques, suivant même que l'on intègre ou non la carcasse dans les calculs, les résultats seront très différents. De même, si un animal est nourri avec des résidus de cultures non consommés par l'homme, il faut décider où l'on affecte l'eau de ces résidus. La logique voudrait qu'on réduise la consommation d'eau de la culture en proportion de la biomasse servant à nourrir les animaux. Ces différents exemples montrent combien l'estimation du volume d'eau consommée peut s'avérer complexe si l'on veut éviter les doubles comptages.

Remarquons également que, par-delà les produits, c'est la valeur nutritionnelle de notre alimentation que l'agriculture doit assurer. Or, à cette aune, les différents produits ne sont pas logés à la même enseigne. Il faut environ 1 litre d'eau pour produire 1 kcal (kilocalorie), mais avec une grande variabilité. Les céréales et la plupart des végétaux produisent davantage avec 1 litre d'eau, près de 4 kcal pour le maïs, plus de 5 pour la pomme de terre. Les produits animaux sont nettement en deçà, avec moins de 1 kcal produite par litre d'eau consommé. Pour les protéines, la situation est plus équilibrée entre produits végétaux et produits animaux : entre 20 et 100 grammes de protéines sont produits avec 1 m³. Pour les graisses, les animaux ont un léger avantage sur les végétaux, à l'exception de ceux destinés à la production d'huile. La pomme de terre bat tous les records de valeur nutritionnelle de l'eau : elle utilise nettement moins d'eau que tous les autres aliments pour produire la même quantité de calories et de protéines.

Productivité nutritionnelle de l'eau de quelques aliments

PRODUITS	LITRES D'EAU PAR KILO (L/KG)	PRODUCTIVITÉ DE L'EAU (KG/M ³)	PRODUCTIVITÉ NUTRITIONNELLE DE L'EAU		
			ÉNERGIE (KCAL/M ³)	PROTÉINES (G/M ³)	GRAISSES (G/M ³)
Céréales et pomme de terre					
Blé	1 160	0,86	2 280	74	9
Riz	1 400	0,71	1 990	49	5
Maïs	700	1,43	3 860	77	17
Pomme de terre	100	10,00	5 630	150	9
Fruits et légumes					
Haricots	2 800	0,36	1 190	76	4
Arachides	2 500	0,40	2 380	11	206
Tomate	130	7,69	1 420	65	11
Oignon	150	6,67	2 260	85	0
Banane	500	2,00	430	11	0
Citron	340	2,94	500	0	0
Huiles et graisses					
Huile de soja	15 000	0,07	550	0	62
Beurre	18 000	0,06	404	1	39
Viandes					
Bœuf	13 500	0,07	100	10	7
Porc	4 600	0,22	400	21	33
Volaille	4 100	0,24	330	33	21
Autres produits animaux					
Œufs	2 700	0,37	520	41	36
Lait	800	1,25	660	40	38

Source : A. Nawab, *Nutritional Water Productivity and Global Food Security*, Research Note, University of Minnesota, 2011.

RETOUR SUR LA CONSOMMATION D'EAU AGRICOLE

Les données ci-dessus permettent d'estimer les quantités d'eau nécessaires pour produire notre alimentation. Pour ce faire, on

s'appuie sur les consommations d'eau des seules plantes cultivées, puisque ces dernières fournissent l'essentiel de l'alimentation humaine et celle de la majeure partie des animaux que nous consommons. Cette approche dite « descendante » a le mérite d'éviter les doubles comptages dus à des utilisations multiples d'un même produit. Les poissons et les produits de la mer tout comme les plantes sauvages sont toutefois négligés en première analyse. En revanche, une part importante de l'élevage est nourrie grâce à des prairies permanentes ou à des pâturages utilisés de manière extensive. Les quantités d'eau effectivement nécessaires au maintien de ces pâtures à l'échelle mondiale sont très élevées, de l'ordre de 20 000 km³²⁴, mais seule une infime fraction de la matière organique produite dans ces pâtures – qui jouent par ailleurs un rôle crucial pour la biodiversité – est effectivement convertie en nourriture. Pour cette production, une approche « ascendante », partant du nombre d'animaux consommés, est nécessaire.

Si la production agricole végétale sert de base aux estimations des besoins en eau de notre alimentation, il n'existe toutefois pas de méthode universelle pour le calcul²⁵ et il est même souvent difficile de savoir sur quelles hypothèses reposent les estimations. La principale difficulté tient à la variabilité des rendements et de la productivité de l'eau suivant les conditions de culture. Les valeurs présentées plus haut sont en effet obtenues pour des cultures en bonne « santé » tout au long de leur cycle. Dans ce cas, le rendement est élevé, et la productivité de l'eau maximale. Fort heureusement, la FAO et le ministère américain de l'Agriculture tiennent à jour d'importantes bases de données qui contiennent pour chaque pays et chaque année de précieuses informations sur les types de cultures, les superficies cultivées, les rendements moyens, les consommations, les importations et les exportations des principaux produits alimentaires. Les informations de ces bases de données sont très

proches, comme nous avons pu le vérifier²⁶. Il est donc possible de produire des estimations tenant compte des conditions locales.

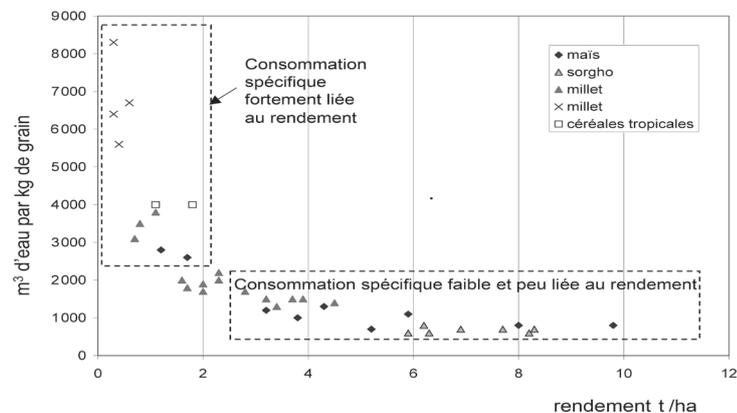
La consommation spécifique d'eau des cultures (mètres cubes d'eau par quantité de produit) dépend assez simplement des rendements, comme le montre le graphique ci-dessous. Pour les céréales, lorsque ces derniers sont supérieurs à 2-3 tonnes par hectare, elle est faible (de l'ordre de 1 000 l/kg) et relativement constante. En revanche, en deçà de ce seuil, elle s'élève brutalement et peut être multipliée par un facteur pouvant atteindre 8 pour des rendements de l'ordre de 1t/ha. Cette courbe signifie que, lorsque les rendements sont élevés, l'eau consommée est proportionnelle au rendement. En revanche, lorsque les rendements sont faibles, la consommation d'eau totale est « plus que » proportionnelle au rendement. Ainsi, la quantité d'eau totale requise par une culture pourra être aussi élevée pour un rendement de 1t/ha que pour un rendement de 6t/ha. L'explication est simple : un rendement faible signifie que les plantes sont moins bien développées, ne couvrant souvent pas le sol et laissant donc s'évaporer de l'eau directement de ce dernier, ou transpirant de l'eau sans pour autant produire de récolte.

24. Rockström J., *Water for Food and Nature in the Tropics*. *Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Science*, Royal Society Publishing, Londres 2003.

25. Un standard est proposé par le Water Footprint Network, comme nous le verrons plus loin, mais il n'est ni reconnu ni utilisé par tous.

26. Zimmer D. et Renault D., Virtual water in food production and global trade: Review of methodological issues and preliminary results, in *Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade*, Value of Water Research Report Series n° 12, IHE, Delft, 2003.

Relation entre consommation spécifique d'eau (m³ par kg de grain) et rendement des céréales



Source: J. Rockström, *Magnitude of the hunger alleviation challenge, implications for consumptive use*, Stockholm International Water Institute (presentation), 2004.

Cette relation entre consommation spécifique d'eau et rendement a été vérifiée sur de nombreuses cultures par de nombreux auteurs²⁷. Elle a été théorisée par Doorenbos et Kassam qui en ont proposé une équation simple utilisée très largement pour guider les pratiques d'irrigation²⁸. Elle permet d'estimer les quantités d'eau nécessaires à la production agricole au vu des rendements obtenus par les cultures dans une région donnée. Elle traduit enfin le fait que ce sont les faibles rendements qui, ayant les consommations spécifiques d'eau les plus élevées, génèrent les plus grandes « pertes » d'eau. Or les rendements faibles – inférieurs à 2 t/ha pour les céréales – sont d'abord ceux de millions de petits agriculteurs des pays en développement qui n'ont ni les ressources ni les équipements pour assurer leur production. Nous reviendrons sur cette faible productivité car elle questionne le modèle de développement hydro-agricole.

27. *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*, Earthscan, Londres, International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, 2007.

28. Voir la fiche téléchargeable « Les plantes et l'eau » sur le site www.eclm.fr

COMBIEN D'EAU POUR L'ALIMENTATION ?

Le volume total d'eau nécessaire à la production végétale agricole représentait au début du XXI^e siècle environ 7 130 km³/an, soit 3 200 litres d'eau par jour pour chaque habitant de la planète. Sur ce total, la plus grande partie (5 580 km³/an, soit 78 %) provenait d'eau de pluie, l'eau bleue d'irrigation représentait les autres 22 % de l'évaporation totale, soit 1 540 km³/an²⁹.

Pour avoir une idée plus précise de l'eau de notre alimentation il faut de surcroît tenir compte de deux autres éléments. D'une part, une partie de l'eau agricole (de l'ordre de 8 à 9 %) est utilisée pour des produits non destinés à l'alimentation (coton, biocarburants...). D'autre part, les pâturages naturels mobilisent environ 900 km³/an³⁰ supplémentaires. Le total des besoins en eau de notre alimentation est donc au début du XXI^e siècle de l'ordre de 7 500 km³/an (1 200 m³/hab./an). L'Asie vient de très loin en tête de cette consommation d'eau avec près de 3 000 km³/an, suivie par les Amériques et l'Afrique subsaharienne. La proportion d'eau bleue utilisée varie généralement suivant les continents entre 10 et 20 % du total. Toutefois, des proportions nettement plus élevées s'observent en Afrique du Nord, au Moyen-Orient et en Asie du Sud. L'Afrique subsaharienne et l'Océanie se distinguent, quant à elles, par des proportions très faibles.

29. Les périmètres irrigués bénéficient également de 660 km³/an d'eau verte de précipitations qui s'ajoutent à ces 1 540 km³/an et sont inclus dans les 5 580 km³/an d'eau de pluie.

30. A. Hoekstra et M. Mekonnen, *The Water Footprint of Humanity*, 2011. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1109936109

Quantités d'eau moyennes annuelles requises par la production végétale agricole dans les différents continents (moyenne 2000-2005)

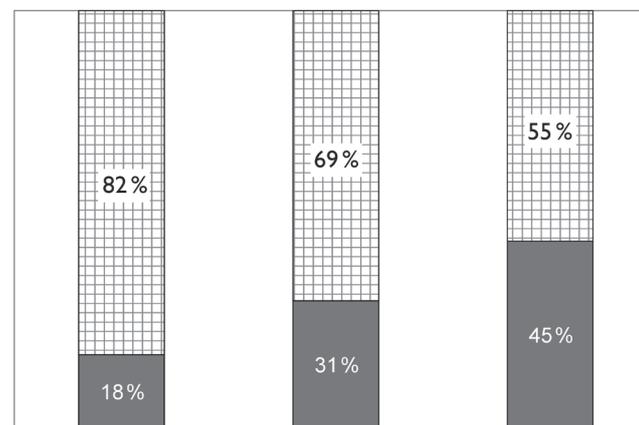
RÉGION	ÉVAPORATION TOTALE DES CULTURES (KM ³ /AN)	% D'EAU BLEUE	% D'EAU VERTE
Europe	220	15 %	85 %
Afrique du Nord et Moyen-Orient	235	53 %	47 %
CEI	780	21 %	79 %
Asie de l'Est	1 670	22 %	78 %
Asie du Sud	1 480	41 %	59 %
Océanie	110	8	92 %
Afrique subsaharienne	1 080	3 %	97 %
Amérique du Nord	650	17 %	83 %
Amérique du Sud	905	11 %	89 %
Monde	7 130	22%	78 %

Source : *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*, Earthscan, Londres, International Water management Institute, Colombo, Sri Lanka, 2007.

À l'échelle mondiale, l'eau bleue ne constitue qu'une faible proportion (22%) de l'eau de la production agricole végétale. Cela interpelle, car les zones irriguées assurent, en revanche, 45% de la production mondiale agricole en valeur, et ce, sur 18% des terres cultivées. La productivité de l'hectare cultivé y est 3,8 fois plus grande qu'en zone pluviale, et celle de l'eau 1,8 fois plus grande. Ces résultats n'ont rien de surprenant : les rendements faibles sont d'abord ceux de la petite agriculture pluviale bénéficiant de moins d'intrants et soumise aux aléas du climat, et les faibles rendements sont synonymes de faible productivité de l'eau. À cet égard,

plusieurs travaux convergent³¹ pour estimer que, si l'ensemble des rendements de céréales inférieurs à 2 t/ha était porté au-delà de cette valeur, l'augmentation de productivité de l'eau permettrait d'économiser jusqu'à 1 500 km³ d'eau.

Proportions respectives des superficies, des quantités d'eau évaporées par les cultures et de la valeur de la production agricole dans les périmètres irrigués et l'agriculture pluviale



Un dernier point mérite l'attention. Les chiffres de l'eau agricole portent facilement à confusion, car ils peuvent référer soit à la production, soit à la consommation alimentaire, et il importe de bien distinguer les deux types de données, notamment lorsqu'on quitte l'échelle mondiale. En effet, entre la production et la consommation, il se produit à la fois des échanges commerciaux et de nombreuses pertes, sur lesquels nous reviendrons. De plus, les estimations d'eau bleue utilisée ne se comparent pas aux chiffres de prélèvements d'eau bleue vus précédemment puisqu'ils n'intègrent pas les « pertes » d'eau de l'irrigation. Cela explique que seuls 1 540 km³/an d'eau bleue soient comptabilisés, le reste des

31. G. de Marsily (dir.), *Les Eaux continentales*, op. cit.

2 600 à 2 700 km³ prélevés (tels que mentionnés au chapitre précédent) retournant donc localement aux nappes souterraines et aux cours d'eau.

COMBIEN D'EAU POUR NOURRIR LA PLANÈTE EN 2050 ?

Y aura-t-il assez d'eau pour nourrir la planète lorsqu'elle comptera 9, voire 10 milliards d'êtres humains ?

Il faut aujourd'hui en moyenne 1 200 m³ d'eau par an ou 3 300 litres d'eau par jour pour produire la nourriture d'une personne. Cet ordre de grandeur signifie qu'avec 1 km³ (1 canal de 10 m de large, de 100 m de profondeur et de 1 000 km de long) on peut produire la nourriture d'environ 1 million de personnes. Pour un pays comme la France qui, sur ses 20 millions d'hectares de terres agricoles, reçoit environ 200 km³ de pluie, il n'y a pas de difficulté à nourrir une population de 60 à 70 millions de personnes en faisant simplement appel à l'eau de pluie. À l'autre extrémité, l'Égypte, avec les 55,5 km³ apportés par le Nil, la pluie étant par ailleurs quasi nulle, ne peut pas nourrir une population de 70 millions de personnes et ne peut prétendre à la souveraineté alimentaire avec les techniques de production actuelle. Entre les deux, la Tunisie reçoit 18 km³ d'eau de pluie sur ses terres agricoles³², mais cette eau tombe pour moitié dans le centre et le sud du pays à raison de moins de 300 mm/an qui ne permettent pas une culture pluviale dans de bonnes conditions. Nourrir une population de 10 millions de personnes y constitue donc aussi un défi important.

Par ailleurs, comme nous l'avons signalé plus haut, la productivité nutritionnelle de l'eau est d'environ 1 kcal par litre d'eau. L'ordre de grandeur de 3 000 litres d'eau par personne et par jour correspond donc aussi au seuil de 3 000 kcal par jour fixé comme seuil de sous-nutrition par la FAO. Près de 1 milliard de personnes dans le monde n'ont pas accès à ce minimum d'énergie, et ce chiffre a peu varié au cours des dix dernières années. Nourrir la planète

supposerait donc dès aujourd'hui une mobilisation supplémentaire d'eau de plusieurs centaines de kilomètres cubes par an. Le chiffre de 500 km³ a été avancé par Rockström³³.

À l'horizon 2050, si la productivité de l'eau n'augmente pas radicalement, et avec 9,1 milliards d'êtres humains, la quantité d'eau à mobiliser sera 50 % plus élevée que celle de l'année 2000, ce qui portera la demande à 10 600 km³ d'eau, auxquels il faudra ajouter 500 km³ nécessaires pour éradiquer la sous-nutrition, soit un total proche de 11 000 km³ d'eau. Ces chiffres, forcément très approximatifs, interpellent. Comment parvenir à mobiliser les 4 000 km³ d'eau nécessaires ? Le développement de l'irrigation ne reste possible à grande échelle qu'en Afrique subsaharienne et en Amérique latine, selon la FAO³⁴. Mobiliser 600 à 800 km³ d'eau bleue supplémentaire à l'horizon 2050 paraît déjà poser un défi très important, et ces quantités ne sont, qui plus est, pas à l'échelle du problème posé. Une bonne part de l'augmentation de production devra donc venir d'une amélioration de productivité de l'agriculture pluviale, dont nous avons vu qu'elle permettrait de réduire jusqu'à 1 500 km³ d'eau les besoins, à production constante.

Le défi posé est énorme, et seule une combinaison d'augmentation de productivité de l'agriculture pluviale, d'augmentation des superficies cultivées et d'augmentation de l'efficacité de l'eau d'irrigation permettra de le relever. L'augmentation de la productivité de l'agriculture pluviale présente la plus grande difficulté car elle touche au développement de la petite agriculture paysanne des pays en développement, trop longtemps délaissée par les modèles dominants. Ce développement est également un défi posé au contrôle de l'urbanisation galopante à laquelle font face de nombreux pays. Il est donc doublement important de s'atteler rapidement à ces questions. Les travaux menés ces dernières années, notamment par l'IWMI³⁵, suggèrent en particulier d'abandonner la dichotomie classique entre agriculture irriguée et agriculture pluviale et d'imagi-

32. M. Besbes, J. Chahed et A. Hamdane, *Bilan intégral des ressources en eau de la Tunisie, sécurité hydrique et sécurité alimentaire*, présentation à l'Académie d'agriculture de France, 4 avril 2007.

33. In *Water for food, water for life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*, op. cit.

34. Food and Agriculture Organisation (FAO), *World Agriculture, towards 2015-30*, Rome, 2003.

35. *Water for food, water for life: A comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*, op. cit.

ner un continuum de techniques allant de la conservation de l'eau des sols à la grande irrigation et permettant d'améliorer la gestion agricole de l'eau.

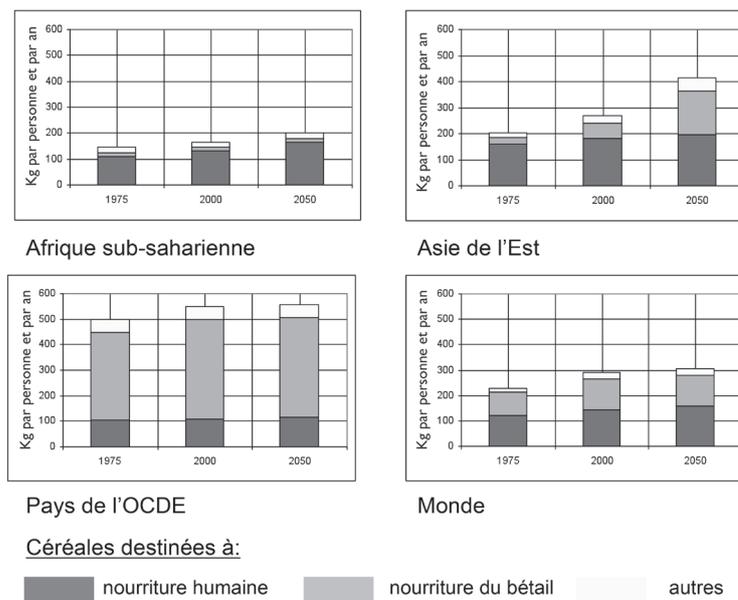
LA CONSOMMATION DE VIANDE : UNE AUTRE CLÉ DE L'AVENIR

Dans les projections faites ci-dessus, nous avons implicitement supposé que les régimes alimentaires restaient identiques dans les prochaines années. Or tout laisse à penser qu'il n'en sera pas ainsi. L'élévation du niveau de vie et l'urbanisation des économies émergentes où vivent environ 5 milliards d'êtres humains conduit à une augmentation de la consommation de produits transformés, en particulier de viande. Comme nous l'avons vu, ces produits ont des demandes spécifiques en eau bien plus élevées que les produits végétaux. La moyenne de 3 300 litres d'eau par habitant et par jour utilisée dans les estimations ci-dessus cache des variations fortes entre des régions où cette valeur atteint à peine 2 000 litres et d'autres où elle est supérieure à 5 000 litres. La marge possible d'augmentation est donc très importante, et ce, notamment dans des pays où les régimes étaient initialement plutôt végétariens comme en Asie. En Chine, par exemple, la consommation de viande par individu est passée de quelques kilos par habitant et par an à plus de 50 entre 1960 et 2000, et une consommation de plus de 80 kg/hab./an est anticipée pour l'année 2050³⁶. Inéluctablement, ces changements de régime alimentaire affectent la demande de céréales, dont une part croissante est produite pour les animaux.

On produit aujourd'hui en moyenne près de 300 kg de céréales par personne et par an dans le monde. De ce total, environ 50 % sont utilisés directement pour l'alimentation humaine, 40 % servent à nourrir le bétail, et environ 10 % à d'autres usages dont les biocarburants. Ces proportions sont très variables suivant les continents et le niveau de développement. Ainsi, en Afrique subsaharienne, la

quantité de céréales par habitant n'est que de 165 kg par personne et par an, et seuls 10 % vont à l'alimentation animale. En Asie de l'Est, le total est de l'ordre de 270 kg par an, la partie consommée directement par les hommes y représente près de 70 %, et l'alimentation animale environ 20 %. Par contraste, il faut 550 kg de céréales par an dans les pays de l'OCDE. Sur ce total, 110 kg (20 %) seulement entrent dans l'alimentation humaine, tandis que 70 % sont destinés à la production de viande et autres produits animaux.

Destination des céréales dans le monde et dans différentes régions



Source : *Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, op. cit.*

La demande de céréales est, et sera donc, de plus en plus dépendante de la consommation de viande. C'est cette dernière, avant les biocarburants et autres productions non alimentaires, qui va déterminer l'évolution de l'agriculture et de ses impacts dans les années à venir. Il est intéressant à cet égard d'examiner les prévisions faites par la FAO à l'horizon 2050. Alors que la demande par

36. *Saving Water: From Field to Fork. Curbing Losses and Wastage in the Food Chain*, Stockholm International Water Institute, Stockholm, 2008.

individu devrait peu augmenter entre 2000 et 2050, la demande totale devrait croître d'au moins 50 %, passant de 1 800 à 2 800 millions de tonnes, sous l'effet de la croissance démographique. Les principales tensions devraient avoir lieu en Asie, sous l'effet d'une combinaison de la croissance démographique et de changements d'habitudes alimentaires, et en Afrique du fait de sa très forte croissance démographique. Elles ajoutent à l'incertitude sur les quantités d'eau nécessaires à la nourriture de la planète en 2050 : la seule croissance de l'Asie pourrait se traduire par une augmentation des besoins en eau agricole de plusieurs centaines de kilomètres cubes.

L'EAU ET L'ÉNERGIE³⁷

La production d'énergie est le second utilisateur d'eau de la planète. L'eau est utilisée pour produire l'énergie primaire (pétrole, charbon, gaz, biomasse...) ainsi que l'électricité. La demande d'énergie croît très rapidement avec le développement économique. Pour s'en rendre compte, il suffit de comparer la consommation d'électricité qui est aujourd'hui d'environ 2 000 kWh/hab./an pour nombre de pays émergents, alors qu'elle est égale ou supérieure à 10 000 kWh/hab./an pour les pays industrialisés. La croissance de la demande sera donc très forte dans les prochaines années, de l'ordre de 40 % d'ici à 2035 d'après l'AIE³⁸. Cela va accroître la compétition avec l'agriculture pour l'utilisation de l'eau, et ce, d'autant plus que les biocarburants vont peser de manière croissante, le doublement de leur production étant attendu dans les dix années à venir³⁹.

Les données relatives aux usages de l'eau pour l'énergie demeurent très imprécises et souvent incohérentes. La distinction entre prélèvements et consommation, pourtant essentielle, est absente de la plupart des données. Le flou dans les définitions se retrouve dans le flou sur les prélèvements industriels qui varient du

simple au double, de 400 à 800 km³/an⁴⁰ selon les estimations, et qui intègrent en théorie l'eau pour l'énergie. Ces valeurs, comme nous allons le voir, n'incluent qu'une petite partie des prélèvements d'eau pour l'énergie.

Les particularités de l'hydroélectricité

Prenons l'exemple de l'hydroélectricité. L'eau est stockée derrière un barrage⁴¹ avant d'être turbinée et restituée au cours d'eau dans un état a priori peu changé, sauf en ce qui concerne sa richesse en sédiments, lesquels se sont déposés dans la retenue. En revanche, la capacité d'autres usagers de l'eau d'utiliser l'eau relâchée est intacte.

Dans le monde, on compte en 2010 au moins 6 862 barrages stockant plus de 0,1 km³ (100 millions de mètres cubes)⁴². Leur nombre total est même bien supérieur, de l'ordre de 40 000 selon la CIGB⁴³, car il existe aussi de nombreux barrages plus petits, qu'il est impossible de tous comptabiliser. Les stocks d'eau pouvant être retenus dans ces barrages sont évalués à 6 197 km³. Cette valeur n'est toutefois d'aucune utilité pour estimer le volume d'eau mobilisé pour l'hydroélectricité, car des quantités bien plus grandes d'eau passent à travers tous les barrages du monde. En effet, la plupart des fleuves sont équipés d'une succession de plusieurs barrages et la même molécule d'eau est utilisée plusieurs fois. Pour estimer la quantité d'eau nécessaire, il vaut mieux partir de la production hydroélectrique qui représente 17 % du total de 18 500 TWh⁴⁴ produits en 2007⁴⁵, soit environ 3 000 TWh. En faisant l'hypothèse que l'énergie provient d'eau chutant d'une hauteur équivalente à 100 mètres et que l'efficacité de la turbine est de 0,8 – valeur admise classiquement –, 1 m³ d'eau produit 0,22 kWh. Il faut alors 4 600 m³ pour produire 1 MWh et donc environ 14 000 km³ d'eau au total. Cet ordre de grandeur donne

37. Une large part des données ci-dessous résulte d'une confrontation de nombreuses données disparates ; voir la fiche « Eau et énergie » téléchargeable sur le site www.eclm.fr pour plus d'explications.

38. Agence internationale de l'énergie.

39. <http://www.oecd.org/site/oecd-faoagriculturaloutlook/productiondebiocarburants.html>

40. Pour en savoir plus sur la distinction entre prélèvements et consommation, voir chapitre précédent et glossaire.

41. À l'exception des centrales prélevant directement dans les cours d'eau, mais qui représentent une infime part de la production.

42. Nous utilisons ici les chiffres de la base GRanD, qui contient une information précise sur les plus grands barrages de la planète. Voir <http://www.gwsp.org/85.html>

43. Commission internationale des grands barrages.

44. 1 TWh = 1 milliard de kWh.

45. Voir : <http://www.edf.com/html/panorama/conso/monde.html>

une idée des quantités gigantesques utilisées pour l'hydroélectricité, mais non intégrées dans les chiffres classiques de prélèvements.

Si l'on ne peut comptabiliser l'eau circulant dans les centrales hydroélectriques comme des prélèvements, il n'en reste pas moins que les retenues génèrent une consommation d'eau par évaporation supérieure à ce qu'elle serait par un cours d'eau non aménagé. Les Nations unies retiennent un chiffre total d'évaporation de 200 km³ annuels de l'ensemble des retenues⁴⁶. Plusieurs estimations ont été réalisées récemment en rapportant les quantités d'eau évaporées de différents barrages à l'énergie produite. Les valeurs obtenues s'échelonnent de 1 à 3 000 m³/MWh et varient en fonction du climat et de l'étendue de la retenue⁴⁷. L'estimation très détaillée de Hoekstra et Mekonnen sur 35 barrages répartis sur les différents continents et représentant 8 % de la capacité hydroélectrique mondiale est de 90 km³/an, soit une valeur moyenne de 244 m³/MWh. Extrapolée à l'échelle mondiale, la consommation totale serait donc de l'ordre de 700 km³/an. Ce chiffre contraste avec une estimation de 5,4 m³/MWh⁴⁸, utilisée dans le travail du World Energy Council et qui aboutit à une consommation très faible (de l'ordre de 16 km³/an) au regard de toutes les autres estimations. La réalité est sans doute comprise entre 200 et 700 km³/an, sachant qu'il est incorrect d'attribuer toute l'eau évaporée à la seule hydroélectricité, les barrages étant la plupart du temps multifonctionnels.

Les autres productions d'électricité

Les autres systèmes de production électrique ont des consommations d'eau faibles. Les centrales thermiques évaporent entre 0,7 et 2,7 m³ d'eau par MWh dans leurs systèmes de refroidissement. Au total, elles consomment de l'ordre de 25 km³ d'eau par an⁴⁹.

46. *Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau. Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau (WWAP), op. cit.*

47. A. Hoekstra et M. Mekonnen, "The blue water footprint of electricity from hydropower", *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 16, 2012.

48. P. H. Gleick (dir.), *Water in crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*, Oxford University Press, Oxford, 1993. Cette estimation est basée uniquement sur des données californiennes.

49. *Water for Energy*, World Energy Council-Conseil mondial de l'énergie, Londres, 2010.

Comme pour l'hydroélectricité, les seuls chiffres disponibles sont ceux des consommations et non des prélèvements, la logique étant que l'eau est peu dégradée en qualité, si ce n'est du point de vue de sa température. Pourtant, les prélèvements peuvent être très importants suivant les types de systèmes de refroidissement. Les systèmes mis en place actuellement fonctionnent de plus en plus en circuit fermé et les prélèvements sont quasiment égaux aux consommations⁵⁰. En revanche, dans les systèmes ouverts, les prélèvements sont très élevés, plus de 100 m³/MWh, et bien supérieurs aux consommations. Aux États-Unis 57 % des centrales et en France 51 % des 58 réacteurs nucléaires utilisent les systèmes à recirculation⁵¹. En extrapolant une proportion de 50 % de systèmes ouverts au monde entier – valeur probablement minimale –, les prélèvements en eau pour le refroidissement seraient donc de l'ordre de 1 100 km³/an.

TYPE DE CENTRALE THERMIQUE	SYSTÈME DE REFROIDISSEMENT	PRÉLÈVEMENTS (M ³ /MWh)	CONSOMMATION (M ³ /MWh)
Énergie fossile	Circuit ouvert	76-189	1,1
	Circuit fermé	1,1-2,3	1,1-1,8
Énergie nucléaire	Circuit ouvert	95-227	1,5
	Circuit fermé	1,9-6	1,5-2,7

Source : Ministère américain de l'Énergie et EDF.

Les sources renouvelables d'électricité sont généralement peu gourmandes en eau. Seules la géothermie et la production par concentrateurs solaires requièrent respectivement de l'ordre de 5,3m³/MWh et 3m³/MWh, ce qui, à l'échelle mondiale, se traduit par une consommation d'eau négligeable. Ici aussi les prélèvements ne sont pas renseignés.

50. Le coût des systèmes en circuit fermé est de 40 % supérieur à celui des systèmes ouverts.

51. A. Vicaud, *Les Besoins en eau de refroidissement des centrales thermiques de production d'électricité*, présentation à la Société hydrotechnique de France, 2007.

L'énergie primaire fossile et nucléaire

La production d'énergie primaire, extraction de pétrole, de charbon ou de gaz, d'uranium et biocarburants, nécessite également de l'eau. Ici encore, les données disponibles se réfèrent à des consommations et non à des prélèvements⁵².

Pour l'énergie non dérivée de biomasse, il faut en moyenne 1,058 m³ d'eau par gigajoule (GJ) pour le pétrole, 0,164 m³/GJ pour le charbon, 0,109 m³/GJ pour le gaz et 0,086 m³/GJ pour l'uranium. L'extrapolation mondiale de ces valeurs conduit à une consommation d'eau de 171 km³ d'eau pour le pétrole, 20 km³ pour le charbon, 11 km³ pour le gaz et 3 km³ pour l'uranium, soit au total une consommation de 205 km³ d'eau par an. Les prélèvements sont a priori supérieurs, mais ils ne sont pas renseignés dans les publications actuelles.

Production et consommation spécifique en eau des principales sources d'énergie primaire, d'après le Conseil mondial de l'énergie

SOURCE D'ÉNERGIE PRIMAIRE	PRODUCTION 2005 (EJ) ¹	PRODUCTION ESTIMÉE EN 2050 (EJ)	M ³ D'EAU PAR GJ	CONSOMMATION D'EAU TOTALE EN 2005 (KM ³)
Pétrole	161	176	1,058	171
Charbon/lignite	121	217	0,164	20
Gaz naturel	98	181	0,109	11
Uranium	30	75	0,086	3
Biomasse	51	120	20-400	
Total	461	769	-	

1. 1 exajoule (EJ) vaut 1 milliard de gigajoules (GJ).

Source : Conseil mondial de l'énergie, 2010.

52. P. Gerbens-Leenes, A. Hoekstra et T. Van der Meer, *Water Footprint of Bio-energy and Other Primary Energy Carriers*, Value of Water Research Report Series n° 29, Unesco-IHE, Delft, 2008.

Biomasse et biocarburants

L'essentiel des consommations d'eau pour l'énergie primaire est toutefois dû à la production de biomasse. Dans les pays en développement, il s'agit surtout de bois, de produits ou sous-produits agricoles ou de déchets organiques. Dans les pays industrialisés ou émergents, il s'agit de plantes cultivées pour la production de biocarburants. L'estimation des prélèvements et consommations d'eau pour ces deux types de biomasse demeure aujourd'hui très partielle. Comme pour l'agriculture pluviale, les consommations d'eau requises pour la production de biomasse traditionnelle ne sont pas comptabilisées dans les usages.

Selon le Conseil mondial de l'énergie, la production mondiale d'énergie par la biomasse représentait en 2005 11 % du total mondial de l'énergie primaire, soit 51 EJ. C'est également celle qui augmente le plus rapidement, de l'ordre de 20 EJ tous les vingt ans. En 2000, la FAO indiquait une production de 40 EJ⁵³, et une valeur de 120 EJ est prévue pour 2050. Pour estimer l'eau nécessaire à cette production, il faut la décomposer en deux grandes catégories : le bois de chauffe et la biomasse d'origine agricole. La première est spécifique au secteur de l'énergie, alors que la seconde est commune aux secteurs agricoles et de l'énergie.

Le bois de chauffe constitue 55 % des 1 750 millions de mètres cubes de bois⁵⁴ produits annuellement. La valeur énergétique moyenne du bois est d'environ 8,7 GJ par mètre cube⁵⁵ et il faut en moyenne 540 m³⁵⁶ d'eau pour produire 1 m³ cube de bois. De ces données, nous déduisons une consommation spécifique d'eau moyenne de 62 m³ d'eau par gigajoule d'énergie produite. Sur ces bases, et en comparant différentes estimations, le bois de chauffe représentait environ 15 EJ en 2000 et 18 EJ en 2005, soit 36 % de l'énergie de biomasse totale. Si on combine ce chiffre avec la consommation spécifique d'eau ci-dessus, la consommation d'eau nécessaire au bois de

53. M. Parikka, "Global biomass fuel resources", *Biomass and Energy*, vol. 27, 2004.

54. *Ibid.*, valeur pour l'année 2000.

55. Voir la fiche eau et énergie téléchargeable sur le site www.eclm.fr

56. Pour la valeur énergétique de différentes sortes de bois, voir notamment : http://www.engineeringtoolbox.com/wood-combustion-heat-d_372.html

chauffe était de 1 110 km³ en 2005. Cette consommation provient quasi uniquement d'eau verte.

Pour la biomasse des produits ou sous-produits agricoles et des déchets organiques, nous nous contenterons d'un ordre de grandeur, sachant que l'eau requise est déjà comptabilisée pour la production agricole mondiale. Un travail approfondi serait en toute rigueur nécessaire pour déterminer précisément les proportions des différentes productions utilisées comme source d'énergie et allouer l'eau utilisée soit à l'alimentation, soit à l'énergie. Nous reprenons le raisonnement du Conseil mondial de l'énergie⁵⁷. Les consommations spécifiques d'eau obtenues varient de 24 m³/GJ en Europe à 142 m³/GJ en Afrique, les valeurs américaines se situant autour de 50-60 m³/GJ. En appliquant ces valeurs aux différents continents (sauf pour l'Asie où une valeur moyenne des autres continents est retenue) aux 64% de biomasse autres que le bois, on obtient une consommation d'eau de l'ordre de 2 000 km³⁵⁸, dont près de 1 900 sont à attribuer à l'Afrique et à l'Asie.

L'augmentation très forte anticipée pour l'énergie de la biomasse conduit aussi à s'interroger sur la consommation d'eau des biocarburants. En 2010, nous produisons 92 milliards de litres d'éthanol et 15 milliards de litres de biodiesel⁵⁹. L'éthanol a une consommation spécifique d'eau allant de 59 m³/GJ à 419 m³/GJ suivant les cultures utilisées⁶⁰, avec une moyenne de 125 m³ d'eau par gigajoule. Un raisonnement similaire conduit pour le biodiesel à une valeur nettement supérieure, de 394 m³ d'eau par gigajoule⁶¹. Les quantités d'eau nécessaires à la production des biocarburants sont donc très importantes, 413 km³, partagées en parts égales entre les deux types de biocarburants.

La progression est, elle aussi, impressionnante, puisqu'un doublement de la production est anticipé entre 2010 et 2020.

57. Ces estimations se réfèrent elles-mêmes aux travaux de Gerbens-Leenes *et al.*, *Water Footprint of Bio-energy and Other Primary Energy Carriers*, *op. cit.*

58. Le Conseil mondial de l'énergie retient pour sa part 50% de bois et aboutit à 1 500 km³ pour les produits et sous-produits agricoles.

59. <http://www.oecd.org/site/oecd-faoagriculturaloutlook/productiondebiocarburants.html>

60. Source : Water Footprint Network.

61. Il faut donc 2,9 m³ d'eau par litre de bioéthanol et 13,6 m³ d'eau par litre de biodiesel.

La consommation d'eau serait alors de 1 063 km³. En revanche, l'énergie totale produite demeurerait extrêmement faible (de 2 à 4% de l'énergie de biomasse). Les cultures bioénergétiques vont donc peser de manière importante sur la production agricole, mais elles risquent surtout de se heurter à de fortes tensions sur la ressource en eau, et ce, dans un avenir très proche.

Production de biocarburants et consommation d'eau requise en 2010 et 2020

	2010	2020
Éthanol		
Production (milliards de litres)	92	166
Consommation d'eau (km ³)	209	481
Énergie produite (EJ)	1,44	3,32
Biodiesel		
Production (milliards de litres)	15	43
Consommation d'eau (km ³)	204	582
Énergie produite (EJ)	0,51	1,46
Total consommation d'eau (km³)	413	1 063
Total énergie produite (EJ)	1,95	4,78

Source : OCDE.

DES USAGES MAL PRIS EN COMPTE

Le tour d'horizon des besoins en eau du secteur de l'énergie aboutit à un constat surprenant : les usages de l'eau pour l'énergie sont très imparfaitement et incomplètement renseignés par les travaux de référence du domaine de l'eau, et les travaux du secteur de l'énergie n'apportent pas davantage de clarté. L'ensemble des données de l'énergie est renseigné en termes d'eau consommée et non pas d'eau prélevée, sans définition précise du terme « consommation ». Les chiffres disponibles ne se comparent donc pas, ou

difficilement, avec les données classiques de prélèvements d'eau bleue. Il reste donc un travail important à faire pour quantifier les usages de l'eau pour l'énergie et les intégrer dans une vision globale.

Au total, la synthèse présentée pour la période 2007-2010 révèle un impact total du secteur sur l'eau bien plus important que celui classique des prélèvements industriels⁶² dans lesquels on intègre généralement l'énergie. Les données de prélèvements pour les centrales thermiques, pour l'hydroélectricité et pour la production de biomasse méritent réflexion. Elles apportent un début d'éclairage sur la compétition entre usages de l'eau pour l'agriculture et l'énergie, ce dernier demeurant aujourd'hui difficile à quantifier tant à l'échelle locale qu'à l'échelle mondiale.

	PRÉLÈVEMENTS (KM ³ /AN)	CONSOMMATIONS (KM ³ /AN)
Énergie primaire		
Combustibles fossiles	Non connu	200
Nucléaire	Non connu	3
Biomasse: bois	0	1 100
Biomasse: autres	Non connu	2 000
dont biocarburants	156 ¹	400
Électricité		
Hydroélectricité ²	11 000-20 000	200-700 ³
Refroidissement des centrales	1 100	15 ⁴ -25 ⁵

1. Une proportion de 30 % d'eau bleue est mentionnée par l'IWMI pour la production de bioéthanol, valeur à corriger des pertes hydrauliques estimées à 30 % également. (*Biofuels and agricultural water use: blue impacts of green energy*. De Fraiture C, Liao Y, Giordano M., Water Policy Vol 10, 2008).

2. Dans ce cas, les consommations ne sont pas incluses dans les prélèvements.

3. La valeur de 70 résulte d'une autre estimation par Gerbens-Leenes, IHE, 2009.

4. En retenant une valeur de 2 m³/MWh.

5. D'après le World Energy Council.

Tant que les ressources en eau bleue paraissaient abondantes, cette difficulté n'était pas préoccupante, d'autant que les deux secteurs trouvent leur compte dans les retenues d'eau générées par les barrages, qui augmentent globalement les ressources disponibles. De nombreux fleuves sont aménagés avec une série de barrages qui font que l'eau utilisée par l'énergie en amont peut encore être théoriquement prélevée pour l'irrigation à l'aval. Lorsque le climat superpose les besoins des deux grands usagers, les synergies sont relativement simples à trouver. En revanche, lorsque ce n'est pas le cas, les tensions peuvent surgir très rapidement, comme le soulignent des événements récents. Ainsi, dans le bassin de la mer d'Aral, les pays de l'amont (Tadjikistan, Kirghizstan notamment) ont des besoins en énergie pendant les mois d'hiver, alors que l'Ouzbékistan, à l'aval, a surtout des besoins d'irrigation en été. Lors de la crise alimentaire de 2008, les prix de l'énergie et de l'alimentation ont flambé simultanément, ce qui a conduit les pays situés à l'amont à produire plus d'énergie pour en vendre aux pays voisins, d'où une crise ouverte entre l'Ouzbékistan et le Tadjikistan, dont les relations sont tendues en raison de la décision du Tadjikistan de construire un barrage de grande capacité sur l'Amou-Daria. Cette situation illustre les crises auxquelles il faut se préparer⁶³. Comme le montre cet exemple, l'absence de prise en compte de l'hydroélectricité comme un usage est loin d'être satisfaisante. Il est essentiel de mettre en place une comptabilité des usages de l'eau qui permette, si ce n'est de prévenir les crises, de pouvoir mieux les anticiper.

La deuxième compétition pour l'eau entre agriculture et énergie résulte des prélèvements pour le refroidissement des centrales thermiques de tous types. Elle est naturellement forte pendant les périodes d'étiage lorsque celles-ci coïncident avec l'irrigation, comme c'est le cas en France. La problématique se double ici d'un fort enjeu relatif aux écosystèmes aquatiques et aux services qu'ils procurent. Les solutions techniques doivent, dans ce cas, passer par la mise en œuvre de circuits de refroidissement en boucle fermée

62. Voir chapitre 2.

63. Des tensions similaires sont en train de se cristalliser entre l'Égypte et l'Éthiopie. Voir « Le barrage qui rend fou les députés égyptiens », *Le Monde*, 5 juin 2013.

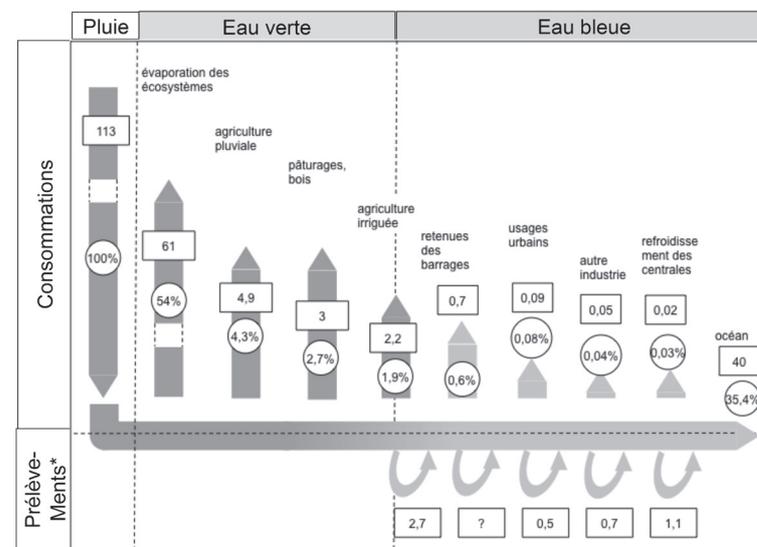
ou à air, qui entraînent toutefois des surcoûts élevés. Les systèmes à refroidissement en circuit fermé sont 40 % plus chers que ceux en circuit ouvert, et les systèmes à refroidissement à air coûtent encore davantage. Les évolutions anticipées de la demande laissent mal augurer de cette compétition. De 15 000 TWh en 2005, la production des centrales thermiques (nucléaires incluses) devrait passer à 40 000 TWh en 2050, soit une augmentation de 160 %.

Enfin, la troisième compétition résulte de la demande en eau de la production de biomasse, tout particulièrement pour les biocarburants. Cette demande devrait au moins doubler⁶⁴ entre 2010 et 2020 et mobiliser au minimum 1 000 km³ d'eau par an, s'ajoutant donc à l'augmentation de la demande pour la nourriture. Des arbitrages seront nécessaires, sauf si les techniques de production des biocarburants évoluent pour utiliser la biomasse non alimentaire et valoriser ainsi beaucoup mieux les productions agricoles.

RETOUR SUR LES USAGES

Une vision d'ensemble des usages de l'eau distinguant clairement les prélèvements et les consommations est plus que jamais nécessaire pour comprendre et anticiper les tensions, les risques de pénuries et de crises. Il est impossible aujourd'hui de dégager une telle vision car les données sur l'énergie ont été jusqu'ici mal intégrées par les experts de l'eau.

Vision d'ensemble des usages de l'eau verte et de l'eau bleue



© D. Zimmer, inspiré de *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*, op.cit.

Partant des données présentées dans les sections précédentes, une représentation d'ensemble⁶⁵ peut être proposée, distinguant prélèvements et consommations, eau verte et eau bleue. Les prélèvements classiques d'eau bleue s'élèvent à 5 000 km³ si on tient compte du refroidissement des centrales thermiques⁶⁶. Ils représentent 12 % des écoulements totaux. La consommation évaporative totale liée aux usages humains est de l'ordre de 11 000 km³, soit 15 % de l'évaporation continentale, dont 2 400 km³ environ proviennent de prélèvements d'eau bleue.

Cette vision d'ensemble des usages de l'eau donne une image un peu plus précise des pressions exercées par les usages humains sur l'eau que celle habituellement proposée. Elle montre qu'à l'échelle mondiale les pressions sur l'eau douce restent modérées. Cela n'est

64. D'après l'OCDE.

65. Le mode de représentation est emprunté au *Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture* de l'IWMI, les données sont révisées avec les chiffres présentés ci-dessus.

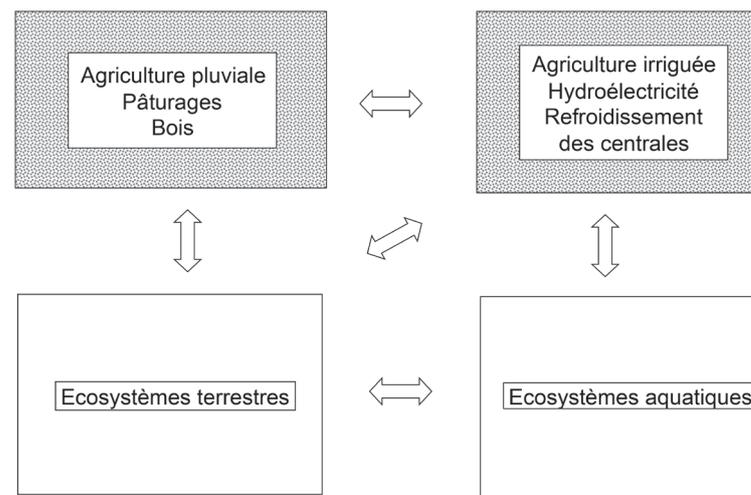
66. L'hydroélectricité n'est en revanche pas intégrée dans ces prélèvements.

évidemment pas le cas à une échelle plus locale, les humains se concentrent fortement sur les territoires. Environ 90 % des habitats humains sont regroupés en effet sur 20 % des terres.

Les prélèvements d'eau par l'homme sont-ils durables? Dans un article publié récemment dans la revue *Nature*, Johan Rockström et de nombreux experts proposent d'identifier les limites⁶⁷ à ne pas dépasser si l'on veut maintenir l'humanité dans une « zone de confort ». Pour l'eau, la frontière proposée est une consommation d'eau bleue de 4 000 km³ par an. Il reste donc de la marge puisque, selon l'article, la consommation totale actuelle peut-être estimée entre 2 000 et 2 700 km³⁶⁸. Deux autres frontières sont très fortement liées aux usages de l'eau : le taux de réduction de « biodiversité » particulièrement préoccupant pour les écosystèmes aquatiques⁶⁹, que l'article considère d'ores et déjà dépassée, et le taux de conversion d'écosystèmes terrestres en agrosystèmes, pour lequel une frontière de 15 % est proposée et dont nous nous rapprochons rapidement avec un taux actuel de 11 %.

On peut tirer de cette analyse quelques idées-forces. Tout d'abord l'eau, en tant que telle, n'est pas le problème, et ce, d'autant qu'une part non négligeable de l'eau évaporée est recyclée sur les continents eux-mêmes. C'est le maintien des écosystèmes qui est fondamental. Or, à travers nos usages de l'eau, nous menaçons de manière directe les écosystèmes aquatiques et les écosystèmes terrestres. L'agriculture entre de plus en plus en compétition avec les écosystèmes « naturels » terrestres⁷⁰, comme nous l'observons dans les régions équatoriales, notamment dans les grands massifs forestiers comme celui de l'Amazonie. L'agriculture irriguée représente, elle, une menace pour les écosystèmes aquatiques. Faut-il alors privilégier l'agriculture irriguée au motif que sa productivité par mètre cube d'eau ou par hectare est élevée, ou l'agriculture pluviale dont la productivité moindre à l'hectare constitue plutôt une menace

pour les écosystèmes terrestres? Il n'y a pas de réponse unique à ce dilemme à l'échelle mondiale, mais une panoplie de solutions tenant compte des réalités locales. Toutefois, les limites d'extension de l'irrigation sont aujourd'hui évidentes, puisque seules l'Afrique et l'Amérique du Sud gardent un potentiel significatif. Au total, la contribution de l'irrigation aux besoins grandissants se limitera à 600-700 km³ dans les prochaines décennies, et ce volume n'est pas à l'échelle du problème. Il faut donc se pencher sérieusement sur la productivité de l'agriculture pluviale, dont les rendements faibles offrent des perspectives énormes, tant pour la production que pour les économies d'eau.



La seconde conclusion sur laquelle il nous faut encore insister est que la crise de l'eau résulte d'une compétition de plus en plus forte entre les prélèvements d'eau bleue pour l'agriculture et pour l'énergie et non d'un réel manque d'eau. Le développement des économies émergentes et l'augmentation colossale de la demande en énergie qu'elle va susciter, la production de biocarburants conjuguée à la croissance démographique et aux risques accrus liés au changement climatique sont les principaux facteurs d'augmentation des tensions. Les zones de crises potentielles sont les régions où certaines de ces tensions seront exacerbées. Les grands bassins-versants

67. En anglais, *planetary boundaries*.

68. L'article indique la valeur de 2 600 km³ en intégrant l'évaporation des retenues, très proche de notre estimation de 2 400 km³.

69. D'après le Millenium Ecosystem Assessment, voir <http://www.unep.org/maweb/en/index.aspx>

70. Certains écosystèmes sont toutefois totalement dépendants des activités agricoles, comme ceux des marais ou des rizières.

L'EMPREINTE EAU

où la géographie tend à opposer l'amont, ayant un pouvoir de stockage d'eau, et l'aval plus peuplé, ayant de fortes demandes d'eau et d'énergie, sont les lieux où les désaccords risquent de provoquer le plus de crises à grande échelle dans l'avenir.

DEUXIÈME PARTIE

VERS UNE NOUVELLE
APPROCHE DES USAGES
DE L'EAU

IV. L'EAU VIRTUELLE, OU COMMENT LA CRISE DE L'EAU ÉCHAPPE AUX EXPERTS

Dans les médias, la crise de l'eau est en général abordée sous l'angle de l'accès à l'eau, dont l'absence affecte près de 1 milliard d'êtres humains, et du manque d'accès aux toilettes qui touche 2,5 milliards d'entre eux. Ces chiffres heurtent nos consciences car le grand nombre de gens concernés nous semble en contradiction avec l'idée que nous nous faisons de l'importance que nous devrions donner à l'eau. Ils sont également lourds de conséquences pour la santé, pour l'éducation et pour les capacités des sociétés à se développer.

LES DEUX FACETTES DE LA CRISE DE L'EAU

De cette « crise de l'accès » aux pénuries d'eau, l'amalgame est facile, et le discours introduit aisément de la confusion. Car le problème n'est pas dû à un manque d'eau en général : il faut de quelques dizaines à plus de 200 litres par personne suivant le niveau de développement pour assurer nos besoins sanitaires quotidiens, et l'eau disponible est en général suffisante, même si les mégapoles doivent souvent aller la chercher loin de leurs centres. Autrefois, il n'était pas facile de trouver de l'eau pure. À la fin du XIX^e siècle, Paris a ainsi tenté de s'approvisionner en eau à plus de 400 km, dans le lac Léman¹. Aujourd'hui, les techniques de potabilisation ont bien évolué. Elles permettent de traiter l'eau des fleuves lorsqu'ils ne sont pas trop pollués. De multiples mégapoles à forte croissance des pays émergents font néanmoins face à des défis similaires. Le progrès des techniques n'ayant pas résolu

1. Voir : <http://www2.cnrs.fr/presse/thema/646.htm>. Les techniques de traitement se perfectionnant, le projet fut définitivement abandonné en 1919.

tous les problèmes, on se heurte en particulier à celui du financement des infrastructures. L'eau n'arrive pas toute seule au robinet et ne se traite pas après usage sans réseaux de tuyaux, de pompes et de stations de traitement. Cette infrastructure coûte cher, et la financer s'avère d'autant plus compliqué que ses bénéfices économiques se chiffrent en amélioration de la santé, en gain de temps, d'éducation et d'énergie, des aménités difficiles à évaluer. L'urbanisation s'accompagne par ailleurs souvent de différences de traitement entre les habitants des centres urbains disposant de réseaux, souvent vétustes certes, mais ayant l'avantage d'exister, et ceux des quartiers périphériques, plus pauvres et n'ayant pas encore accès aux services publics. Qui plus est, l'eau qu'ils utilisent est souvent pompée dans des nappes polluées par les fuites des réseaux existants.

Cette crise des infrastructures de l'eau est celle qui frappe le plus nos consciences, et elle a dominé les débats internationaux des dernières décennies. Les problèmes de l'eau des villes sont plus médiatiques que ceux de l'eau des champs, et les Objectifs du millénaire témoignent de cette polarisation. Les ressources en eau n'étaient pas mentionnées dans la liste adoptée par les chefs d'État en 2000, et ce n'est qu'au sommet mondial sur le développement durable de Johannesburg en 2002 qu'a été pris l'engagement de produire des plans nationaux de gestion intégrée des ressources en eau.

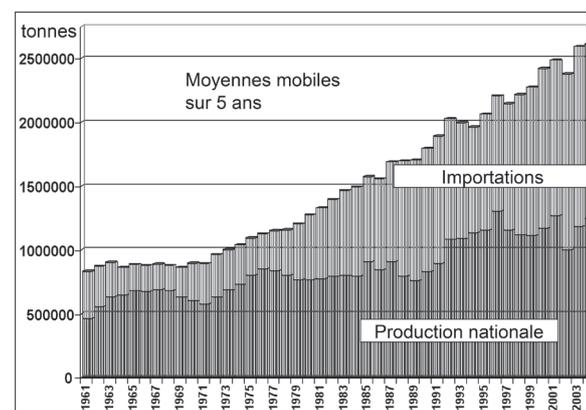
Cette hiérarchie des priorités reflète aussi les différences de valeur et de prix de revient de l'eau. Typiquement, la hiérarchie de ces prix va de 1 pour l'eau agricole à 50 pour l'eau domestique et à 30 000 pour l'eau minérale; une hiérarchie quasiment inverse vaut pour les volumes nécessaires. L'eau agricole est utilisée sans aucun traitement: son prix résulte donc essentiellement de son pompage et de son transport. Pour un agriculteur, ce prix doit pouvoir être plus que compensé par un accroissement de rendement et de revenu pour qu'il soit rentable d'irriguer.

POURQUOI L'EAU DES CHAMPS EST-ELLE MOINS VISIBLE ?

Si l'eau des champs fait moins parler d'elle que l'eau des villes, c'est aussi pour une tout autre raison qui a intrigué le chercheur

anglais Tony Allan dans les années 1990². Il a observé que de nombreux pays arides avaient recours à des importations croissantes de produits agricoles sur les marchés internationaux. C'est notamment le cas des pays de la rive sud de la Méditerranée et du Moyen-Orient, dont les importations de céréales ont atteint en quelques décennies une dépendance de 50 % vis-à-vis des céréales étrangères pour nourrir leur population. La Tunisie produisait dans les années 1960 environ 700 000 tonnes de blé par an et en importait de l'ordre de 200 000 tonnes. Au début des années 2000, elle en produisait environ 1 100 000 tonnes et en importait 1 400 000 tonnes. Des tendances similaires s'observent dans les pays voisins.

Importations de blé par un pays aride. Exemple de la Tunisie de 1961 à 2003



Source : Besbes M., Chahed J., Hamdane A. *Bilan intégral des ressources en eau de la Tunisie, sécurité hydrique et sécurité alimentaire*, présentation à l'Académie d'agriculture de France, 4 avril 2007.

C'est par de telles importations que de nombreux pays ont pu maintenir leur sécurité alimentaire, dans des conditions toutefois précaires comme la récente crise alimentaire de 2008 l'a démontré.

2. T. Allan, *Virtual Water: Tackling the Threat to Our Planet's Most Precious Resource*, I. B. Tauris, Londres, 2011.

Tant que les marchés internationaux permettent d'importer de la nourriture à des prix bas, la situation est confortable. Mais tout change si ce n'est plus le cas. Or, en important des produits agricoles, c'est aussi de manière indirecte de l'eau que ces pays importent. Tony Allan a nommé cette eau, non visible dans les importations, l'«eau virtuelle³». Sa réflexion a été suscitée par des chercheurs israéliens inquiets du développement d'une agriculture mobilisant de grandes quantités d'eau dans leur pays.

Pourquoi dans cette région tellement marquée par l'aridité n'y a-t-il pas plus de conflits liés à l'eau ? Tony Allan a montré que, tant que la disponibilité en produits alimentaires reste suffisante sur les marchés, la crise peut être contenue. Pire, sa relation avec l'eau devient invisible, même pour les experts de l'eau.

Le discours développé autour de l'eau virtuelle a rapidement suscité des polémiques, notamment au Moyen-Orient, tant il souligne la vulnérabilité des pays. Devenir dépendant des marchés internationaux signifie perdre de sa souveraineté sur un des aspects fondamentaux de la sécurité publique, la nourriture. La crise alimentaire de 2008 a, de ce point de vue, été un important révélateur. Les augmentations de prix agricoles, provoquées par des prix de l'énergie très élevés, une faiblesse des stocks mondiaux, une spéculation financière et quelques aléas climatiques, ont surpris de nombreux pays. Dans une pagaille générale, une trentaine de ces pays, tant importateurs qu'exportateurs, ont pris des mesures unilatérales qui n'ont fait qu'attiser le feu et provoquer de nombreuses émeutes de la faim. Au Caire, en plein cœur de la crise, le gouvernement égyptien a décidé de nationaliser du jour au lendemain le commerce du pain. La mesure était censée prévenir l'envolée des prix et le marché noir, et ainsi éviter le déclenchement d'émeutes dans la ville.

Sur le moment, le lien entre cette crise et le manque d'eau n'est simple ni à comprendre ni à démontrer. Des experts égyptiens à qui l'on demandait alors s'il y avait un rapport entre la crise alimentaire et l'eau répondaient que les mesures d'amélioration de la gestion de l'eau mises en place allaient faire leur effet et empêcher

la reproduction de tels problèmes dans l'avenir. Ce type de réponse est classique pour les experts, qui perçoivent les problèmes d'eau à travers le prisme souvent exclusif d'une mauvaise «gouvernance». Le fait qu'une pénurie alimentaire ait un rapport avec un manque d'eau est difficile à concevoir, même pour des spécialistes, peut-être parce qu'ils sont d'abord mobilisés sur la gestion de l'existant. L'eau virtuelle est bien virtuelle pour eux, et il y a plusieurs raisons à cela. L'eau est un sujet suffisamment vaste pour que les formations des ingénieurs de l'eau se concentrent sur sa gestion. Un ingénieur de l'eau a donc surtout des compétences en hydrologie, hydraulique, gestion des réseaux ou génie sanitaire. La compréhension des relations entre agriculture et eau est davantage l'apanage d'ingénieurs agronomes, qui travaillent plus dans les ministères de l'Agriculture que dans ceux des travaux publics où se trouvent souvent les généralistes de l'eau. Une telle dichotomie se rencontre dans de nombreux pays et se répercute sur la compréhension qu'ont les politiques et les décideurs des répercussions du manque d'eau sur l'économie. Par ailleurs, la difficulté vient aussi du fait que l'eau n'a pas d'effet visible, immédiat et indépendant de nombreux autres facteurs sur les crises alimentaires. L'eau interagit avec la démographie, l'exode rural, l'emprise grandissante des villes sur les terres agricoles, pour induire des changements progressifs peu perceptibles. Le jour où la crise apparaît, ce n'est pas l'eau qui en est la cause la plus apparente, ce sont d'autres facteurs plus immédiats comme de mauvaises récoltes ou la spéculation. Pourtant, dans un pays comme l'Égypte, l'eau du Nil ne peut pas fournir l'alimentation d'une population en forte croissance et qui s'urbanise rapidement. Le pays est donc forcément vulnérable aux tensions sur les marchés mondiaux, et cela va s'aggraver dans les années à venir.

La notion d'eau virtuelle oblige à dépasser la pensée classique centrée sur l'eau maîtrisée des gestionnaires. Elle conduit à adopter une approche plus globale et à repenser l'eau à la fois comme un des éléments des problèmes et donc comme un des éléments des solutions. À cet égard, l'eau virtuelle a été vite associée à une démarche visant à résoudre la crise de l'eau et de l'alimentation par l'importation de nourriture sur les marchés. Si un pays peut assurer sa sécurité alimentaire grâce aux importations et aux marchés, la nourriture sera produite là où son coût est le moindre, là aussi où

3. Il avait initialement proposé un autre terme, celui d'eau «include» (*embedded* en anglais), qui n'a pas rencontré de succès.

la disponibilité en eau est la plus grande. Le marché doit valoriser les avantages comparatifs des agricultures et permettre une gestion de l'eau plus efficace.

Cette vision libérale s'est trouvée critiquée par de nombreux experts et de nombreux pays qui percevaient les risques d'une telle approche, sans être pour autant les promoteurs d'une totale souveraineté alimentaire. Elle s'est aussi heurtée à la réalité car la crise de 2008 a rappelé, s'il en était besoin, le caractère déstabilisant des hausses de prix agricoles. Tout semble par ailleurs indiquer que la crise de 2008 n'était qu'un premier soubresaut et que les ingrédients d'un cocktail détonant sont tous présents : prix de l'énergie élevé, production alimentaire croissant moins vite que la population, compétition entre nourriture et biocarburants, diminution des stocks, événements climatiques extrêmes. Face à cela, la réponse internationale se focalise trop souvent sur des mesures de court terme comme le Système d'Information sur les marchés agricoles (AMIS), principal résultat tangible de la réunion du G20 de 2011.

COMMENT ESTIMER LE CONTENU EN EAU VIRTUELLE DES ÉCHANGES ALIMENTAIRES ?

Les échanges d'eau virtuelle sont-ils importants et comment les estimer ? Nous avons vu dans le chapitre précédent que des estimations de l'eau requise pour différents produits sont possibles et disponibles et que, pour un même produit, ces quantités varient en fonction du rendement des cultures et donc de l'endroit où la culture est produite. Mais le contenu en eau virtuelle doit-il être la quantité d'eau réellement utilisée par le pays producteur ou la quantité d'eau virtuellement économisée par le pays importateur ? Il n'y a pas de réponse unique à cette question car les deux informations ont leur utilité. Le pays importateur a intérêt à optimiser l'utilisation de son eau et à produire le plus possible avec ses propres ressources. Ainsi l'Égypte a-t-elle conclu un accord avec la Thaïlande pour y produire le type de riz auquel est habituée la population égyptienne et diminuer la consommation importante d'eau due à cette culture. De son côté, le pays exportateur, souvent plus riche en

eau, peut être intéressé à savoir combien et quel type d'eau il doit mobiliser pour produire et exporter. Car même si l'eau virtuelle n'est pas visible, elle n'en est pas moins de l'eau réelle sur le lieu de production. Enfin, à l'échelle mondiale, il peut être intéressant de déterminer si les échanges de produits alimentaires permettent d'économiser de l'eau et profitent à la planète.

L'estimation des flux d'eau virtuelle se heurte encore à d'autres difficultés car autant il est possible de calculer les besoins relatifs à l'alimentation constituée de produits végétaux, à la base d'autres produits, autant les produits échangés par le commerce sont fréquemment des produits transformés tels que la viande, les huiles ou le sucre. Or, pour chacun de ces produits, les mécanismes de transformation accroissent les incertitudes : quelle est l'efficacité de la transformation mise en œuvre ? Si cette dernière aboutit à différents produits, comment leur allouer l'eau requise ? Par exemple, lorsqu'on produit du coton, on produit aussi de la graine de coton dont on fabrique de l'huile. Quelle règle d'attribution de l'eau utiliser ? Ou encore, lorsque de la viande est exportée, comment tenir compte des parties de l'animal qui sont soit utilisées à d'autres fins, comme le cuir, soit non consommées ? Faut-il allouer les quantités d'eau requises en fonction du poids ou de la valeur des produits ?

L'échelle spatiale de l'évaluation des échanges pose également question. La plupart du temps, on s'intéresse à des échanges entre pays : dans ce cas, les statistiques sont accessibles car le système « pays » est bien défini, et ses frontières bien déterminées. Il n'en va pas de même si l'on s'intéresse aux continents ou à des régions à l'intérieur d'un pays. Dans ces différents cas, les statistiques ou les frontières du système peuvent ne pas être précises. Par ailleurs, les quantités échangées dépendent de l'échelle de l'estimation : dans les échanges intercontinentaux, par exemple, tous les échanges entre pays de ce continent sont invisibles. Les valeurs intercontinentales sont donc plus faibles que la somme de toutes les valeurs internationales du même continent.

La dernière difficulté vient de l'estimation de l'eau virtuelle contenue dans le poisson ou les fruits de mer. Si l'on se place du point de vue du pays exportateur, la quantité d'eau douce nécessaire à la production est généralement négligeable : seule l'aquaculture doit être prise en compte lorsqu'elle utilise des produits agricoles.

En revanche, lorsqu'on se place du point de vue du pays importateur, l'achat de poisson conduit à une économie d'eau qu'on estime en utilisant une équivalence nutritionnelle. On peut, par exemple, calculer la quantité d'eau qu'il aurait fallu mobiliser pour produire la même quantité de protéines.

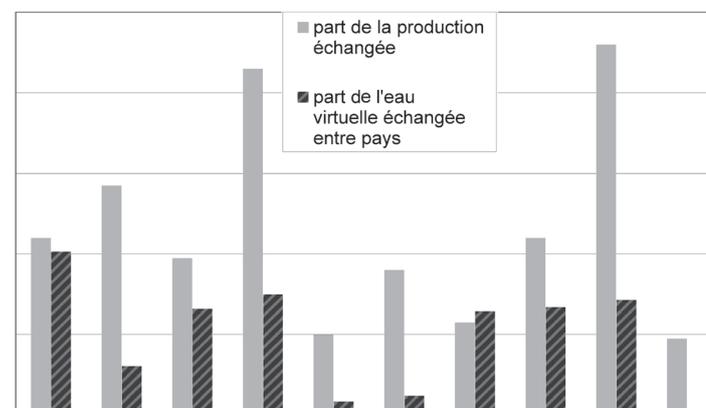
Les estimations du contenu en eau virtuelle sont donc relativement compliquées, et les hypothèses faites devraient toujours être précisées, ce qui est loin d'être le cas. Retenons aussi qu'il n'y a pas une valeur unique du contenu en eau virtuelle, mais que, suivant les points de vue, différentes valeurs sont possibles.

QUEL ORDRE DE GRANDEUR PLANÉTAIRE ?

Les estimations des volumes d'eau virtuelle échangés entre pays et leurs évolutions reposent sur les informations du commerce international des bases de données de la FAO ou du ministère étatsunien de l'Agriculture. La difficulté d'estimation des rendements et de l'efficacité de l'eau telle qu'abordée au chapitre précédent se pose ici beaucoup moins car les cultures vouées à l'exportation ont des rendements relativement élevés⁴. La quantité d'eau virtuelle est donc, pour un produit donné, quasiment proportionnelle au volume échangé.

L'eau virtuelle des produits alimentaires échangés entre pays est estimée à 1 600 km³ par an en moyenne pour la période 1996-2005⁵, un volume d'eau gigantesque égal à trente fois ce que le Nil apporte chaque année à l'Égypte. Elle représente en proportion environ 20 % de l'eau nécessaire à la production agricole mondiale, soit une proportion du même ordre que la part des produits échangés entre pays.

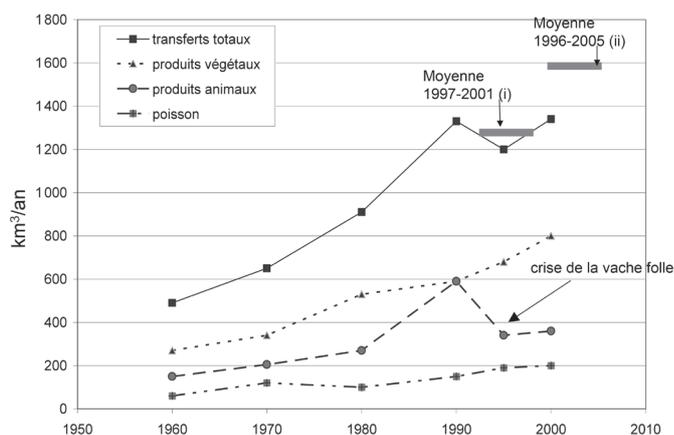
Parts de la production totale et de la quantité d'eau virtuelle totale échangées entre pays de différentes cultures



Ces volumes d'eau virtuelle augmentent d'environ 3 % par an de manière assez régulière depuis les années 1960. Ils ont depuis lors été multipliés par plus que trois. Seul le début des années 1990 les a vus régresser en raison de la diminution très nette des échanges de viande due à la « crise de la vache folle ». Les produits végétaux contribuent pour près de 60 % à ces échanges, les produits animaux représentant les 40 autres pourcents. Une analyse plus fine montre que les céréales représentent 20 % du total, l'huile 15 %, les sucres 6 %, la viande 13 %, et les fruits et légumes chacun 2 à 3 %.

4. Les estimations mondiales de différents auteurs sont donc relativement convergentes.

5. A. Hoekstra et A. Chapagain, Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern, *Water Resources Management*, 2007.



Source : D. Zimmer, D. Renault, *Virtual water in food production and global trade. Review of methodological issues and preliminary results*. Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of Water Research Report N°.12, IHE, Delft, 2003, et A. Hoekstra et A. Chapagain, *Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern*, op.cit, pour (i) et (ii).

QUI IMPORTE, QUI EXPORTE ?

Sans grande surprise, on trouve parmi les principaux pays exportateurs d'eau virtuelle les pays exportateurs de produits alimentaires que sont les États-Unis, le Brésil, l'Argentine, l'Australie et le Canada. Ces pays exportent en général plus de 100 km³ d'eau virtuelle par année, plus de 300 km³ même pour les États-Unis. Sachant que 1 km³ permet de nourrir 1 million de personnes, ces quantités d'eau donnent une idée de la dépendance des pays importateurs vis-à-vis de ces pays et des quantités gigantesques d'eau mobilisées dans ces pays producteurs. D'autres pays comme la Chine ou la France sont à la fois grands exportateurs et grands importateurs d'eau virtuelle.

Les grands pays importateurs sont principalement des pays industrialisés, dont plusieurs pays européens comme l'Allemagne, le Royaume-Uni, l'Italie, les Pays-Bas, ou encore le Mexique et le Japon.

Principaux pays importateurs et exportateurs d'eau virtuelle

IMPORTATIONS ANNUELLES (km ³)		EXPORTATIONS ANNUELLES (km ³)	
PAYS	VOLUME	PAYS	VOLUME
États-Unis	234	États-Unis	314
Japon	127	Chine	143
Allemagne	125	Inde	125
Chine	121	Brésil	112
Italie	101	Argentine	98
Mexique	92	Canada	91
France	78	Australie	89
Royaume-Uni	77	Indonésie	72
Pays-Bas	71	France	65

Source: Mekonnen M., Hoekstra A., National Water Footprint Accounts. *The blue, green and grey water footprint or production and consumption*. Research Report Series 50, UNESCO-IHE, 2011.

Les comptes consolidés des échanges d'eau virtuelle dressent une géographie des interdépendances et des principaux flux d'eau. Les pays les plus dépendants sont le Mexique, le Japon, l'Allemagne, l'Italie, l'Espagne, l'Algérie et l'Arabie Saoudite. À l'inverse, les plus grands exportateurs sont les États-Unis, l'Argentine, le Brésil, l'Inde et l'Australie. Globalement l'Europe, l'Afrique et le Moyen-Orient constituent les principales régions d'importation, les Amériques et l'Océanie les principales régions exportatrices.

Les plus grands « fleuves » d'eau virtuelle s'écoulent entre les États-Unis, d'une part, le Mexique, le Japon, la Corée et la Chine, d'autre part, ainsi qu'entre l'Australie et le Japon.

L'EAU VIRTUELLE PERMET-ELLE D'ÉCONOMISER L'EAU ?

Les grands flux d'eau virtuelle ne semblent pas être principalement induits par le manque d'eau dans les régions sèches. Ils résultent plutôt de la globalisation du système alimentaire mondial, à laquelle contribuent d'abord les pays les plus industrialisés.

En témoigne le fait que ces flux sont dominés par des transferts de produits transformés, riches en eau virtuelle. Lorsqu'on raisonne en flux d'eau virtuelle par habitant, les pays arides figurent en général parmi ceux qui importent une part importante de leur eau, mais là encore, la pauvreté en eau paraît moins déterminante que la situation économique ou la situation géographique des pays. Toutes les îles sont par exemple fortement dépendantes des importations.

Une des manières de quantifier l'importance de l'eau virtuelle dans la réduction des tensions est d'analyser les économies d'eau permises par les échanges. Lorsqu'un pays a une productivité de l'eau faible et qu'il importe des aliments d'un pays où la productivité de l'eau est élevée, ses importations induisent une économie d'eau à l'échelle planétaire. Au total, en comparant ces productivités de l'eau, on a pu évaluer ces économies théoriques à 350 km³⁶. Cela témoigne que les exportations se font bien la plupart du temps depuis les pays à forte productivité en eau. Les économies d'eau sont dues pour l'essentiel aux céréales (220 km³) et aux cultures oléagineuses (68 km³), les autres productions, et notamment la viande, n'engendrant que peu d'économies. L'explication tient au fait que les cultures vivrières sont souvent exploitées de manière peu intensive, notamment dans les pays émergents ou en développement, car, n'étant pas vouées à être commercialisées et ne générant pas de revenu monétaire, elles ne font pas l'objet de la même attention de la part des agriculteurs. Les principales économies d'eau sont dues aux transferts des États-Unis vers le Mexique, vers de nombreux pays africains et vers la péninsule Arabique, et pour une autre part aux exportations de riz asiatique, de Thaïlande notamment, vers l'Afrique et la péninsule Arabique.

Les économies d'eau virtuelle ont-elles un impact sur l'eau de la planète? Les quantités économisées représentent 5% environ de toute l'eau nécessaire à l'agriculture, ce qui n'est pas négligeable. Toutefois, même si une part d'entre elles réduit probablement les tensions sur l'eau, une majorité provient avant tout de la globalisation des échanges. La question est donc de savoir si le prix à payer

pour ces économies se justifie et s'il ne vaudrait pas mieux pour les pays importateurs investir dans une meilleure productivité de l'eau de l'agriculture, pluviale notamment. Nous reviendrons sur cette question, mais il faut ici encore insister sur un point essentiel: de nombreux pays arides *doivent* importer des produits alimentaires et de l'eau virtuelle car ils n'ont simplement pas assez d'eau pour produire leur nourriture. Ces importations obligatoires ne pourront qu'augmenter dans les années à venir et pèseront sur les marchés mondiaux, notamment de céréales. Elles devront donc être raisonnées et entrer dans une véritable stratégie de sécurité alimentaire qu'il faudra, autant que faire se peut, envisager à l'échelle régionale et non purement nationale.

L'étude des échanges d'eau virtuelle révèle également des faits troublants qui éclairent la complexité du déterminisme des échanges. À l'intérieur de la Chine⁷, par exemple, 52 km³ d'eau virtuelle sont amenés du Nord relativement pauvre en eau vers le Sud beaucoup mieux pourvu. Cette situation est d'autant plus surprenante que les pénuries d'eau du nord de la Chine conduisent les gestionnaires de l'eau à transporter des quantités d'eau gigantesques du bassin du Yangzi Jiang au sud vers le bassin du fleuve Jaune au nord. Une situation que l'on retrouve aussi en Inde où des volumes de 46 km³⁸ sont transférés du Nord aride vers le Sud-Est beaucoup plus humide. Dans les deux cas, la région exportatrice est moins densément peuplée et a une forte tradition d'irrigation qui lui permet de produire plus que les stricts besoins de sa population. En revanche, dans la région importatrice, la disponibilité de l'eau a conduit à de fortes densités de population. Ainsi, dans le sud de la Chine, les superficies des exploitations agricoles familiales sont très faibles, souvent de l'ordre de l'hectare, et ne permettent pas de produire beaucoup plus que les stricts besoins vivriers. Cette situation illustre la complexité des relations entre disponibilité en eau, démographie et dynamique de développement. Ainsi que la difficulté de corréler les transferts de produits agricoles au seul facteur eau.

6. A. Chapagain, A. Hoekstra et H. Savenije, Water saving through international trade of agricultural products, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 10, 2006.

7. A. Hoekstra, *Water Footprints of Consumers and Producers*, présentation à la World Water Week, Stockholm, 2008.

8. *Ibid.*

V. DE L'EAU VIRTUELLE À L'EMPREINTE EAU

Le concept d'eau virtuelle, forgé dans le milieu des années 1990, a été popularisé au début des années 2000. Le Forum mondial de l'eau a connu sa première session sur le thème « eau virtuelle et géopolitique » en 2003, et très rapidement des estimations de flux d'eau virtuelle ont été publiées. En 2008, Tony Allan s'est vu décerner le Prix de l'eau de Stockholm. Malgré ce succès, les débats ont vite souligné les limites du concept, à commencer par la focalisation sur les échanges internationaux. Ne faudrait-il pas développer une approche permettant de regarder aussi ce qui se passe à l'intérieur des pays ? Et, dans ce cas, réintégrer l'ensemble des usages de l'eau dans une vision et des concepts communs ? Le rapprochement de ces idées avec la notion d'empreinte écologique semblait logique, d'autant que d'autres empreintes, telle l'empreinte carbone, faisaient aussi leur apparition dans les débats sur l'environnement.

UNE APPARENTE FILIATION AVEC L'EMPREINTE ÉCOLOGIQUE

L'empreinte écologique est définie comme la « superficie géographique nécessaire pour subvenir aux besoins d'une population et en absorber ses déchets ». Pour la déterminer, on doit connaître l'ensemble des processus qui conduisent à la fabrication d'un produit, et pour chacun d'eux être capable de convertir l'énergie et les ressources naturelles en un équivalent de superficie nécessaire à sa production. Comme dans l'approche d'analyse de cycle de vie, toutes les étapes, de la production jusqu'au traitement des déchets générés, sont prises en compte. La force du concept est de fournir un outil permettant d'évaluer et de comparer des produits très différents. Sous sa forme la plus médiatisée, l'empreinte écologique donne une idée du nombre de planètes Terre dont l'humanité aurait

besoin pour soutenir son mode de vie. Si ce nombre est supérieur à 1, l'humanité déprécie son capital naturel, ce qui signifie que son développement n'est pas durable.

Un élément essentiel de la notion d'empreinte est qu'elle met le consommateur, tout autant voire davantage que le producteur, devant ses responsabilités. Bien qu'on puisse calculer l'empreinte – écologique ou autre – de la production de tel ou tel produit, cette notion trouve tout son sens lorsqu'on l'utilise à l'échelle individuelle ou d'une société. Chacun peut très rapidement avoir une estimation de son empreinte écologique. C'est en grande partie la raison du succès du concept : il permet au citoyen de redevenir acteur de son mode de vie et de consommation. L'empreinte eau hérite en cela de l'empreinte écologique et se différencie de l'eau virtuelle, centrée sur la production et les échanges, pour redonner une place importante à la consommation.

Par analogie avec l'empreinte écologique, l'empreinte eau est un indicateur de la manière dont les humains s'approprient les ressources en eau douce de la planète et ont un impact sur elles. Cette empreinte est une estimation de la quantité d'eau douce annuelle totale requise pour la production des biens de consommation et pour la correction des impacts sur l'eau de cette production. Mais cette estimation est très différente de celle élaborée classiquement pour les usages, fondée sur les prélèvements. Ces derniers n'interviennent pas, ou de manière très indirecte, puisque l'empreinte eau comptabilise d'une part l'eau évaporée, qu'elle soit d'origine bleue ou verte, et d'autre part l'eau dégradée par les usages (eau grise). On parle donc d'empreintes « eau bleue », « eau verte » et « eau grise ». Cette dernière traduit le fait que tout rejet conduisant à une dégradation de la qualité de l'eau et des systèmes aquatiques devrait être en quelque sorte compensé par un apport d'eau de bonne qualité afin de réduire la pollution en la diluant. Elle reste aujourd'hui estimée de manière grossière, et dans les estimations disponibles, les valeurs retenues sont généralement faibles. Cela constitue une différence avec l'empreinte écologique qui s'est développée en partant des notions de biocapacité ou de résilience des écosystèmes. L'empreinte eau dérive, elle, de la notion d'eau virtuelle, et donc d'une approche centrée sur les volumes d'eau nécessaires à la production, la biocapacité, dans ce cas précis la capacité des

écosystèmes aquatiques à maintenir leurs capacités épuratoires, devant donc être rajoutée au concept. En revanche, cette filiation entraîne très logiquement la prise en compte de l'eau virtuelle des produits importés et exportés.

L'EMPREINTE EAU ET SES COMPOSANTES

Tout comme les autres mesures de nos usages de l'eau, l'empreinte eau est un volume d'eau utilisé au cours d'une année. Cette dimension annuelle est souvent perdue de vue. Or on ne peut comparer des empreintes eau à des volumes d'eau utilisés pour nos usages qu'en se référant à ce temps annuel qui nous rappelle le caractère renouvelable des ressources en eau. Ce point est important pour le contenu en eau des produits animaux, par exemple. Si produire 1 kg de viande de bœuf requiert 13 000 litres d'eau, mais que cette production s'étale sur trois années, l'empreinte eau de cette viande devrait en toute rigueur être le tiers de ces 13 000 litres. En revanche, pour un animal dont le cycle de production est de six mois, l'ensemble des besoins en eau s'applique sur l'année. Ce point est très peu discuté dans les travaux présentés ces dernières années. Observons également qu'il traduit l'importance du positionnement en tant que producteur ou de consommateur. Du point de vue du producteur, la rigueur impose de tenir compte non seulement de la durée de production, mais aussi des animaux plus jeunes, encore dans leur phase d'élevage et qui ne seront commercialisés que les années suivantes. Le consommateur, lui, peut se contenter d'une approche simple et affecter toute l'eau des trois années dans l'empreinte eau, en faisant l'hypothèse que d'autres animaux sont déjà en cours d'élevage pour la viande des années suivantes.

Tout comme l'eau virtuelle, l'empreinte eau est un indicateur et non une mesure exacte, et de nombreuses hypothèses doivent être faites pour la calculer. Ainsi, il faut connaître les techniques de production, les types d'eau utilisés et les rejets éventuels dans les cours d'eau. Les valeurs diffusées jusqu'ici sont généralement des estimations moyennes calculées pour une région ou un pays, pour des produits agricoles et quelquefois pour des grandes entreprises. La part « eau grise » est celle qui pose le plus de problèmes. Son évaluation

se heurte non seulement à l'absence de données relatives à des produits spécifiques, mais aussi à un manque de connaissances sur les besoins de dilution en compensation des charges polluantes. Aussi, dans les derniers travaux disponibles, les taux moyens de traitement des eaux usées sont utilisés pour calculer les volumes d'eaux usées traitées. Seuls les volumes d'eaux usées non traitées contribuent à l'empreinte eau grise, et le facteur de dilution considéré est de 1 pour 1 : l'empreinte eau grise est donc égale aux volumes rejetés sans traitement.

Les difficultés d'estimation des composantes de l'empreinte eau sont contournées en utilisant deux approches complémentaires : une approche descendante qui désagrège les statistiques nationales de production, de prélèvements d'eau, de traitement d'eau et d'échanges commerciaux ; une approche ascendante qui part des produits et des estimations moyennes de leur contenu en eau virtuelle. Beaucoup reste cependant à faire pour développer les bases de données et de connaissances nécessaires à des estimations précises. Des approches partant d'une analyse de cycle de vie d'un produit sont indispensables pour progresser, et leur développement suit un cours parallèle sur lequel nous allons revenir.

EMPREINTE EAU ET DURABILITÉ DES USAGES

Le succès de l'empreinte écologique tient à sa capacité à sensibiliser au caractère limité des ressources en sols disponibles pour l'humanité. Le fait que notre mode de vie requière plus d'une planète est ainsi considéré comme un bon indicateur du caractère non durable du mode de vie des pays industrialisés. Avec l'eau, un tel raisonnement n'est pas possible, étant donné son caractère renouvelable. Comment, dès lors, le concept peut-il nous aider à raisonner la durabilité de notre utilisation de l'eau ?

Il existe en fait plusieurs approches complémentaires de ces questions. Suivant l'échelle territoriale, suivant le type de produit, suivant les acteurs, le concept d'empreinte eau est à géométrie variable. Pour certains acteurs, notamment industriels, des approches centrées uniquement sur l'eau bleue dont l'usage est plus facilement quantifiable, et qui surtout semblent refléter mieux les

tensions sur la ressource, paraissent plus adaptées. Le groupe Veolia a ainsi développé un « indice d'impact sur l'eau⁹ » qui, sur un territoire donné, intègre les prélèvements et les rejets, la qualité de l'eau prélevée et rejetée et le stress hydrique. D'autres approches utilisent l'analyse de cycle de vie et sont particulièrement adaptées à la comparaison de filières de production. La multiplicité de ces approches témoigne du besoin actuel de trouver des outils permettant de mieux appréhender la rareté en eau afin d'en tirer des conclusions opérationnelles. Elle témoigne aussi des différentes manières de percevoir la consommation et les usages de l'eau. Ce foisonnement d'idées n'est pas mauvais car il force le débat et oblige l'ensemble des acteurs à approfondir leur réflexion. Il est vraisemblable que plusieurs approches complémentaires émergeront.

L'approche fondée sur l'eau virtuelle et sur l'eau consommée est celle qui aujourd'hui nous invite le plus à redéfinir la manière dont nous utilisons l'eau. Et ce, pour plusieurs raisons : elle sensibilise l'ensemble des acteurs, des producteurs aux consommateurs, aux impacts ; elle fournit une « métrique » permettant des comparaisons et une réflexion très large sur l'utilisation et les pénuries d'eau ; elle permet enfin une réflexion à l'échelle planétaire. Ce dernier critère est tout particulièrement important si l'on souhaite forger pour l'eau des outils à la hauteur des enjeux et à l'égal de ceux déjà disponibles pour le climat ou la biodiversité.

Enfin, cette démarche a suscité la création d'un réseau mondial¹⁰ auquel contribuent de nombreuses institutions et des acteurs très variés qui affinent progressivement les outils d'évaluation et la manière de les utiliser¹¹.

9. Voir doc sur l'Indice d'Impact sur l'Eau, <http://www.veoliaeust.com/developpement/empreinte-eau/indice-impact-eau/>

10. Le Water Footprint Network a été créé par Arjen Hoekstra, aujourd'hui professeur à l'université de Twente aux Pays-Bas.

11. La somme des approches développées est disponible dans l'ouvrage de A. Hoekstra, A. Chapagain, M. Aldaya et M. Mekonnen, *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard* Earthscan, Londres, 2011, auquel ont contribué des centaines d'experts internationaux et auquel nous empruntons de nombreux aspects méthodologiques.

ESTIMATION DE L'EMPREINTE EAU MONDIALE

Tout comme l'eau virtuelle dont elle dérive, l'empreinte eau peut être estimée à l'échelle mondiale et nationale avec une approche essentiellement descendante, en partant des quantités d'eau mobilisées et utilisées dans les différents pays et en utilisant des bases de données comme celles de la FAO ou du ministère étatsunien de l'Agriculture¹². Ces estimations fournissent un premier cadrage et permettent d'intercalibrer les méthodes utilisées. L'analyse la plus récente et la plus élaborée est celle du Water Footprint Network publiée en 2012¹³. Les valeurs publiées sont des moyennes obtenues pour la période 1996-2005.

Composition de l'empreinte eau mondiale

EMPREINTES PLANÉTAIRES (EN KM ³ /AN)	CULTURES	PÂTURES ET BOISSONS ANIMAUX	INDUSTRIE	EAU DOMESTIQUE	TOTAL	POURCENTAGE DU TOTAL
Empreinte eau verte	5 771	913	0	0	6 684	74%
Empreinte eau bleue	899	46	38	42	1 025	11%
Empreinte eau grise	734	0	362	282	1 378	15%
Total empreinte eau	7 404	959	400	324	9 087	100%
%	81,5%	10,5%	4,4%	3,6%	100%	

Source : A. Hoekstra, M. Mekonnen, *The water footprint of humanity*, PNAS, vol 109, 2012.

12. D. Zimmer et D. Renault, pour une comparaison des sources de données, "Virtual water in food production and global trade: Review of methodological issues and preliminary results", *op. cit.*

13. D'après Hoekstra et Mekonnen, *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*, *op. cit.*

L'agriculture occupe une part prépondérante avec plus de 90 % de l'empreinte eau mondiale. Cette proportion est cohérente avec les estimations classiques et tient au mode de consommation de l'eau par évaporation de l'agriculture. Il s'agit surtout d'eau verte, et l'on retrouve l'ordre de grandeur de 7 000 km³/an d'eau pour la production cultivée. L'empreinte eau des pâturages et de l'élevage associé a été estimée en distinguant des modes de production plus ou moins intensifs. L'empreinte eau bleue des cultures paraît faible (899 km³/an), et nettement moindre que les 1 500 km³ mentionnés plus haut. Mais l'agriculture a également une empreinte eau grise élevée, de plus de 700 km³/an, due aux rejets d'eau non traitée et aux pollutions qu'ils provoquent. L'industrie et les usages urbains et sanitaires représentent chacun environ 4 % de l'empreinte totale, ils ont pour l'essentiel une empreinte eau grise témoignant des volumes d'eaux usées rejetés sans aucun traitement. L'eau des stations d'épuration est considérée sans empreinte alors qu'elle n'a en général été épurée que de sa charge organique et que l'impact de ses rejets doit être atténué par les écosystèmes aquatiques. Les eaux usées non traitées ne comptent pour leur part qu'en proportion des volumes rejetés. Cette approche simpliste ne résulte pas d'un manque de connaissances, mais bien plutôt d'un manque d'information disponible sur l'intensité et la couverture géographique du traitement des eaux usées dans de nombreux pays¹⁴.

Globalement, l'empreinte eau verte, avec près de 6 700 km³/an, représente 74 % de notre empreinte eau, l'empreinte eau bleue 11 % avec 1 025 km³/an, et l'empreinte eau grise 15 % avec 1 378 km³/an. L'empreinte eau totale s'élève à 9 087 km³/an, soit 1 385 m³ d'eau par personne et par an ou encore près de 3 800 l/jour

Cette estimation est cohérente avec les chiffres classiques des usages présentés plus haut, l'apport principal étant de préciser les parts respectives des eaux bleues, vertes ou grises de nos usages. Elle souffre aussi d'une faiblesse similaire en passant sous silence certaines

14. L'ouvrage de H. Le Goas, L. Millair, B. Barillon, S. Martin et P. Dauthuille, *Outil de calcul de l'eau grise dans le concept de l'empreinte eau : aide à la mise en œuvre de la DCE pour un système d'assainissement* (Novatech 2010), montre que, pour 1 m³ d'eau de station d'épuration déversé, le besoin en dilution est évalué à 27 m³ ou 800 m³ pour deux molécules polluantes analysées. Ces données conduisent à l'évidence à des valeurs d'empreinte eau grise bien supérieures à celles répertoriées dans les travaux disponibles.

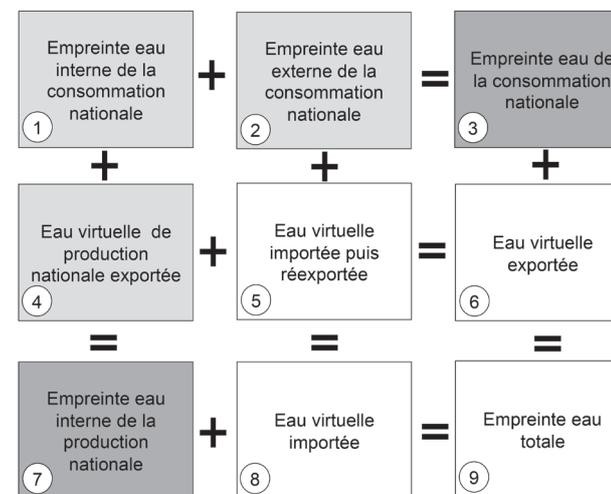
empreintes liées à l'énergie, et notamment l'empreinte de la biomasse traditionnelle utilisée pour le bois de feu et celle des retenues de réservoirs. L'empreinte eau totale des usages humains pourrait donc bien être supérieure de 2000 à 3000 km³/an aux chiffres publiés.

LES EMPREINTES NATIONALES, ASPECTS COMPTABLES

Le principal intérêt de l'approche ne réside toutefois pas dans cette estimation globale, mais dans des analyses plus détaillées, au premier rang desquelles les analyses nationales. À cette échelle, il importe de bien démêler l'origine de l'eau utilisée pour produire les biens consommés. La figure ci-après, tirée du manuel sur l'empreinte eau¹⁵, permet de clarifier les choses. Un pays utilise d'abord l'eau dont il dispose pour produire des biens consommés par sa population (1). Pour satisfaire les besoins, il importe également des biens qui ont une empreinte eau externe (2). La somme de ces deux premières grandeurs constitue l'empreinte eau de consommation nationale (3). Pour avoir une vue d'ensemble, il faut compléter le panorama par l'empreinte de la production exportée qui résulte à la fois de produits utilisant les ressources en eau du pays (4) et de produits importés pour être transformés et réexportés (5). Ces autres composantes permettent de définir à leur tour l'empreinte eau interne de la production du pays (7) ainsi que les volumes des exportations (6) et des importations (8) d'eau virtuelle. L'empreinte eau totale (9) est un indicateur intégrant toutes eaux internes et externes utilisées ou circulant vers un pays. Ce dernier indicateur est en fait beaucoup moins utile, d'une part, que l'empreinte eau interne de la production nationale (7), qui intègre la mobilisation de l'ensemble des ressources en eau du pays pour des activités de production, et, d'autre part, que l'empreinte de la consommation nationale (3), indicateur des pressions exercées sur les ressources en eau de l'ensemble des produits consommés dans le pays. Les indicateurs (2) et (4) traduisent, eux, la dépendance d'un pays à l'eau virtuelle importée d'autres pays et exportée vers d'autres pays.

15. A. Hoekstra, A. Chapagain, M. Aldaya et M. Mekonnen, *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*, op. cit.

Les composantes de l'empreinte eau



Source : *The Water Footprint Assessment Manual*, op. cit.

Le formalisme proposé conjugué à la différenciation des trois types d'eau a le mérite de différencier les points de vue des consommateurs et des producteurs et d'intégrer la notion d'eau virtuelle dans une vision globale des usages de l'eau, non limitée aux seuls échanges. Lorsque les impacts des eaux rejetées après usage sur les milieux récepteurs seront pris en compte de manière plus satisfaisante, il sera aussi possible d'intégrer l'approche classique fondée sur les prélèvements. Toutes les parties prenantes de l'eau doivent pouvoir y puiser des informations utiles pour guider leur action ou influencer leur comportement.

LES EMPREINTES NATIONALES, QUELQUES RÉSULTATS

La Chine, l'Inde et les États-Unis sont sur le podium des plus fortes empreintes eau internes de production nationale (plus de 1000 km³/an). Ils concentrent à eux trois 38% de cette empreinte. Le quatrième pays de la liste est le Brésil, avec une empreinte de

production d'environ 500 km³/an. Le détail de ces empreintes révèle une empreinte eau bleue colossale pour l'Inde (243 km³/an) et une empreinte eau grise pour la Chine de 360 km³/an, soulignant le besoin gigantesque de traitement des eaux usées de ce pays.

Les transferts internationaux d'eau virtuelle s'élèvent à 2 320 km³/an¹⁶, le quart de l'empreinte eau mondiale. Ils sont attribués pour 76 % au commerce de produits agricoles végétaux et pour 12 % au commerce de produits animaux et industriels. Les types d'eau impliqués dans ces transferts sont pour 68 % de l'eau verte, 13 % de l'eau bleue et 19 % de l'eau grise. L'impact de la mondialisation des échanges ne se mesure pas uniquement en termes d'économie d'eau agricole (voir chapitre précédent), mais aussi en augmentation des pollutions et de l'empreinte en eau grise en raison de l'absence de traitement des eaux usées dans les pays émergents.

L'empreinte eau individuelle de consommation était en moyenne de 1 385 m³/an pendant la période 1996-2005, avec des variations entre pays considérables, de 550 m³/an à 3 800 m³/an. Les deux principaux facteurs de cette variabilité étaient d'une part la consommation de produits transformés, y compris la viande, et d'autre part la productivité de l'eau agricole. Ces deux facteurs expliquent un résultat surprenant : la relation entre niveau de développement et empreinte en eau de consommation n'est pas simple. De nombreux pays industrialisés ont logiquement une empreinte élevée, tout comme certains pays en voie de développement à cause de la faible productivité en eau de leur agriculture pluviale.

16. Les valeurs sont toujours des moyennes pour la période 1996-2005. Elles incluent ici les transferts liés aux produits industriels et sont estimées en tenant compte de l'eau grise.

TROISIÈME PARTIE

COMMENT L'EMPREINTE EAU
OUVRE DE NOUVELLES
PERSPECTIVES

VI. L'EMPREINTE EAU DES PAYS

Les premiers intéressés par des réflexions sur l'eau virtuelle et sur l'empreinte eau sont les gouvernements nationaux. Car c'est à l'échelle des pays que se dessinent le cadre et les grands traits de la gestion de l'eau et que sont collectées et agrégées la plupart des données sur l'eau. Deux types de pays commencent à se référer à l'empreinte eau dans leurs politiques : d'une part, des pays pauvres en eau qui importent de l'eau virtuelle par obligation ; d'autre part, des pays développés qui réalisent que, dans un mode de consommation globalisé, les importations d'eau virtuelle sans cesse croissantes ne sont pas sans conséquences sur la crise de l'eau.

LA PROBLÉMATIQUE DE L'EAU DANS LES PAYS MÉDITERRANÉENS : LE CAS EXEMPLAIRE DE LA TUNISIE

Dans l'ensemble des pays méditerranéens, la rareté de l'eau fait partie intégrante du paysage. Les mécanismes de partage de l'eau ont souvent contribué à organiser les sociétés soumises à cette contrainte. La Tunisie est, à cet égard, exemplaire et a su adapter son expertise à la modernisation de l'économie¹. Car si la Tunisie est le plus aride des pays du Maghreb, c'est aussi l'un des États les plus avancés au monde dans la réflexion sur la gestion de l'eau.

En Tunisie, seule une bande assez étroite située sur les rivages méditerranéens du Nord bénéficie de plus de 500 mm de pluie. Sur une très large majorité du territoire habité, il pleut entre 100 et 500 mm par an – contre souvent de 800 à 1 000 mm dans

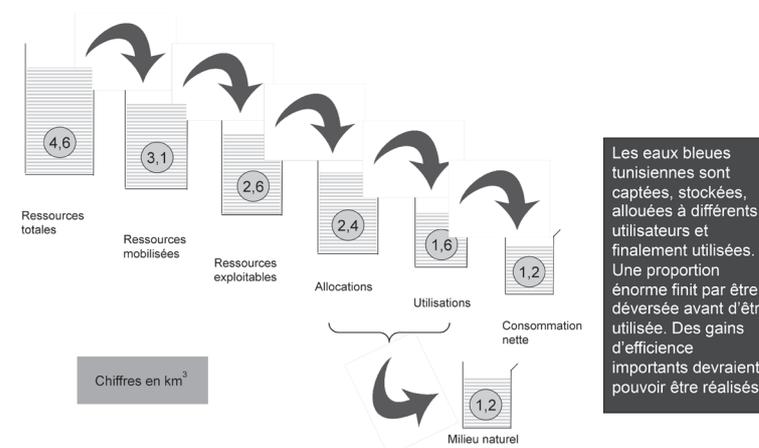
1. Les chiffres relatifs à la Tunisie utilisés dans ce chapitre sont extraits de deux principaux documents : 1. Besbes M., Chahed J. et Hamdane A., *Bilan intégral des ressources en eau de la Tunisie, sécurité hydrique et sécurité alimentaire*, présentation à l'Académie d'agriculture de France, 4 avril 2007 et 2. Lebdi F., *Contraintes de l'agriculture irriguée aux opportunités du marché. Cas de la Tunisie*, rapport FAO, 2005.

les pays du nord de la Méditerranée –, essentiellement pendant les mois d'hiver, et l'aridité estivale empêche toute culture non irriguée. Les ressources en eau bleue du pays sont donc logiquement très faibles et estimées à 4,6 km³ par an. Une goutte d'eau en comparaison des 200 km³ de la France! Cette quantité devait être répartie entre 10,6 millions d'habitants en 2010. Ramenée au nombre d'habitants, la comparaison entre les deux pays est également frappante : 430 m³ par an et par habitant en Tunisie contre plus de 3 000 m³ en France. La pression sur les ressources en eau bleue est donc particulièrement forte en Tunisie : plus de deux tiers des ressources totales sont déjà mobilisées et ce taux continue d'augmenter.

Avec la croissance démographique qui portera la population à 13 millions d'habitants en 2040, la situation va devenir de toute évidence encore plus tendue. Les ressources en eau bleue par habitant devraient décroître mécaniquement jusqu'à 350 m³ par habitant et par an. Dans ces conditions, il est tout simplement impossible, avec les techniques actuelles, de produire sur place la nourriture de la population, qui requiert plus de 1 000 m³ par an et par habitant. Cette situation ne peut que s'aggraver, car l'agriculture familiale traditionnelle s'appauvrit avec le développement économique du pays et sa mise en compétition avec les agricultures productives d'Europe. Comme dans de nombreux pays en développement, la paysannerie alimente la croissance des villes, ce qui réduit encore les capacités du pays à atteindre sa souveraineté alimentaire.

Pour faire face à cette pénurie, la Tunisie gère son eau avec parcimonie. Son bilan en eau, estimé avec une grande précision, en témoigne. Elle s'est organisée très tôt pour gérer la pénurie en eau structurelle en exploitant ses ressources souterraines, en équipant de nombreuses zones agricoles (du Nord notamment) pour l'irrigation, en mettant en place des transferts d'eau interbassins, en dotant aussi le pays d'un système de mesure intensif des pluies, des profondeurs de nappe et des prélèvements d'eau. Il est donc possible de quantifier précisément les différentes étapes de la mobilisation et de l'utilisation des ressources.

Utilisation des ressources en eau bleue tunisiennes



Source : M. Besbes, J. Chahed et A. Hamdane, *Bilan intégral des ressources en eau de la Tunisie, sécurité hydrique et sécurité alimentaire*, op. cit.

Les ressources en eau bleues sont mobilisées à la fois par des pompages dans les nappes souterraines et par du stockage dans des barrages. Pour remédier aux pénuries extrêmes, un stockage de précaution de 0,4 km³, appelé « épargne sécheresse », a été mis en place. Les trois quarts de la ressource mobilisée sont alloués aux exploitants de réseaux d'eau publique, 13 % allant à l'industrie et aux villes, 87 % à l'irrigation. Ces acteurs n'en utilisent eux-mêmes pas la totalité. L'irrigation, par exemple, rejette près de 0,8 km³ dans le milieu naturel, dont une moitié directement, sans même que l'eau ait été épanchée dans les parcelles. In fine, sur les 2 km³ alloués à l'irrigation, seuls 0,9 km³ sont évaporés par les plantes. Cette quantité ne représente que 84 m³ par habitant et par an. Les 1,1 km³ restants sont, soit perdus à cause des fuites dans les canaux (40 %) ou lors de l'arrosage des parcelles (37 %), soit non utilisés (23 %). Évidemment, cette eau n'est pas complètement « perdue », puisque l'essentiel rejoint le milieu naturel et les nappes souterraines, et peut être mobilisé à nouveau par les écosystèmes ou par d'autres utilisateurs. Les superficies irriguées de Tunisie sont de l'ordre de 350 000 à 400 000 ha, dont 8 000 à 10 000 environ sont irrigués avec des eaux usées traitées.

Chaque hectare reçoit donc théoriquement 5000 m³ d'eau chaque année, mais seuls 45 % (2250 m³) sont évaporés par les cultures.

Ces données sont celles de l'année 1996, mais ont peu évolué depuis. Le taux de mobilisation des ressources a sans doute augmenté légèrement, mais dans les grandes lignes, le déversement en cascade tel que présenté plus haut a peu changé. Le bilan des eaux bleues est principalement affecté par la variabilité naturelle des pluies. La faible efficacité hydraulique des systèmes irrigués interpelle, puisqu'un tiers seulement des ressources mobilisées finit par être consommé par les cultures. Les économies d'eau bleue possibles sont donc a priori très importantes.

La situation de la Tunisie n'est pas isolée. L'organisation le Plan Bleu² estime que l'efficacité de l'eau, déterminée en grande partie par celle de l'irrigation, varie de 40 à 60 % dans les pays sud-méditerranéens³ et de 60 à 75 % dans les pays nord-méditerranéens. Ainsi, sur les 280 km³ utilisés dans l'ensemble des pays du pourtour méditerranéen, environ 70 km³, soit un quart du total, pourraient être économisés. Il faudrait pour cela porter l'efficacité des réseaux d'eau potable à 85 %, celle des réseaux d'irrigation à 90 % et réutiliser 50 % des eaux usées après traitement.

BONNE GOUVERNANCE ET PRIX DE L'EAU : LE DILEMME DES PAYS PAUVRES EN EAU

Les raisonnements sur l'efficacité doivent toutefois être nuancés. L'irrigation par les eaux souterraines est souvent citée en exemple car les seules pertes d'eau ont lieu au sein des parcelles agricoles, puisque l'eau n'a pas à être apportée par des canaux dans ce cas. Toutefois, on oublie que, généralement, les nappes souterraines desquelles on extrait l'eau seraient à sec en l'absence de fuites dans les canaux. L'irrigation par pompage dépend donc fortement de l'irrigation dite « de surface ». Il est donc nécessaire de se demander systématiquement d'où vient l'eau utilisée et quel est le devenir de l'eau

2. G. Thivet et M. Blinda, *Améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau pour faire face aux crises et pénuries d'eau en Méditerranée*, Plan Bleu, Sophia-Antipolis, 2007.

3. À l'exception de Chypre et d'Israël, dont l'efficacité de l'irrigation avoisine les 80 %.

« perdue ». Il n'en reste pas moins que la lutte pour une meilleure efficacité doit faire partie des priorités des gestionnaires et que des gains substantiels sont souvent à portée de main à moindre coût.

Mais les eaux bleues ne répondent qu'à une partie des usages. Ainsi sur le territoire tunisien, il pleut en moyenne 230 mm par an, ce qui, sur un territoire de 163 000 km², représente un total de 36 km³. De ce territoire, seuls 50 000 km² sont cultivés, d'où une ressource pluviale disponible bien moindre, estimée à 18 km³. Ces précipitations génèrent d'une part les eaux bleues évoquées plus haut, mais aussi de l'eau verte, dont une partie est utilisée par l'agriculture. Cette part peut être estimée par une démarche descendante⁴ à partir d'un bilan hydrique des terres agricoles ou par une démarche ascendante⁵ à partir de la teneur en eau virtuelle des produits agricoles. On aboutit à des grandeurs proches, respectivement de 11,5 et de 12,3 km³/an. La quantité d'eau verte utilisée pour la production agricole nationale est donc, même dans un pays comme la Tunisie, nettement plus grande que la quantité d'eau bleue destinée au même usage (1,2 km³).

L'agriculture irriguée utilise 8 % de l'eau et des sols contre 92 % pour l'agriculture pluviale. Sa productivité est en revanche bien supérieure puisqu'elle fournit 14 % de la production nationale de céréales, 47 % des fruits, 82 % des légumes, 8 % des produits d'élevage. Elle fournit finalement 32 % de la valeur de la production agricole nationale.

Parts respectives des volumes d'eau, des surfaces agricoles et de la production des agricultures pluviale et irriguée en Tunisie

TYPE D'AGRICULTURE	PART DE L'EAU AGRICOLE	PART DE LA SURFACE AGRICOLE	PART DE LA PRODUCTION (EN VALEUR)
Irriguée	8 %	8 %	32 %
Pluviale	92 %	92 %	68 %

Source : F. Lebdi, *Contraintes de l'agriculture irriguée aux opportunités du marché. Cas de la Tunisie*, op. cit.

4. M. Besbes, J. Chahed et A. Hamdane, *Bilan intégral des ressources en eau de la Tunisie, sécurité hydrique et sécurité alimentaire*, présentation à l'Académie d'agriculture de France, 4 avril 2007.

5. A. Hoekstra, A. Chapagain, M. Aldaya et M. Mekonnen, *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*, op. cit.

Cette disproportion livre plusieurs leçons. L'agriculture irriguée est surtout utilisée pour des productions à haute valeur ajoutée. 80 % des cultures irriguées sont des fruits et légumes dont une part importante est destinée à la vente et à l'exportation. Les céréales, principal facteur de la dépendance alimentaire du pays, sont peu irriguées, et ce, même dans les périmètres irrigués, pour des raisons d'abord économiques. L'eau d'irrigation est en effet payante et les prix des céréales sont contrôlés pour des raisons sociales. Malgré des incitations, les agriculteurs ne peuvent pas valoriser suffisamment l'eau d'irrigation apportée, d'autant que la partie des céréales autoconsommée ne produit pas de revenu pour payer l'eau d'irrigation.

Cette situation explique le dilemme des pays pauvres en eau pour atteindre leur autosuffisance alimentaire. Ces pays doivent maintenir les produits de base (les céréales en général) à des prix bas pour permettre aux villes de se nourrir. Pour cela, ils peuvent soit se fournir sur les marchés internationaux, soit subventionner fortement leurs agriculteurs ou le prix de l'eau, afin que ceux-ci produisent ces céréales. Tant que le cours des céréales est bas sur les marchés internationaux, il est plus économique pour l'État de s'y approvisionner, même si cela réduit le degré d'autosuffisance alimentaire du pays.

Observons également que les céréales requièrent plus d'eau par quantité de produit que les cultures maraîchères ou fruitières. Le fait de faire payer l'eau constitue pour les producteurs de céréales un handicap important. Cette mesure s'est pourtant imposée pour améliorer la « gouvernance » de l'eau des périmètres irrigués et réduire les gaspillages. Or, pour les agriculteurs, le coût de l'eau pour exploiter des cultures destinées à l'autoconsommation est difficilement rentabilisé. De surcroît, la croissance démographique des zones irriguées engage à produire toujours plus de cultures vivrières, ce qui se fait au détriment des cultures de vente et de l'alimentation des villes. Cette tendance peut constituer une menace pour les périmètres irrigués, car les infrastructures mises en place peuvent devenir surdimensionnées si la demande en eau chute.

L'EAU VIRTUELLE

Le troisième type d'eau à prendre en compte est l'eau virtuelle incluse dans les échanges agricoles. En moyenne, sur la période 1994-2003, la Tunisie a importé plus de 4 km³ d'eau virtuelle et en a exporté quelque 0,3 km³⁶. La valeur des produits alimentaires importés a été en moyenne de 200 millions d'euros, alors que les exportations ont rapporté au pays 100 millions en moyenne. Le rapport des volumes importés et exportés et des valeurs correspondantes montre que la Tunisie a bien tiré profit de l'eau qu'elle a mobilisée pour ses exportations. Sa balance commerciale est certes négative, les exportations ne couvrant que la moitié de la valeur des importations, mais la valeur du mètre cube d'eau virtuelle exporté est sept fois plus grande que celle du mètre cube importé.

Les importations de produits agricoles sont très variables d'une année à l'autre, car elles dépendent étroitement de la production nationale de céréales, elle-même sous la dépendance de la pluviométrie. Les importations de céréales sont toutefois en augmentation régulière : elles représentaient 20 à 30 % de la consommation dans les années 1970, contre 50 % aujourd'hui.

Finalement, l'empreinte eau alimentaire totale moyenne de la Tunisie est de 20,5 km³ par an et se décompose en 12,3 km³ d'eau verte, 1,2 km³ d'eau bleue, 0,4 km³ d'eau grise et 6,6 km³ d'importations nettes d'eau virtuelle⁷. À ces chiffres s'ajoute 0,5 km³ d'empreinte eau industrielle et domestique. L'empreinte totale individuelle est de 2217 m³ par an, une valeur élevée due à une forte empreinte en eau verte et au régime alimentaire relativement riche en produits animaux des Tunisiens. L'importance de l'eau verte est due aux faibles rendements des cultures pluviales, qui, comme nous l'avons vu, conduisent à une faible efficacité de l'eau et des sols.

6. D'après F. Lebdi, *Contraintes de l'agriculture irriguée aux opportunités du marché. Cas de la Tunisie, op. cit.* Ces chiffres varient selon les auteurs, et les valeurs courantes sont plutôt de l'ordre de 5 km³ d'importations.

7. Ces chiffres sont tirés de l'analyse de l'empreinte eau nationale (qui inclut un nombre de produits plus grand et tient compte des pollutions de la ressource). Le chiffre de 6,6 km³ d'eau virtuelle est en particulier dû à une prise en compte plus détaillée de l'origine des importations.

L'empreinte eau de consommation de la Tunisie et ses composantes

	TOTAL (KM ³ /AN)	PAR HABITANT (M ³ /AN)
Empreinte eau alimentaire interne	13,9	1 470
dont empreinte eau bleue	1,2	130
dont empreinte eau verte	12,3	1 300
dont empreinte eau grise	0,4	40
Empreinte eau alimentaire externe	6,6	700
Empreinte alimentaire totale	20,5	2 170
Empreinte eau industrielle	0,22	23
Empreinte eau domestique	0,26	27
Empreinte eau totale	20,98	2 220

Source : M. Mekonnen, A. Hoekstra, *National Water Footprint Accounts. The blue, green and grey water footprint or production and consumption. op. cit.*

À première vue, le taux de dépendance de la Tunisie vis-à-vis des importations d'eau virtuelle, environ 30 % de l'empreinte totale, ne paraît pas très élevé, d'autant qu'il ne se distingue pas du taux de nombreux pays économiquement avancés. Ainsi, la France, tout comme une majorité de pays européens, dépend de l'eau d'autres pays pour près de 50 %.

Empreintes eau de consommation alimentaire et taux de dépendance à l'eau virtuelle extérieure des pays du Maghreb et de la France

PAYS	EMPREINTE ALIMENTAIRE TOTALE (M ³ /HAB./AN)	EMPREINTE ALIMENTAIRE INTERNE (M ³ /HAB./AN)	EMPREINTE ALIMENTAIRE EXTERNE (M ³ /HAB./AN)	TAUX DE DÉPENDANCE
Algérie	1 540	730	810	53 %
Maroc	1 690	1 200	490	29 %
Tunisie	2 170	1 470	700	32 %
France	1 550	820	730	47 %

Source : M. Mekonnen, A. Hoekstra, *National Water Footprint Accounts. The blue, green and grey water footprint or production and consumption. op. cit.*

Cela corrobore le fait que le taux de dépendance à l'eau virtuelle importée doit être manipulé avec précaution. En effet, dans les pays arides, la productivité de l'eau verte est généralement faible et les empreintes internes peuvent être paradoxalement élevées. C'est le cas de la Tunisie et du Maroc qui ont maintenu une petite agriculture pluviale et où le taux de dépendance est de l'ordre de 30 %. L'Algérie, qui produit dans des conditions similaires, importe également beaucoup sur les marchés et a délaissé son agriculture traditionnelle, ce qui conduit à une empreinte interne par habitant plus faible mais à un taux de dépendance plus élevé, supérieur à 50 %. Les pays industrialisés importent aussi une part importante de l'alimentation sur les marchés mondiaux, le plus souvent des produits élaborés à contenu en eau virtuelle élevé. Nombre d'entre eux dépendent donc fortement de l'eau d'autres pays. L'Europe de l'Ouest, en particulier, fonctionne suivant ce schéma, comme nous le verrons ci-après.

Pour la Tunisie comme pour les autres pays de la rive sud de la Méditerranée, l'enjeu majeur est celui du taux de dépendance aux importations de céréales qui constituent la base de l'alimentation. Rien de tel pour déstabiliser un pays qu'une flambée des prix des produits de base. Les autres produits élaborés, et la viande en particulier, ont un impact bien différent, car des restrictions sont plus facilement tolérées. Lorsqu'on est démuni, la nourriture mobilise

une part importante du revenu, et pour survivre, on privilégie l'essentiel : l'énergie fournie par les glucides des céréales.

Pour les pays importateurs, l'heure est à l'inquiétude. Depuis la révolution verte des années 1970 et jusqu'à la fin du siècle dernier, la production mondiale de céréales a été généralement supérieure à la consommation, et à l'exception de la « crise du pétrole » du début des années 1970, les prix des céréales ont subi une lente et régulière décline. Mais depuis lors, la production mondiale a tendance à être du même ordre de grandeur ou inférieure à la consommation. Les fluctuations des stocks mondiaux de céréales ont un impact net sur les crises alimentaires. Ainsi les prix des céréales ont augmenté lors des trois derniers épisodes de stocks bas, en 1973/1974, dans le milieu des années 1990 et en 2007/2008⁸. Cette sensibilité au niveau des stocks mondiaux est exacerbée par le fait que les quantités échangées sur les marchés ne représentent qu'une faible part, environ 10 %, de la production mondiale. Dans ces conditions, toute crise (catastrophe naturelle, pic des prix de l'énergie) peut susciter des inquiétudes et générer de la spéculation, tout particulièrement sur les produits comme le blé ou le maïs, dont le cours est régulé par des mécanismes boursiers. Seuls des mécanismes de régulation à l'échelle mondiale pourront permettre d'éviter ces crises qui semblent devoir se reproduire dans les années à venir, tant que le système productif mondial ne sera pas adapté pour répondre à l'accroissement de la demande alimentaire. Cette dernière subit une triple pression sous l'effet conjugué de la démographie, de l'augmentation du niveau de vie qui enrichit les régimes alimentaires et du détournement d'une partie de la production agricole au profit des biocarburants.

Dans ce contexte, il est essentiel de ne pas s'attacher qu'au court terme. Le problème s'enracine dans des tendances longues qu'il faut comprendre afin de lutter efficacement. Dans le cas des pays de la rive sud-méditerranéenne, la tendance longue est celle d'une augmentation régulière des importations de céréales. Aujourd'hui de l'ordre de 22 millions de tonnes pour l'ensemble des pays du Maroc à l'Égypte, ces importations représentent 17 % des importations de

céréales mondiales pour 3 % de la population. Elles devraient plus que doubler (+ 130 %) d'ici à 2050 selon l'US Wheat Associates, l'organisme chargé de la promotion du blé américain à l'étranger⁹. Ces pays vont donc se trouver de plus en plus en compétition sur les marchés internationaux, comme de nombreux autres pays en développement qui n'auront pas assez soutenu leurs agricultures.

QUELLES RÉPONSES POSSIBLES À L'AUGMENTATION DES BESOINS EN EAU VIRTUELLE ?

Le fait de dépendre d'autres pays à travers l'eau virtuelle parle aux politiques, mais comment cela peut-il se traduire en action, en particulier pour les responsables de la gestion de l'eau ?

L'approche tunisienne a permis de calibrer une équation simple d'évolution de la demande en eau alimentaire totale incluant eau bleue, eau verte et eau virtuelle en fonction de quelques indicateurs clés : efficacité de l'irrigation, efficacité de l'eau verte, évolution des régimes alimentaires et croissance démographique. Les deux premiers ont trait à l'offre de nourriture par l'agriculture nationale, les deux derniers à la demande de la population. Leur comparaison permet d'estimer l'évolution des besoins d'importation et donc d'eau virtuelle. Différents scénarios à l'échéance de 2025 ont été testés afin de comprendre les marges de manœuvre de la politique agricole.

D'ici à 2025, la population tunisienne augmentera de 20 % pour atteindre 12,1 millions d'habitants. Cette croissance entraînera, au niveau de vie actuel, une demande de 3,5 km³ d'eau supplémentaires qui sera de surcroît majorée de 2 km³ en raison du développement économique. Les eaux bleues, déjà fortement mobilisées et ne représentant qu'environ 10 % des usages totaux, seront dans l'incapacité de répondre à cette demande accrue. La compétition pour ces eaux bleues est déjà rude entre irrigation, besoins domestiques et industriels. Or ces derniers auront toujours la priorité par rapport à l'irrigation, dont les allocations ne vont pas croître. Même avec une

8. Voir Volatile World foodprices and their implications: Grain stocks and price spikes, Wiggins S., Keats S., Overseas Development Institute, Londres 2009. <http://www.odi.org.uk/sites/odi.org.uk/files/odi-assets/publications-opinion-files/7631.pdf>

9. Source : www.terre-finance.fr, mai 2011.

forte augmentation de l'efficacité hydraulique et de leur productivité agricole, les eaux bleues ne pourront contribuer au mieux que pour quelques centaines de millions de mètres cubes à l'augmentation de la demande.

L'essentiel de l'eau utilisée provient déjà des deux autres compartiments, eau verte et eau virtuelle, qui représentent 90 % de l'eau totale. Si la productivité de l'agriculture pluviale n'augmentait pas ou peu, les 5,5 km³ d'eau supplémentaire devraient être fournis par les importations d'eau virtuelle. La dépendance de la Tunisie aux marchés internationaux s'accroîtrait alors fortement. Améliorer l'efficacité de l'agriculture pluviale est donc une clé essentielle de la sécurité alimentaire tunisienne. Des différents scénarios testés, seul celui favorisant un tel accroissement permet de contenir la vulnérabilité aux importations. Comment y parvenir? Nous ne prétendons pas ici résoudre d'un tour de plume le défi de cet accroissement de productivité, mais seulement proposer quelques pistes.

Des résultats sur l'utilisation de l'eau verte ne seront obtenus que dans la durée. Si l'agriculture pluviale réussit à mobiliser autant d'attention, de recherche, d'investissements que l'agriculture irriguée a su le faire pendant des décennies, ses performances ne pourront que s'accroître, car des solutions techniques sont possibles, pour peu qu'on aborde les problèmes posés avec une vision systémique allant de la mobilisation des ressources jusqu'à la structuration des marchés: augmenter l'eau disponible pour l'agriculture pluviale ne peut donner des résultats que si les autres facteurs limitants – fertilité des sols dégradée, mécanisation peu développée, manque de structuration des filières – sont aussi levés. En ce qui concerne l'eau, il existe tout une palette de solutions allant de techniques de conservation ou de diversion des eaux de pluie à de l'irrigation d'appoint dans les périodes critiques du développement des cultures. Ces techniques, tout comme celles consistant à associer des variétés ayant différents niveaux de résistance à la sécheresse, font partie des pratiques ancestrales des agriculteurs, et ce savoir-faire traditionnel constitue une bonne base pour les changements à mettre en place. Il faut aussi remettre en cause des paradigmes agronomiques comme, par exemple, celui de l'homogénéité parcellaire qui veut que l'on cultive de manière identique l'ensemble d'un champ. Lorsque 400 mm d'eau (4 000 m³ par hectare)

sont nécessaires à une culture et que 200 mm sont assurés par la pluie, on peut, par exemple, obtenir de bons rendements en véhiculant l'eau par des façonnages de surface de façon à la concentrer sur une fraction du terrain.

L'analyse permet aussi d'anticiper les besoins d'eau virtuelle et de raisonner la manière dont le commerce et de possibles accords commerciaux pourront aider à faire face aux importations inévitables de nourriture. La logique de la Tunisie d'importer des produits riches en eau virtuelle et d'en exporter d'autres moins riches en eau est intéressante d'un point de vue économique. Cependant, elle ne résout pas entièrement la question de la vulnérabilité aux crises mondiales qui affectent d'abord et surtout les céréales. Une approche spécifique d'anticipation et de gestion de ces crises doit être mise en place, ce qui passe forcément par une coordination et des accords internationaux.

Finalement, l'analyse permet de réfléchir sur l'ensemble des types d'eau et de dégrossir la situation et les scénarios d'avenir. On retrouve, dans le cas de la Tunisie, le constat dressé pour l'alimentation mondiale: l'accroissement de mobilisation d'eau bleue ne suffira pas à produire la nourriture nécessaire. Les techniques de gestion et de mobilisation d'eau verte au profit de l'agriculture détiennent une bonne part des solutions car elles permettent une augmentation des rendements de l'agriculture pluviale qui fournit la majeure partie de l'alimentation. Il ne s'agit pas d'arrêter l'irrigation, mais de la repenser dans un contexte plus général et de mettre en place un continuum d'actions allant de la collecte et de la conservation de l'eau de pluie à l'irrigation de complément¹⁰.

L'EXEMPLE D'UN PAYS EUROPÉEN : L'EMPREINTE EAU DE LA FRANCE

Les empreintes eau de plusieurs pays ont été publiées récemment en s'appuyant sur l'approche du Water Footprint Network

10. Ces conclusions sont aussi celles de *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*, Earthscan, Londres, International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, 2007.

présentée au chapitre 5. La France, la Suisse, le Royaume-Uni, les Pays-Bas, l'Espagne¹¹ disposent, par exemple, de rapports détaillés sur leurs empreintes¹². Le travail repose sur une analyse spatiale de la production agricole, de la consommation, de la répartition de la population, et fournit des données par région ou par grand bassin-versant. Grâce à une agrégation des données, les empreintes eau interne des productions agricole, eau industrielle et eau potable sont estimées en distinguant les eaux bleues, vertes et grises, ces dernières suivant l'approche rudimentaire mentionnée plus haut où sont comptabilisées les seules eaux usées non traitées par des stations d'épuration. Pour calculer l'empreinte eau de consommation, les flux d'eau virtuelle importés et exportés sont détaillés et combinés avec les données de consommation nationale. Les valeurs fournies sont des moyennes pour la période 1996-2005¹³.

L'empreinte eau de production (interne)

Pour la France, l'empreinte totale de « production » est de 90 km³/an, soit 1 514 m³/hab./an ou encore 4 150 l/hab./jour. 87% de cette empreinte (80 km³) provient de l'agriculture, contre 4% (2,8 km³) de l'eau domestique et 9% (7,2 km³) de l'industrie. Ces chiffres sont bien supérieurs à ceux des prélèvements d'eau bleue classiques, dont le total¹⁴ est de 33,4 km³. Les usages qui évaporent de l'eau, et notamment de l'eau verte, ont une empreinte bien supérieure à leurs prélèvements. A contrario, les usages évaporant peu d'eau et rejetant une eau non ou peu dégradée ont une empreinte inférieure à leurs prélèvements. Ainsi, l'empreinte eau domestique est inférieure aux 5,7 km³ prélevés car la majeure partie des eaux prélevées retourne dans les cours d'eau après épuration.

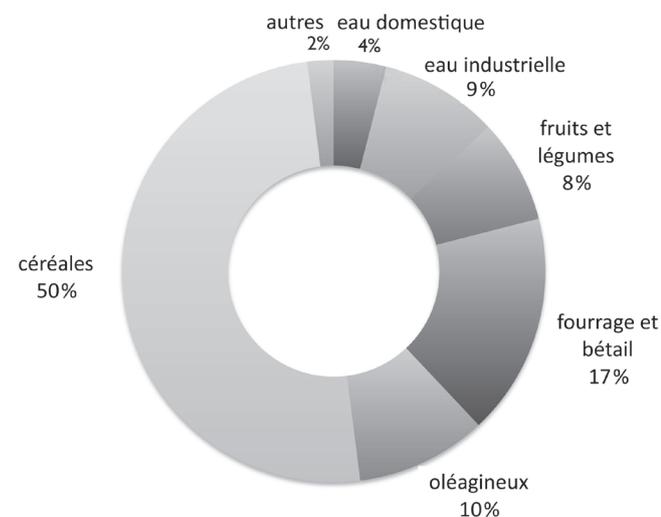
11. Cette liste est non exhaustive.

12. Voir le graphique ci-après pour comparer les empreintes européennes.

13. Le travail original est publié in A. Ercin, M. Mekonen et A. Hoekstra, *The Water Footprint of France*, Value of Water Research Report n° 56, Unesco-IHE, Delft, 2012. Les résultats ont aussi été publiés en France par le WWF : *L'Empreinte eau de la France*, WWF, 2012.

14. Voir chapitre 2.

L'empreinte eau de production totale française



Source : A. Ercin, M. Mekonen et A. Hoekstra, *The Water Footprint of France*, Research Report n° 56, Unesco-IHE, 2012.

Les 80 km³ de l'empreinte « eau agricole » comprennent 68,4 km³ d'eau verte, 3,6 km³ d'eau bleue (dont 0,7 km³ d'eau pour abreuver le bétail) et 8 km³ d'eaux grises, ces derniers estimés comme le volume d'eau dégradée et non traitée de l'agriculture qui s'infiltré vers les nappes souterraines ou se rejette dans les cours d'eau. L'estimation de l'eau (bleue) d'irrigation est conforme à celle, classique, des usages, ce qui n'a rien de surprenant puisque la quasi-totalité de cette eau est évaporée par les plantes. Sans surprise également, l'eau verte constitue de très loin la principale source d'eau de l'agriculture française. L'eau agricole sert d'abord à produire des céréales (près de la moitié de l'empreinte totale de production), puis des fourrages, des oléagineux, des fruits et légumes.

La France exporte annuellement 65,5 km³ d'eau virtuelle, et donc une part énorme de l'eau utilisée pour la production sur son territoire. Sur ce total, 45 km³ sont des exportations liées aux cultures, et 12,4 km³ des exportations liées aux produits animaux. Elles se font essentiellement vers les pays voisins : Belgique (16%),

Italie (13%), Allemagne (11%), Espagne (8%), Royaume-Uni (7%), Pays-Bas (7%), Algérie (3%) et Libye (3%). Les produits avec lesquels s'exporte cette eau virtuelle sont pour une large part (54%), soit d'origine animale, soit dérivés du blé.

L'analyse fournit également une distribution spatiale de cette empreinte de production par régions ou par bassins-versants. Ce sont les grandes régions agricoles (Centre, Midi-Pyrénées, Poitou-Charentes, dans l'ordre) qui ont, en toute logique, les empreintes eau les plus fortes.

L'empreinte eau de consommation : la France, gourmande d'eau virtuelle (empreinte eau externe)

De manière surprenante, la France, un des grands pays exportateurs agricoles, importe aussi beaucoup de produits alimentaires. L'eau virtuelle importée annuellement y était en moyenne de 78,3 km³ par an dans la période d'étude. Elle se répartissait en 73% de produits agricoles végétaux, 12% de viande et produits animaux et 15% de produits industriels. C'est le coton des vêtements qui arrive en tête, avec 22% des importations d'eau virtuelle à lui seul. L'eau nécessaire à la production de ces importations est pour 67% de l'eau verte et pour 12% de l'eau bleue d'irrigation. Les 21% restants sont des eaux grises, polluées et non épurées, résultant de la production industrielle importée.

L'eau virtuelle importée provient du Brésil (10%), de Belgique (9%), d'Espagne (7%), d'Allemagne (7%), d'Italie (6%) et d'Inde (5%). Le coton de nos vêtements est originaire d'Ouzbékistan, de Turquie, d'Inde, du Tadjikistan, du Turkménistan et de Chine.

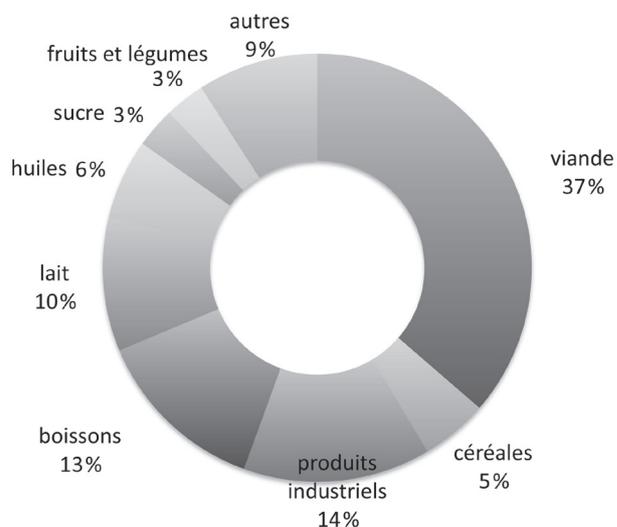
L'empreinte eau de consommation de la France et ses composantes

EMPREINTE EAU DE CONSOMMATION	TOTAL (KM ³)	PAR HABITANT (M ³ /AN)	PART DU TOTAL
Agricole interne	48,8	822	45 %
dont eau verte	43,7	735	41 %
Agricole externe	43,4	730	41 %
dont eau bleue d'irrigation	4,6	77	4 %
Industrielle interne	4,2	71	4 %
Industrielle externe	6,8	115	7 %
Eau domestique	2,8	48	3
Total	106	1786	100%

Source : *The Water Footprint of France, op.cit.*

L'empreinte eau de consommation de la France est la troisième dimension de l'analyse ; elle vaut 106 km³/an. Cette somme est quasiment le bilan eau de production + importations d'eau virtuelle – exportations d'eau virtuelle, à une petite différence près, due au fait qu'une partie des importations sert à produire des biens à nouveau exportés. Rapporté au nombre d'habitants, le mode de vie français a nécessité un volume d'eau moyen annuel de 1 786 m³ par personne et par an dans la période 1996-2005, dont les neuf dixièmes étaient de l'eau verte agricole. La surprise de cette évaluation est la part considérable de l'eau externe dans cette empreinte, puisque la moitié (845 m³) de l'eau consommée a été mobilisée par la production d'autres pays. Un Français « consomme » également chaque année 730 m³ d'eau agricole externe, dont 77 m³ d'eau bleue d'irrigation d'autres pays, alors qu'une fraction non négligeable de ces derniers souffre de pénuries.

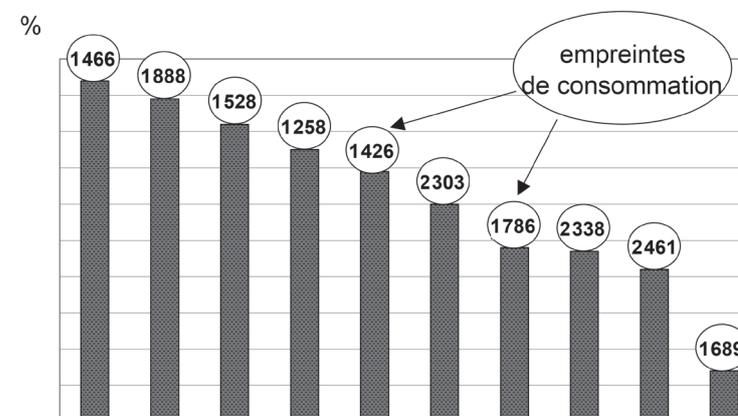
L'empreinte eau de consommation totale française



Source : *The Water Footprint of France, op.cit.*

La part de l'eau externe (41 %) dans l'empreinte de consommation nationale française est plus élevée que la moyenne mondiale de 22 %, mais inférieure à la moyenne européenne, qui est de l'ordre de 60 %. Les parts d'empreinte eau externe dessinent une cartographie du niveau d'internationalisation des économies. Les pays du nord de l'Europe ont des parts d'empreinte externe très élevées (supérieures à 70 %), alors que les pays du Sud se situent sous la barre des 60 %. Par ailleurs, les empreintes eau de consommation des pays du nord de l'Europe ont tendance à être plus basses que celles du Sud en raison de l'importance des pâturages dans la production de viande. Le mode de calcul distingue en effet trois types de production animale plus ou moins intensifs. Les productions à partir des céréales cultivées, qui permettent de produire sur de courtes durées, ont des empreintes élevées, alors que les productions extensives qui s'appuient sur le pâturage exclusivement ont une empreinte beaucoup plus faible. Ces différences dans les modes de production de la viande expliquent les empreintes eau de consommation plus fortes dans le sud que dans le nord de l'Europe.

Part de l'empreinte eau externe dans les empreintes de consommation de pays européens (Royaume-Uni, Pays-Bas)



Source : Mekonnen M., Hoekstra A., *National Water Footprint Accounts. The blue, green and grey water footprint or production and consumption, op. cit.*

En raison des importations d'eau virtuelle, la consommation des Français exerce des pressions sur l'eau de nombreux pays de la planète : 31 bassins-versants du monde contribuent à plus de 0,1 km³ (100 millions de mètres cubes) d'eau par an. Ces contributions sont modestes en comparaison de l'empreinte eau de consommation de la France, mais elles jouent néanmoins un rôle dans les pénuries. Ainsi, sur ces 31 bassins, 17 souffrent de pénuries aiguës pendant au moins trois mois de l'année et plusieurs sont situés dans des pays où la malnutrition ou la sous-nutrition sont encore monnaie courante. Or 0,1 km³ permet de nourrir approximativement 100 000 personnes.

Principaux bassins-versants faisant face à des pénuries d'eau bleue et contribuant à l'empreinte eau de consommation française

BASSIN-VERSANT	PRINCIPAUX PAYS	CONSOMMATION FRANÇAISE (KM ³ /AN)	NIVEAU DE PÉNURIE ⁽¹⁾
Gange	Inde, Bangladesh	0,92	5
Bandama	Mali, Côte d'Ivoire	0,79	2
Douro	Espagne, Portugal	0,62	3
Guadalquivir	Espagne	0,60	6
Indus	Afghanistan, Inde, Népal, Pakistan	0,56	8
Èbre	Espagne	0,55	3
Guadiana	Espagne, Portugal	0,49	6
Mer d'Aral	Ouzbékistan, Tadjikistan, Kirghizstan	0,45	4

(1) Nombre de mois de l'année où les ressources en eau sont sous forte tension.

Source : *The Water Footprint of France, op.cit.*

Un examen plus approfondi montre aussi que l'empreinte en eau bleue de consommation française est élevée dans des bassins sensibles, et ce, pour six principaux produits, coton, riz, canne à sucre, betterave à sucre, soja et maïs, dans l'ordre décroissant. Pour le coton, le premier bassin touché est celui de la mer d'Aral, bien connu pour la catastrophe écologique qui l'affecte.

Il est difficile de porter un jugement à l'emporte-pièce sur ces données, d'autant que l'exemple de la Tunisie montre que les stratégies des pays arides pour atteindre leur sécurité alimentaire doivent passer par le commerce et les exportations. Le mérite de cette analyse est d'abord de nous sensibiliser aux impacts de nos modes de consommation sur l'eau de la planète. Cette prise de conscience ne doit pas s'adresser qu'aux consommateurs, mais aussi aux décideurs dont les politiques, agricoles et commerciales

notamment, déterminent notre degré de dépendance et la vulnérabilité de nos chaînes d'approvisionnement alimentaire. À cet égard, l'analyse peut être surprenante. Ainsi, l'empreinte eau française en Espagne ne résulte pas principalement des produits maraîchers, mais d'importations de maïs, de tournesol et de betterave à sucre. Or ces produits gourmands en eau sont cultivés dans un pays aride où les tensions physiques, économiques et sociales relatives à l'eau sont importantes. Dans le court terme, il est possible que cela ne pose aucun problème. Dans le moyen et le long terme, en revanche, l'évolution des tensions sur l'eau en Espagne mérite d'être suivie avec vigilance.

COMMENT CETTE ANALYSE PEUT-ELLE AIDER LES PAYS ?

Dans les pays arides, l'analyse de l'empreinte eau et de ses composantes est fondamentale pour développer des stratégies de sécurité alimentaire. Elle permet de déterminer quels modes de production valorisent le mieux l'eau, de raisonner le développement agricole et les types d'eau à mobiliser. Elle démontre que, dans de nombreux pays arides, l'agriculture pluviale, la plupart du temps familiale et à dominante vivrière, souvent parent pauvre des politiques de développement, détient une partie importante des clés de l'avenir. Paradoxalement, c'est en améliorant ses rendements que l'on pourrait diminuer les pressions sur les ressources naturelles en eau et en biodiversité terrestre. Bien sûr, l'augmentation de ses rendements requiert de mobiliser de l'eau, mais à proximité de l'endroit où la pluie tombe, dans les champs et les sols directement, ou dans de petits réservoirs. De telles techniques ont d'ores et déjà démontré leur efficacité, par exemple en Inde dans des régions arides du Rajasthan. Là, des ONG locales ont remis en fonction les réservoirs traditionnels délaissés depuis de nombreuses années. Le résultat est proprement stupéfiant : la végétation naturelle se développe, les rivières se remettent à couler, les rendements s'accroissent.

Ces nouvelles approches questionnent la manière traditionnelle de valoriser l'eau. Jusqu'ici, cette valorisation était de la responsabilité des « gestionnaires de l'eau », souvent imprégnés d'une vision

d'ingénieur et donc enclins à privilégier les infrastructures de grande dimension. Le résultat est une approche souvent limitée à la comparaison des productions en irrigué ou en pluvial ou à l'analyse des pertes des réseaux. Il faut élargir cette vision. Bien sûr, l'efficacité des systèmes irrigués est importante, mais il est temps de développer des approches où l'efficacité de l'eau est appréhendée dans ses dimensions économiques, sociales et environnementales. Quel bénéfice apporte 1 m³ d'eau utilisé à produire des tomates en irrigué? N'est-il pas plus intéressant de produire du blé en pluvial? Combien de personnes ce mètre cube (ou kilomètre cube) d'eau fait-il vivre, emploie-t-il? Combien de biodiversité « coûte »-t-il? Affecte-t-il en premier lieu la biodiversité terrestre ou d'abord la biodiversité aquatique?

Tant que l'eau n'était pas une ressource limitée, ces questions paraissaient superflues et seule la dimension économique importait aux décideurs. Aujourd'hui, le développement économique doit intégrer d'autres contraintes. Celle liée à l'utilisation efficiente des ressources naturelles, et notamment de l'eau. Celle également de la croissance démographique, et plus particulièrement de la croissance urbaine qui ne découle plus forcément d'une demande industrielle en forte hausse, mais de difficultés à vivre dans des conditions décentes dans les zones rurales. L'économie se heurte donc aux deux autres dimensions du développement durable et la gestion de l'eau se doit d'élargir la logique sur laquelle elle s'est construite au cours du xx^e siècle.

Les pays tempérés doivent également intégrer progressivement les échanges d'eau virtuelle dans leur réflexion et dans leurs politiques, et ce, pour deux raisons. Tout d'abord parce que la sécurité alimentaire mondiale est un des éléments de leur sécurité. Dans un monde globalisé, toute crise produit des effets en cascade difficilement prévisibles, avec des conséquences économiques et sociales. Ensuite parce que les volumes échangés se mesurent aussi en termes d'inefficacité et de quantité de gaz à effet de serre émis dans toutes les étapes du transport et de la transformation. De ce point de vue, l'Europe bat tous les records avec des importations et des exportations souvent plus élevées que la production locale. Même sans intégrer les pertes alimentaires sur lesquelles nous reviendrons, une réflexion sur l'empreinte carbone de notre alimentation

serait bienvenue. Par ailleurs, la traçabilité des aliments que nous consommons serait sans doute plus facile à assurer si les circuits d'approvisionnement se simplifiaient.

Comme on le voit, raisonner l'empreinte eau permet d'élargir les approches purement centrées sur l'eau et d'identifier dans de nombreux problèmes des enjeux liés à l'eau qui ne sont pas forcément évidents a priori. Cela invite à abandonner les raisonnements classiques, à intégrer d'autres dimensions et à mieux prendre en compte la complexité des systèmes humains. En reconnaissant le rôle de l'eau dans les problèmes actuels, on découvre aussi qu'elle est un élément important des solutions à mettre en place. Ce constat ouvre de nouveaux horizons et redonne toute sa place à l'eau dans les enjeux actuels.

RETOUR SUR LA MÉTHODE

L'estimation des usages de l'eau à travers l'empreinte eau offre une vision très différente de celle, classique, des prélèvements présentée au chapitre 2. Les deux lectures sont complémentaires et n'ont pas la même utilité. L'estimation des prélèvements reste incontournable pour gérer et allouer les ressources en eau bleue d'un pays. L'estimation de l'empreinte eau présente un intérêt principalement pour comprendre les grands types d'eau (bleue, verte, grise) et les principales origines de l'eau (du pays même ou importée) consommée dans le pays et pour analyser les principales interdépendances et vulnérabilités qui peuvent en résulter. Il serait donc malvenu d'opposer ces deux approches.

Nous pouvons également observer que l'empreinte eau ne répond pas à l'impératif de mieux rendre compte des tensions entre grands usagers de l'eau puisque les prélèvements du secteur de l'énergie, rejetés sans grande dégradation, ne contribuent pas, ou très peu, à l'empreinte en eau grise. En théorie, les dégradations des écosystèmes liées aux barrages et aux rejets des centrales thermiques devraient pouvoir être intégrées dans la méthode, mais cette estimation ne pourra en aucun cas rendre compte des tensions résultant des volumes considérables « prélevés » et relâchés en des périodes où les autres usagers, et notamment l'agriculture, ne

peuvent en bénéficier. Cette limitation souligne qu'il faudra combiner différentes approches si l'on souhaite bien rendre compte des tensions quantitatives.

L'approche de l'empreinte eau semble également, et en première analyse, défavorable à l'agriculture puisque le poids de cette dernière dans les usages apparaît encore plus important que dans l'approche classique des prélèvements. Il faut toutefois souligner que cette accentuation vient d'une part de l'intégration des volumes importants d'eau verte et d'autre part de la prise en compte insuffisante des impacts des rejets d'eau grise. Il reste donc aussi beaucoup à faire pour mieux rendre compte des tensions qualitatives.

VII. L'EMPREINTE EAU ET LE CONSOMMATEUR

L'empreinte eau ne s'adresse pas seulement aux experts et aux gestionnaires de l'eau. Elle interpelle plus largement l'ensemble des citoyens et questionne nos modes de vie et de consommation.

Depuis quelques années, des campagnes d'information sont diffusées pour que l'opinion publique prenne conscience de l'importance de l'eau potable. La fermeture du robinet pendant le brossage des dents ou le remplacement des bains par des douches sont devenus des signes distinctifs du citoyen responsable de son eau. Pourtant, ces pratiques ne concernent qu'une toute petite partie de l'eau que nous utilisons. Ne les négligeons pas pour autant car ce n'est pas seulement l'eau potable mais l'ensemble des ressources associées qui sont importantes. Il faut d'abord prendre en compte les coûts de l'énergie pour la collecte, le transport et le traitement sur l'ensemble du trajet parcouru depuis le réservoir, le fleuve ou la nappe souterraine jusqu'à nos robinets, puis ensuite jusqu'à la rivière où l'eau est rejetée après épuration. On doit aussi intégrer les impacts difficiles à évaluer des atteintes à l'environnement en amont et en aval. À l'amont d'abord, dus au prélèvement de l'eau qui réduit les quantités disponibles pour les écosystèmes aquatiques. À l'aval ensuite, dus aux rejets sous une forme dégradée dans un cours d'eau. Quand on gaspille de l'eau potable, c'est donc l'ensemble de toutes ces ressources qui sont touchées.

L'empreinte eau invite à réfléchir sur notre manière d'utiliser l'eau et, ce faisant, de la gaspiller, mais à examiner aussi tous les types d'eau nécessaires à notre mode de vie ainsi que les coûts et impacts cachés de leur utilisation. Il s'agit de dépasser le niveau de l'eau potable et de considérer toute l'eau nécessaire à la production agricole, énergétique et industrielle. En toute logique, c'est dans ces secteurs que se situent les plus gros gisements d'économie d'eau.

ALLÉGER L'EMPREINTE EAU DE NOTRE RÉGIME ALIMENTAIRE

Les produits agricoles requièrent de grandes quantités d'eau pour leur production, de quelques centaines de litres par kilo à plusieurs dizaines de milliers. Schématiquement, la consommation d'eau des produits végétaux augmente de 200 l/kg pour les cultures sucrières à 300 l/kg pour les légumes, à 1 000 l/kg pour les fruits et à 1 600 l/kg pour les céréales¹⁵. Elle est démultipliée par chaque transformation. Chacune de nos assiettes contient donc des centaines de litres d'eau virtuelle, et cette richesse en eau est d'autant plus grande que nous mangeons des produits animaux ou transformés. Des valeurs moyennes de ces contenus en eau virtuelle sont de plus en plus diffusées auprès du grand public par de nombreux médias¹⁶.

Les contenus en eau virtuelle sont variables suivant les lieux de production et les modes de transformation. Il n'est aujourd'hui pas possible d'associer à un produit acheté donné une valeur précise car la chaîne de production des produits vendus est souvent peu connue. Seuls des ordres de grandeur sont disponibles. En l'absence d'outils de comparaison des contenus en eau virtuelle de produits similaires, les consommateurs gardent néanmoins la possibilité de raisonner leurs régimes alimentaires en tenant compte des ordres de grandeur relatifs de différents produits, ce qui offre déjà de nombreuses options pour consommer de manière plus responsable.

Un élément souvent débattu est la part de la viande dans nos régimes alimentaires. La viande est un des principaux pourvoyeurs de protéines, mais la conversion des produits végétaux en produits animaux n'est pas très efficace. En gros, 10 kg de nourriture végétale produisent 5 kg de volaille, 3 kg de porc et moins de 1 kg de bœuf¹⁷, et les quantités d'eau virtuelle contenues dans ces viandes varient dans les mêmes proportions. Comment la viande influe-t-elle sur l'empreinte eau de notre alimentation? Une étude du régime

alimentaire californien, dont l'empreinte eau annuelle est de 1 971 m³ (soit 5 400 l/jour), apporte une contribution intéressante¹⁸. Le régime alimentaire moyen y comprend, sur un total de 902 kg de nourriture annuels, 20 % de légumes, 13 % de fruits, 13 % de céréales, 7 % de produits sucrés, 31 % de produits animaux (œufs, lait, beurre...), 3 % d'huiles et 13 % de viande. Les 33 % de fruits et légumes représentent 4,5 % de l'empreinte eau, les céréales 6,5 %, les produits sucrés 8 %, les produits animaux 18 %, les huiles 17 %, et la viande 46 %. Sans surprise, la viande et des produits animaux occupent une place considérable dans l'empreinte eau des Californiens, et cette conclusion vaut pour tous les pays industrialisés.

Comment pourrait-on alléger l'empreinte eau de ce régime tout en maintenant sa valeur nutritionnelle? Pour répondre à cette question, l'étude examine six apports essentiels à la santé : l'énergie, les protéines, les lipides, le calcium, la vitamine A et le fer, et pour chacun d'eux les quantités produites par mètre cube d'eau pour différents aliments consommés. Il faut de cinq à vingt fois plus d'eau pour produire une calorie animale plutôt qu'une calorie végétale. Mais il en faut aussi de deux à quatre fois plus pour 1 gramme de protéine animale. Les produits animaux sont en revanche quatre fois plus performants pour fabriquer des lipides. En ce qui concerne le calcium, les produits végétaux ont un très net avantage sur la viande, mais ils sont très en dessous du lait. De manière générale, et à l'exception des lipides, les pommes de terre ont une performance exceptionnelle¹⁹.

Sur cette base, l'étude examine différents régimes, en retranchant du régime type des produits animaux (viande, œuf, lait...) et en les remplaçant par des produits végétaux de même valeur nutritionnelle. Une diminution de 25 % de produits animaux réduit de 11 % l'empreinte eau. Une diminution de moitié la réduit de 37 % à 3 400 l/jour. Un régime végétarien, sans viande et avec une réduction de 30 % des laitages, la réduit de 52 %. Enfin, pour minimiser l'empreinte eau de notre alimentation, les auteurs identifient un régime dit « de survie » à base de pommes de terre, d'oignons, d'arachides et de carottes. Un tel régime permettrait d'apporter une

15. M. Mekonnen and A. Hoekstra, *The Blue, Green and Grey Water Footprint of Crops and Derived Crop Products*, Value of Water Research Report 47, Unesco-IHE, 2010.

16. Voir chapitre 3 pour des données détaillées.

17. Et 9 kg de sauterelles <http://www.planetoscope.com/Etonnant/1293-consommation-d-insectes-pour-l-alimentation-en-france.html>

18. D. Renault et W. Wallender, "Nutritional water productivity and diets", *Agricultural Water Management*, vol. 45, 2000.

19. Pour des données sur la productivité nutritionnelle de l'eau, voir chapitre 3.

nourriture équilibrée pour un coût en eau minimal de 1 000 l/jour, soit une réduction de 81 % par rapport au régime type californien.

Empreinte eau de différents régimes alimentaires

RÉGIMES ALIMENTAIRES	EMPREINTE EAU (L/JOUR)	EMPREINTE EAU (M ³ /AN)
Régime nord-américain de référence : viande et produits animaux 44% des quantités ingérées, céréales et sucreries 20%, fruits et légumes 33%, huiles 3%	5 400	1 971
Remplacement de 25% des produits animaux par des végétaux apportant un équivalent nutritionnel	4 600	1 752
Remplacement de 50% des produits bovins par des volailles	4 800	1 679
Remplacement de 50% de la viande de bœuf et de porc par des produits végétaux	4 400	1 606
Remplacement de 50% des produits animaux par des produits végétaux	3 400	1 241
Végétarien : remplacement de la totalité de la viande et de 30% du lait par des produits végétaux	2 600	949
Survie : pommes de terre, oignons, arachides et carottes	1 000	365

Source : Renault D. et Wallender W., *Nutritional water productivity and diets*, op. cit.

UNE EMPREINTE EAU À L'IMAGE DE LA CULTURE D'UN PAYS

Par-delà son côté théorique, cette étude donne une idée de la variabilité des empreintes eau. Un régime végétarien diminue par deux environ l'empreinte eau par rapport au régime de référence. À l'échelle mondiale, les empreintes eau de la consommation des pays, dont l'alimentation représente la majeure partie, reproduisent typiquement ces ordres de grandeur. Les pays à forte empreinte sont principalement les pays développés, où elle est souvent supérieure

à 2 000 m³/hab./an. À l'autre extrémité, on trouve soit des pays à culture végétarienne (notamment l'Inde et la Chine), soit des pays en développement (principalement en Afrique subsaharienne) où les régimes font peu de place à la viande et aux produits transformés. Tous ces pays ont des empreintes de consommation situées en général entre 800 et 1 000 m³/hab./an²⁰.

Remarquons ici un paradoxe étonnant : ce n'est pas dans les pays arides que les empreintes eau sont les plus faibles. La carte du monde des empreintes eau de consommation nationales ne se superpose pas à la carte du monde de l'aridité. Souvent même, les empreintes eau des pays humides ont tendance à être plus faibles que les empreintes eau des pays secs. L'Afrique est à cet égard exemplaire, avec des empreintes élevées dans toute la région circum-saharienne et des empreintes faibles ailleurs. D'où vient ce paradoxe ? De deux causes complémentaires. D'une part, le manque d'eau conduit à de faibles productivités de l'eau, comme nous l'avons vu plus haut. D'autre part, l'agriculture des pays arides comprend souvent une bonne dose d'élevage. En effet, le bétail valorise bien la végétation naturelle pauvre des parcours, steppes ou autres zones semi-désertiques. Il constitue aussi une véritable assurance-vie en cas de sécheresse, contrairement aux cultures. Les animaux sont certes décimés lors des années de vaches maigres, mais ils permettent aux hommes de survivre. Dans les régions bien arrosées, les régimes alimentaires combinent davantage les produits animaux et les produits végétaux. Ils peuvent devenir végétariens si l'eau est bien maîtrisée et suffisamment abondante. À l'aube des transitions démographiques, les densités de population étaient liées aux régimes alimentaires. Selon les théories écologiques²¹, les régions sèches où l'on se nourrit de produits animaux sont aussi des régions peu peuplées, alors que les régions humides sont souvent plus peuplées lorsque les régimes alimentaires y ont une forte base végétale. Ces différences se sont progressivement estompées avec le développement et ses conséquences démographiques. De nombreuses régions arides sont aujourd'hui des zones où le développement est ralenti et où la transition démographique prend du temps, ce qui induit une

20. www.waterfootprint.org/?pages=files/waterfootprints/nations

21. Voir à ce propos : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Surpopulation>

forte croissance démographique. La conjonction de ces éléments dans des régions de ressources rares conduit facilement à de fortes tensions sociales, attisées par de fortes migrations comme dans le cas du Sahel en Afrique de l'Ouest, ou par des tensions interethniques comme au Soudan. La déstabilisation liée au manque d'eau passe par la démographie et peut soit toucher la zone aride elle-même, soit se propager au pays destinataire des migrations, comme cela a été le cas en Côte d'Ivoire, longtemps le pôle économiquement le plus attractif d'Afrique de l'Ouest.

Nous retrouvons ici encore un des traits fondamentaux de l'eau : sa capacité à agir de manière peu visible au travers d'autres facteurs comme la nourriture ou la démographie. Et donc la difficulté de lecture des relations entre les crises et l'eau.

Aux yeux des gestionnaires de l'eau, la crise de l'eau est d'abord une question de gouvernance des ressources, une vision totalement fondée lorsqu'on examine les grands bassins-versants du monde où, par définition, on trouve de grands fleuves et donc des ressources en eau bleue importantes. Pourtant, ces grands bassins-versants ne représentent pas la totalité des situations et il existe aussi de nombreuses régions où le manque d'eau est d'abord dû à l'aridité. La vision des gestionnaires finit par faire perdre de vue le fait que, lorsque l'eau vient à manquer, il ne faut pas seulement gérer l'eau, mais bien toutes les conséquences de son manque. Gérer ce manque d'eau doit influencer la gestion de l'eau, mais aussi faire anticiper toutes ses conséquences dans des domaines connexes et souvent liés à des phénomènes démographiques.

La question de la part de la viande dans les régimes alimentaires doit cependant éviter toute analyse simpliste. Nous ne consommons en effet pas que de la viande, mais aussi du lait, des œufs, du beurre et d'autres produits animaux. Le régime indien est fortement végétarien, mais le troupeau laitier indien, avec ses 38 millions de têtes, est le premier troupeau bovin du monde. La planète consomme 700 millions de tonnes de lait par an, ce qui, à 1 000 m³/t, représente une empreinte eau de 700 km³, près du dixième de l'empreinte eau totale. Nous consommons aussi 1 000 milliards d'œufs par an, soit 62,4 millions de tonnes d'œufs ayant une empreinte eau de 12 km³. Qui plus est, ces consommations croissent de manière forte et régulière.

CARNIVORES OU VÉGÉTARIENS ? L'ÉVOLUTION DES RÉGIMES ALIMENTAIRES DES DERNIÈRES DÉCENNIES

Cette consommation de produits animaux, comme le lait ou les œufs, implique bien sûr de poursuivre l'élevage et la production de viande, ce que les partisans d'un régime alimentaire végétarien oublient souvent. Il n'en reste pas moins que la consommation de viande a un impact colossal sur la planète et pose de nombreux problèmes de santé publique, environnementaux et éthiques. La production de viande, qui était de 286,2 millions de tonnes en 2010 (4 kg/hab./an), progresse de 2,3 % par an. Elle a doublé entre 1980 et 2004 et un nouveau doublement est attendu pour la période 2000-2050 selon la FAO.

L'empreinte eau mondiale de l'élevage est de 2 400 km³ par an, soit un tiers de celle de notre alimentation. Quelque 2 370 km³ de ce total proviennent de la production de fourrage, dont 1 460 km³ des cultures et 910 km³ du pâturage. L'élevage bovin arrive en tête, avec 33 % de cette empreinte, suivi par la production de lait (19 %) et l'élevage porcin (19 %). Puis vient la volaille, avec une proportion de 18 % dont 7 % pour la production d'œufs. 94 % de l'eau utilisée pour la production de viande et de produits animaux est de l'eau verte. Dans l'étude la plus complète publiée à ce jour²², trois systèmes de production sont distingués : les systèmes industriels, les systèmes extensifs et les systèmes mixtes, combinant pâturage et compléments de céréales et de protéagineux. Ces derniers constituent l'essentiel de la production et près de 60 % de l'empreinte eau, les deux autres systèmes se partageant les autres 40 % en parts quasi égales. Observons aussi que l'utilisation de céréales et d'oléoprotéagineux augmente l'efficacité de conversion de produits végétaux en produits animaux et a tendance à réduire l'empreinte eau par unité de produit.

Nous ne dresserons pas ici un tableau complet de tous les débats et polémiques autour de la viande et de l'élevage. Il existe néanmoins un consensus sur le fait que, dans les sociétés les plus riches, on consomme trop de viande. Cette surconsommation est un fait

22. M. Mekonnen et A. Hoekstra, "A global assessment of the water footprint of farm animal products", *Ecosystems*, vol. 15, 2012.

récent. Elle n'apparaît qu'avec l'augmentation colossale de productivité de l'agriculture permise par l'industrialisation des processus de production après la Seconde Guerre mondiale. Traditionnellement, même dans les pays industrialisés, la viande était un produit précieux qu'on consommait avec sobriété et qu'on conservait précieusement. On ne distingue plus aujourd'hui les fonctions de boucher et de charcutier, on ne se souvient plus que les seconds avaient pour rôle de produire, souvent en utilisant les parties les moins nobles des animaux, des aliments de longue conservation. L'intensification est passée par là et la consommation de viande des pays industrialisés a explosé, passant d'une quarantaine de kilos à 80-90 kg par habitant et par an²³. Aux États-Unis, cette consommation atteint même 124 kg/hab./an. Cette tendance est aujourd'hui reproduite par les pays émergents. Un Chinois consommait 4 kg de viande par an en 1970, il en consomme aujourd'hui 54 kg. Pour produire cette viande et ces produits animaux, 40 % environ des céréales produites dans le monde sont mobilisées ! Un calcul simple fondé sur les équivalences caloriques montre que la « perte » de calories due à la transformation de produits végétaux en produits animaux couvrirait les besoins énergétiques de la moitié de la population mondiale actuelle.

Évolution de la consommation de viande en France entre 1950 et 2000

ALIMENTS	CONSOMMATION APPARENTE (KG/HAB./AN) EN :			AUGMENTATION
	1950	1970	2000	1950-2000
Viandes rouges (bœuf, veau, mouton)	18,7	23,6	22,3	19 %
Porc et charcuterie	15,3	21,5	33,5	119 %
Volailles	6,0	14,2	23,8	297 %
Total	40	59,3	79,6	99 %

Source : P. Combris, *Cinquante ans de consommation de viande et de produits laitiers en France*, Renc. Recherche Ruminants, 2003.

23. Il faut toutefois être attentif au fait que consommation ne signifie pas « ingestion ». Il s'agit ici des produits commercialisés, or tous ne sont pas mangés, comme le montre la partie suivante sur le gaspillage alimentaire.

La surconsommation de viande a de nombreux impacts sur la santé bien établis par l'OMS. Elle est clairement associée aux maladies cardio-vasculaires, première cause de mortalité en Europe et aux États-Unis. Les autres risques couramment évoqués sont le cancer du système digestif ou encore la transmission d'agents pathogènes des animaux à l'homme (vache folle, grippe aviaire). L'OMS préconise en conséquence de réduire notre consommation de manière à converger vers la moyenne mondiale actuelle (41 kg par personne et par an), qui serait optimale pour la santé. Cette valeur ramènerait la consommation des pays européens et nord-américains à son niveau d'après guerre, ce qui paraît toutefois peu réaliste.

Manger trop de viande est dangereux pour la santé, la cause est entendue. Toutefois, il faut aussi reconnaître que produire de la viande dans des régions de prairies valorise bien ces milieux et contribue à la biodiversité des agro-écosystèmes. Pour peu qu'on parvienne à réduire les émissions de méthane des ruminants, ce mode de production mérite d'être favorisé car il demeure marginal, voire en déclin, dans de nombreux pays industrialisés. Même en France, pays où l'élevage semble avoir de l'espace pour ses productions, au moins 80 % de la viande consommée est produite dans des conditions intensives. Les poulaillers actuels peuvent compter jusqu'à 30 000 poules entassées à 20 ou 24 par mètre carré. Les porcs ne sont pas en reste, même si les élevages français sont de plus petite taille que ceux de nombreux autres pays : en moyenne 170 truies contre souvent 10 000 aux États-Unis, par exemple. Peu d'animaux sont encore produits de manière extensive à partir de prairies permanentes ou de déchets, comme l'étaient les cochons de nos grands-parents. Une des raisons est que l'élevage extensif augmente significativement les coûts de production, ce que les consommateurs ne sont pas prêts à accepter.

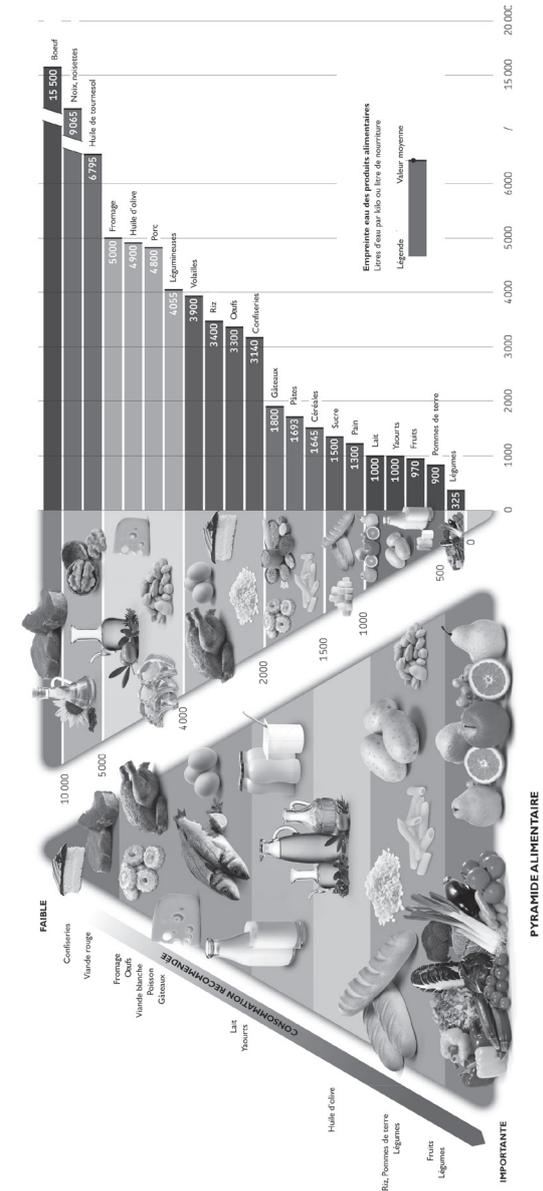
RÉGIMES ALIMENTAIRES ET PRODUCTIVITÉ NUTRITIONNELLE DE L'EAU

Fustiger la consommation de viande pourrait être utile à la prise de conscience des consommateurs, mais ne fera sans doute

changer les choses que marginalement, étant donné la quantité et la variété des produits animaux consommés. Il serait plus judicieux de militer pour une alimentation plus saine, tout en tentant de limiter les impacts inéluctables de la production agricole sur l'environnement. Car l'équilibre nutritionnel semble avoir été négligé ces dernières décennies, pour partie parce que, pour éradiquer le risque de pénurie, les politiques agricoles ont subventionné les céréales qui forment le socle de la sécurité alimentaire. Ainsi, l'alimentation-santé garantie par une diversité de produits incluant des fruits et légumes s'est trouvée mécaniquement défavorisée, tandis que les modes de vie s'urbanisaient et déconnectaient la population de la production agricole et alimentaire. Malheureusement, revenir sur ces politiques à l'heure où la sécurité alimentaire mondiale est incertaine, et où les négociations sur le commerce international montrent la réticence de nombreux pays à risquer leur sécurité alimentaire, s'avère très difficile. Pourtant, au moment où on redécouvre que l'environnement et la santé sont interdépendants, l'idée en vogue est de retrouver une approche plus globale visant à promouvoir des régimes alimentaires bénéfiques pour la santé et l'environnement. La FAO a par exemple lancé un programme intitulé « Régime alimentaires durables » qui vise à la fois à changer les modes de consommation en revenant à une nutrition saine, comprenant une diversité de produits locaux (souvent perdus au profit de produits importés), et à réduire les empreintes carbone et eau.

Commentaires de l'image (page de droite) : la pyramide alimentaire indique les proportions recommandées des principaux types d'aliments pour que ces derniers soient les plus profitables à notre santé. La pyramide inversée de droite recense en parallèle les impacts sur l'environnement et ici l'empreinte eau. Les aliments de la base de la pyramide sont ceux dont l'empreinte eau et les impacts sur l'environnement sont les plus faibles.

Les nouvelles approches font référence aux pyramides alimentaires développées par Walter Willett à l'École de santé publique de Harvard. L'idée est que certains aliments à la base de la pyramide (fruits et légumes) doivent être consommés en grandes



Source : Fondation Barilla pour la nutrition.

quantités, et que, plus on monte dans la pyramide, plus les quantités consommées doivent se réduire afin de ne pas nuire à la santé. On trouve plusieurs variantes de ces pyramides, qui conduisent toutes à des hiérarchies proches, avec des produits végétaux non transformés à la base et des produits animaux ou transformés au sommet. Les empreintes eau et carbone des produits décrivent en parallèle une pyramide inversée : plus on monte dans la pyramide alimentaire, plus ces empreintes et les impacts sur l'environnement augmentent. Ces deux pyramides inversées constituent une base de réflexion pour retisser les liens entre notre alimentation, notre santé et notre environnement. Elles devraient en particulier aider à repenser les désordres associés à l'obésité, nouveau fléau du ^{xxi}e siècle. Ces derniers touchaient en 2008 1,4 milliard d'adultes, dont plus de 500 millions d'obèses, des chiffres du même ordre de grandeur que ceux de la sous-nutrition et de la malnutrition, et qui résultent pour une grande part de la disponibilité accrue et à faible coût d'aliments riches en énergie.

PERTES ET GASPILLAGES ALIMENTAIRES

Pour utile qu'il soit, le débat sur les régimes alimentaires et leurs empreintes eau ne doit pas être l'arbre qui cache la forêt. Car même sans changer beaucoup notre régime alimentaire, nous pourrions réduire considérablement notre empreinte eau en diminuant les pertes et les gaspillages de nourriture. Ici, les faits sont cruels : qu'on soit dans un pays en développement ou dans un pays industrialisé, entre 30 et 50 % de la nourriture produite se perd « de la fourche à la fourchette ». Le premier état des lieux mondial dressé par la FAO conclut qu'au moins 1,3 milliard de tonnes de nourriture sont gaspillées chaque année dans le monde. En se référant à l'ordre de grandeur d'un millier de tonnes d'eau nécessaire pour produire une tonne de céréales, ce n'est donc pas de quelques millions de litres d'eau qu'il est question ici, mais bien de milliers de milliards de mètres cubes d'eau !

L'ordre de grandeur de ce gaspillage explique tout d'abord certains hiatus dans l'information sur la nourriture dus à l'ambiguïté du terme « consommation » : les quantités consommées ne sont pas

forcément ingérées. Ainsi, les besoins caloriques des diététiciens se situent entre 2 000 et 2 500 calories par jour et par personne, alors que la FAO considère qu'il faut au moins 3 000 calories pour éviter la sous-nutrition. La FAO se place du point de vue du producteur, tandis que le diététicien s'intéresse aux quantités réellement ingérées. Il en est souvent de même lorsqu'on compare des chiffres de consommation apparente basés sur la production avec ceux basés sur des enquêtes de consommation. Le Crédoc évalue par exemple à 2 072 kcal/jour la quantité d'énergie moyenne consommée quotidiennement par les adultes en France.

La prise de conscience de l'importance des pertes alimentaires n'est pas nouvelle. En 1975, l'Assemblée générale des Nations unies décidait une mobilisation mondiale pour les réduire de moitié. Un programme international fut alors lancé par la FAO, visant surtout à réduire les pertes de récolte et de commercialisation dans les pays en développement. Mais les succès grandissants de la révolution verte firent rapidement basculer les priorités, et ce programme sombra dans l'oubli. Pendant les décennies suivantes, la sous-nutrition s'est réduite, laissant même penser, dans les années 2000, que l'Objectif du millénaire de réduction de moitié de ce fléau avant 2015 serait atteint sans problème. Aujourd'hui, alors qu'on sait cet objectif hors d'atteinte, la question des pertes et gaspillages refait surface et des estimations de plus en plus précises sont disponibles.

DES PERTES VARIABLES TOUT AU LONG DE LA CHAÎNE ALIMENTAIRE

Les pertes et gaspillages se produisent tout au long de la chaîne alimentaire, surtout près du champ dans les pays en développement, surtout près de la fourchette dans les pays industrialisés.

Dans les pays en développement, les pertes sont dues pour beaucoup aux techniques de récolte peu efficaces, au manque d'infrastructures de stockage et de conservation, aux moyens de transport insuffisants pour assurer la commercialisation des produits, aux accidents météorologiques. Ces pertes sont très variables dans le temps et dans l'espace, comme le montrent

les différentes estimations réalisées. Elles affectent tous les produits et sont d'autant plus importantes que le climat est chaud et humide. L'ordre de grandeur de ces pertes de récolte est estimé entre 10 et 30 % de la production agricole. Cela dit, comme les quantités produites et consommées par habitant dans les pays en développement sont moindres que dans les pays industrialisés, les quantités perdues sont nettement inférieures (de l'ordre de 10 kg de nourriture par an), contre une centaine de kilos en Europe et en Amérique du Nord.

Dans les pays industrialisés, les pertes constituent un scandaleux gaspillage. Certaines sont incontournables (épluchures, parties non consommables), mais la plus grande partie d'entre elles pourrait être évitée : dans de nombreux cas, ce sont des produits intacts, qui n'ont même pas été touchés par les consommateurs, qui sont jetés pour différentes raisons. Par exemple, les produits non calibrés ou présentant des petits défauts passent mal auprès des consommateurs ; ils sont souvent délaissés dès la récolte. La production peut aussi dépasser la demande pendant les périodes de pleine production, aboutissant à la destruction de tonnes de fruits et légumes afin d'éviter un effondrement des cours. Autre problème, l'information sur les dates limites de vente ou de péremption conduit les supermarchés ou la restauration collective à jeter des produits encore parfaitement consommables. Le consommateur, enfin, gère souvent mal ses achats et jette lui aussi de nombreux produits, sans même avoir une idée des proportions de produits ainsi gaspillés, comme le révèlent les enquêtes réalisées au Royaume-Uni par le Programme d'action sur les déchets et les ressources (WRAP). Les restaurants collectifs contribuent pour beaucoup aux pertes, souvent à cause des réglementations relatives à l'hygiène.

Les données sur les pertes sont pour l'instant fragmentaires, et il faut procéder à des comparaisons et à des extrapolations pour avoir une idée d'ensemble. Comme nous allons le voir toutefois, ces comparaisons montrent une convergence des différentes études réalisées, certaines se focalisant sur les pertes des dernières étapes, du commerce de détail aux consommateurs, d'autres, plus récentes, tentant de produire une vision à grande échelle et examinant les pertes à toutes les étapes.

LA SURCONSOMMATION DES MÉNAGES ET DE LA RESTAURATION COLLECTIVE

Pour évaluer les pertes des ménages, il faut se pencher sur le contenu des poubelles, ce à quoi le programme WRAP du Royaume-Uni s'est attelé en Écosse. Ce programme a pour mission de définir et de mettre en œuvre des actions visant à réduire la production de déchets dans tous les domaines. Or on ne peut lutter efficacement que contre un phénomène qu'on comprend bien. Les rudologues du WRAP ont donc analysé des milliers de poubelles afin de comprendre. Les pertes alimentaires écossaises ont été estimées à 103 kg par habitant et par an. Sur ce total, 30 % ont été considérées inévitables car principalement constituées de parties non comestibles des aliments. Les autres 70 % étaient évitables et se sont donc révélées être du gaspillage. Ce sont finalement 71 kg par habitant et par an qui sont gaspillés chaque année. Ces pertes coûtent directement 225 euros à chaque Écossais. À ces coûts directs s'ajoutent de nombreux coûts indirects, non chiffrés par l'étude, tels que ceux de la collecte et du traitement des déchets.

Les produits les plus gaspillés sont, dans l'ordre décroissant de poids, le lait et les produits laitiers, le pain et les produits à base de céréales, les boissons gazeuses, les fruits et légumes frais et les plats préparés. La viande et le poisson sont généralement peu jetés. Toutefois, en valeur, leur gaspillage représente une trentaine d'euros par personne et par an, davantage que les autres produits. Selon le WRAP, plus de la moitié des produits sont gaspillés car leur date limite de consommation est dépassée. Plus de la moitié des produits sont également jetés avant même d'avoir été déballés ou ouverts.

Le WRAP étant voué à l'action, il a depuis cette étude lancé une grande campagne qui vise à réduire le gaspillage de manière drastique : de 390 000 tonnes à 140 000 tonnes en quelques années. Avec les pouvoirs publics, des actions de sensibilisation des consommateurs sont mises en place dans l'ensemble du Royaume-Uni, des changements dans l'étiquetage des produits sont en cours afin de clarifier la signification des dates limites de vente ou de consommation.

Une autre étude menée par le ministère étatsunien de l'Agriculture a évalué les pertes de la chaîne alimentaire depuis le commerce

de détail jusqu'aux consommateurs finaux. Cette fois, les consommateurs incluait également la restauration collective (cantines, hôpitaux, restaurants...). Cette étude date de 1997, mais elle sert de référence, étant donné le détail de l'analyse. Au début des années 2000, 43 millions de tonnes de nourriture étaient gaspillées, soit 165 kg par habitant et par an, un total nettement supérieur donc à celui des Écossais, mais qui s'expliquait par le champ plus large des investigations incluant la restauration collective. De l'ensemble de la nourriture disponible pour un Américain évaluée alors à 600 kg par an, 28 % étaient perdus ou gaspillés dans les étapes finales étudiées. Il apparaissait que l'essentiel des pertes était le fait des consommateurs finaux, tant au niveau des ménages que de la restauration collective. En revanche, seuls 2 % de ces pertes se produisaient dans le commerce de détail, un ordre de grandeur corroboré depuis par d'autres études.

La nourriture perdue ou gaspillée lors de ces étapes finales est d'abord le lait et les produits laitiers, les produits à base de céréales et les boissons gazeuses. 30 % du total de ces produits sont jetés. Pour d'autres produits comme les conserves, la viande ou le poisson, les pertes sont de l'ordre de 15 % seulement. Les solutions évoquées par le ministère américain de l'Agriculture vont surtout dans le sens d'une mise à disposition facilitée des produits proches de leur date de péremption par les associations caritatives.

L'Union européenne a aussi lancé sa première évaluation en s'appuyant sur les données statistiques des pays de l'Union pour les années 2006 à 2009. L'étude distingue les trois grandes sources de pertes des études précédentes, pertes ménagères, pertes du commerce de gros et de détail, pertes de la restauration collective, et apporte par ailleurs une estimation des pertes relatives à la transformation des produits agricoles. Seules manquent donc dans l'évaluation les pertes des premières étapes, du champ à l'usine de transformation ou au commerce.

Dans ces quatre domaines, un total de 179 kg de nourriture est perdu chaque année pour chaque Européen. Ce sont en tout 89 millions de tonnes de nourriture qui alimentent la filière déchets ! Dans le détail, les familles jettent 76 kg par an, le commerce de gros et de détail 8 kg par an. Cette valeur est inférieure à celle des États-Unis, qui relèvent 9 kg dans le seul commerce de détail. Les pertes de la

restauration collective sont, elles, évaluées à 25 kg par an. Le total perdu ou gaspillé pour ces trois postes est donc de l'ordre de 109 kg, un chiffre élevé mais nettement inférieur à celui des États-Unis. La nouveauté de l'étude concerne l'évaluation des pertes de la filière agroalimentaire, à l'amont du commerce, qui s'élèvent à 70 kg par habitant et par an. Ces pertes sont en grande partie inévitables et ne constitueraient pas un gaspillage, selon les auteurs de l'étude.

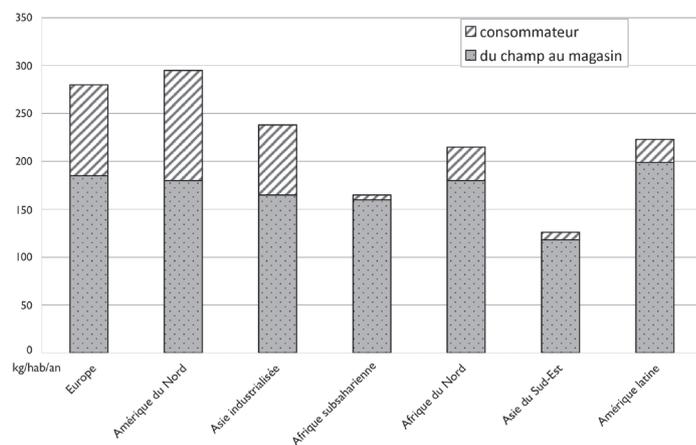
Ces différentes estimations de pays industrialisés sont relativement cohérentes. De l'ordre de 70 à 100 kg de nourriture sont perdus par personne et par an dans les étapes finales de consommation. Une part énorme (70 %) de ces pertes pourrait être évitée et constitue des gaspillages.

UN IMPACT MONDIAL COLOSSAL

À l'échelle mondiale, enfin, la première synthèse de l'ensemble des pertes, « de la fourche à la fourchette », vient d'être produite par la FAO. Pour les Nations unies, les pertes mondiales s'élèvent à 1,3 milliard de tonnes de nourriture, soit 186 kg de nourriture par personne chaque année. Ce chiffre énorme représente 30 % de la production agricole mondiale.

L'ensemble des pertes avant consommation, de l'ordre de 170 kg par personne et par an, est remarquablement peu variable entre les continents. Ce sont les consommateurs finaux qui sont responsables des différences : plus un continent est industrialisé, plus élevées sont les pertes de ses consommateurs. En Afrique subsaharienne ou en Asie du Sud-Est, les quantités de nourriture produites sont de l'ordre de 460 kg par habitant et par an, et la nourriture est perdue essentiellement dans les étapes initiales de production, transport et commercialisation. Ces pertes se situent dans une fourchette de 120 à 160 kg par personne, environ 30 % du total produit. L'Asie du Sud est la championne toutes catégories de l'efficacité alimentaire, avec des pertes totales de 125 kg par habitant et par an. Par contraste, l'Europe et l'Amérique du Nord requièrent une production de 900 kg de nourriture par habitant et par an. Les consommateurs en perdent ou en gaspillent de 70 à 100 kg et les pertes totales, incluant celles des champs, avoisinent 300 kg par personne.

Vue d'ensemble des pertes de produits agricoles par continents



Source : *Global Food Losses and Food Waste*, FAO, *op. cit.*

Toute cette nourriture perdue ou gaspillée a des impacts énormes sur l'environnement et l'économie. Ces impacts ne peuvent être évalués correctement que par une analyse de cycle de vie des différents produits jetés afin d'estimer toutes les ressources (sols, eau, travail, intrants...) gaspillées, toutes les conséquences ensuite sur la filière déchets en termes de pollutions et d'émissions de gaz à effet de serre. Ce travail n'a été fait que partiellement jusqu'ici. L'étude européenne chiffre par exemple à 1,9 tonne les émissions de CO₂ par tonne de déchet alimentaire. Les 170 millions de tonnes d'émissions européennes résultant des pertes alimentaires pèsent autant que les émissions de gaz à effet de serre totales annuelles de la Roumanie et des Pays-Bas réunis. Pour les consommateurs, les pertes sont avant tout économiques et se chiffrent par famille entre 1 000 et 1 500 euros par an.

Ce scandale du gaspillage alimentaire commence à être reconnu et relayé par les médias. Des actions de sensibilisation à large échelle se mettent en œuvre. Tristram Stuart avec ses banquets préparés à partir de produits disqualifiés est sans doute l'un des meilleurs promoteurs de la cause, mais des initiatives similaires naissent dans

de nombreux pays industrialisés. Souvent, les premières initiatives cherchent à valoriser les produits proches des limites de péremption. Un succès reconnu dans ce domaine est celui de l'université italienne de Bologne : elle a créé une start-up, « Last Minute Market », qui aide les entreprises et les consommateurs à valoriser toutes sortes de produits à la veille d'être transformés en déchets. D'autres actions de sensibilisation du même type fleurissent actuellement et produisent des premiers résultats. Une école de l'est de la France a réduit drastiquement ses gaspillages après qu'un artiste local a été sollicité pour produire une œuvre d'art avec le pain gaspillé. Des restaurants itinérants faisant découvrir la cuisine du monde et utilisant des produits ayant atteint leur date limite de vente se développent à Berlin. Toute cette sensibilisation va bientôt se trouver amplifiée par l'adoption par le Parlement européen d'une résolution visant à réduire de moitié les gaspillages européens d'ici à 2025. Cet objectif se décline progressivement en plans d'actions dans les différents pays de l'Union.

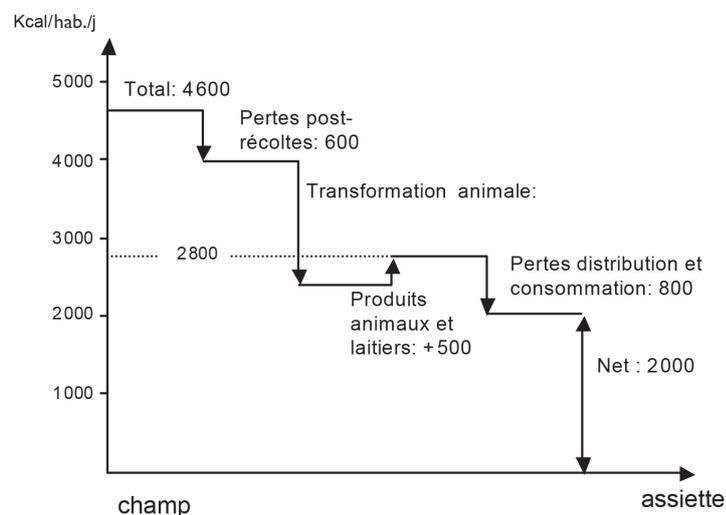
RETOUR SUR LES CALORIES ET LA VIANDE

Une vision d'ensemble des pertes alimentaires reste à construire, mais la situation globale en termes de calories mérite le détour. L'agriculture produit en moyenne 4600 calories par personne et par jour. De ce total, 1 400 (on retrouve donc ce chiffre de 30% de la production totale) sont perdus « de la fourche à la fourchette ». 1 700 calories sont également utilisées pour produire de la viande et des produits animaux qui en restituent 500. Restent finalement 2 000 calories par personne et par jour, soit moins de la moitié du total produit.

Ces données démontrent que nous disposons dès aujourd'hui de quoi nourrir une population de 9 milliards d'êtres humains, population attendue pour l'année 2050. Elles interpellent aussi sur le fonctionnement du système alimentaire mondial dans un contexte de rareté grandissante des ressources et de menaces de changement climatique. Il semble bien qu'à l'instar de l'énergie nous ayons aussi besoin d'une transition alimentaire afin de réduire les pertes, de contrôler les impacts de la production agricole sur notre

environnement et de reconstruire avec l'alimentation le socle de notre santé.

Production, transformation et pertes de calories par l'agriculture du champ à l'assiette



Source : V. Smil, *Feeding the World: A Challenge for the Twenty-First Century*, MIT Press, Cambridge, USA, 2000.

QUELS IMPACTS SUR L'EAU ?

Si 7200 km³ d'eau sont nécessaires par an pour nourrir l'ensemble de la planète, il est évident que réduire, ne serait-ce que de quelques pourcents, les pertes et les gaspillages alimentaires aura un impact bien plus grand sur l'eau que toute autre mesure. De manière plus générale, d'ailleurs, c'est l'ensemble des ressources en terres, en engrais, en biodiversité qui bénéficiera de cette réduction. Ce sont aussi tous les impacts de la filière déchets sur les émissions de gaz à effet de serre qui seront réduits, à la fois grâce à la réduction de l'énergie requise pour la collecte et grâce à celle des gaz émis par l'incinération ou par les décharges, dont le méthane provient de la

fraction organique des déchets. L'économie sera également affectée, quoique de manière complexe, car tous les maillons de la chaîne ne sont pas touchés par les pertes de la même manière. Ceux notamment du commerce de gros et de détail, dont on a vu qu'ils ont la proportion de pertes la plus faible, semblent être les bénéficiaires du gaspillage qui augmente la demande.

Comment estimer les impacts sur l'eau ? Le WRAP, véritable pionnier dans le domaine, a tenté de le faire dans le cas du Royaume-Uni. L'empreinte eau de consommation de l'alimentation anglaise est l'une des plus basses d'Europe, 1 100 m³/an (un peu plus de 3 000 litres par jour)²⁴, ce qui tient pour une bonne part aux conditions semi-extensives de l'élevage anglais. Sur la base des résultats écossais, les pertes de nourriture de l'ensemble des Britanniques ont aussi été estimées à 138 kg par personne²⁵ en 2009, dont deux tiers de gaspillages. L'eau virtuelle gaspillée a été estimée à 6 milliards de mètres cubes par an, 284 litres d'eau par personne et par jour, soit près de 10 % de l'empreinte eau totale.

Le chiffre avancé et le pourcentage de l'empreinte eau gaspillée paraissent faibles en regard des 30 % de pertes de nourriture. Pourquoi ? D'abord parce que l'empreinte eau est estimée pour la production de toute l'alimentation consommée, alors que l'estimation des pertes ne correspond qu'au dernier maillon de la chaîne, le consommateur final, responsable d'environ la moitié des pertes. De plus ne sont pris en compte que les gaspillages et non la totalité des pertes. Enfin, en accord avec ce qui est observé dans d'autres pays, les gaspillages alimentaires touchent moins la viande ou le poisson, riches en eau virtuelle, que les fruits et légumes ou les céréales. Compte tenu de ces éléments, les pertes totales d'eau virtuelle « de la fourche à la fourchette » sont sans doute de l'ordre du double – soit environ 500 litres d'eau par personne et par jour.

Sans nous en rendre compte, nous, citoyens des pays développés, jetons chaque jour avec la nourriture gaspillée des quantités d'eau supérieures à l'ensemble de nos usages domestiques, qui sont de l'ordre de 100 à 200 litres par personne. Ces gaspillages entraînent

24. The Water and Carbon Footprint of Household Food and Drink Waste in The UK, rapport WRAP, WWF, 2011.

25. Ce chiffre exclut donc les pertes entre le champ et le supermarché.

« à l'amont », dans toute la filière de production, des pertes tout aussi importantes. Bien sûr, il ne s'agit pas du même type d'eau, l'eau de notre nourriture étant principalement de l'eau verte, tandis que l'eau domestique est de l'eau bleue, prélevée dans les rivières et les nappes souterraines. Toutefois, les gaspillages alimentaires ne contribuent-ils pas également à la crise de l'eau ? Le WRAP, s'intéressant à cet aspect des choses, est remonté à l'origine des produits et à la situation de l'eau dans les bassins-versants de production. De manière surprenante, les gaspillages affectent des produits (bananes, café, cacao, riz...) provenant du Ghana, de la Côte d'Ivoire, de l'Inde, du Brésil, de la Thaïlande, cinq pays faisant partie du « top 10 » des pays dont les ressources en eau sont sous tension, avec pour chacun d'eux des gaspillages d'eau de plus de 100 millions de mètres cubes par an²⁶.

Le gaspillage alimentaire a donc bien des conséquences sérieuses sur l'eau de la planète. Les chaînes d'approvisionnement des produits que nous consommons sont de plus en plus internationales et de plus en plus compliquées. Étant donné les différences extrêmes dans la disponibilité en eau, le fait d'échanger des produits entre régions arides et régions bien pourvues en eau présente des avantages pour la sécurité en eau, comme nous l'avons vu au chapitre précédent. Pour autant, dans le monde de ressources rares dans lequel nous sommes entrés, gaspiller des millions de mètres cubes d'eau provenant de pays où les ressources en eau sont déjà sous pression doit appeler l'ensemble de la filière agroalimentaire et les consommateurs à une prise de conscience et à un changement des comportements.

L'EAU GRISE DES PRODUITS INDUSTRIELS

L'empreinte eau de notre alimentation est celle qui, jusqu'ici, a fait l'objet du plus grand nombre d'études. Cela s'explique évidemment par les volumes d'eau considérables mobilisés par le secteur

agricole. Les produits manufacturés de l'artisanat ou de l'industrie ont, eux, une empreinte globale estimée au total à 400 km³, soit 65 m³ d'eau par habitant et par an. Un Français a par exemple une empreinte eau pour ces produits de 186 m³ par an, dont 62 % résultent de produits importés. Ces chiffres sont faibles en comparaison de ceux des produits agricoles, mais il faut les examiner plus attentivement.

Tout d'abord, l'eau industrielle est essentiellement de l'eau bleue ou grise. C'est de l'eau ayant été prélevée, traitée et dont la quasi-totalité est rejetée sous une forme dégradée. Dans l'état actuel des connaissances, les empreintes en eau grise sont estimées de manière très grossière, comme nous l'avons vu : on évalue la fraction consommée à quelques pourcents et le restant se transforme en empreinte eau grise uniquement en proportion de l'eau usée non traitée par une station d'épuration. Si 1 m³ d'eau usée est rejeté sans traitement, ce mètre cube contribue intégralement à l'empreinte en eau grise. Si ce mètre cube est rejeté d'une station d'épuration, son empreinte est considérée comme nulle.

En fonction du type de dégradation de l'eau, il faudrait estimer le volume total d'eau bleue nécessaire pour diluer suffisamment la pollution afin que son impact sur la qualité de l'eau et des écosystèmes aquatiques devienne négligeable. Une telle évaluation devrait dépendre du type de dégradation et de l'état des écosystèmes aquatiques impactés. Elle demanderait un énorme travail, étant donné la diversité des situations. Il faudrait aussi appliquer un facteur de dilution à l'eau rejetée par une station d'épuration car, même dans ce cas, les eaux usées perturbent les milieux aquatiques. Les stations d'épuration sont en effet conçues pour réduire en priorité la charge organique des eaux usées. De nombreuses molécules peuvent passer au travers et se retrouver dans les eaux rejetées²⁷.

Les estimations de l'empreinte en eau des activités manufacturières sont donc extrêmement grossières et cela justifie que, pour de nombreux industriels, comme nous le verrons au chapitre suivant, l'approche développée par le Water Footprint Network

26. Gaspillages largement sous-estimés puisqu'ils n'incluent pas les pertes de production dans le reste de la chaîne d'approvisionnement.

27. L'analyse des eaux usées et de leurs rejets a permis d'obtenir des cartographies de la consommation de drogue dans plusieurs pays européens. Voir par exemple : <http://www.durableo.fr/article-pollution-de-l-eau-par-les-drogues-cocaine-amphet-mdma-74338248.html>

paraît insuffisamment utile et pertinente. Pour autant, cette analyse classique est un révélateur des impacts de notre consommation de biens manufacturés sur l'eau. Ainsi, la France « sous-traite » plus de 60 % de son empreinte eau industrielle à d'autres pays, et la quasi-totalité de cette empreinte est de l'eau grise, donc rejetée dans les milieux sans traitement. La Chine est évidemment un des pays où l'empreinte en eau grise de la production industrielle de nombreux pays est très forte.

Même si cette production n'est pas intégrée dans l'empreinte eau industrielle, le coton de nos vêtements a aussi des impacts importants sur l'eau de plusieurs pays. Le coton est produit dans des pays généralement arides. C'est donc souvent de l'eau bleue d'irrigation qui est utilisée pour le produire. Et la production est gourmande en eau : il faut environ 10 000 litres d'eau pour obtenir 1 kg de coton, 2 500 litres pour un tee-shirt de 250 grammes, ou 8 000 litres pour un jean de 800 grammes. Au total, la production de coton consomme 3 % de l'eau agricole.

Le coton et ses produits associés représentent 57 % des importations d'eau virtuelle d'irrigation de la France, et plusieurs pays industrialisés sont dans des situations comparables. Les principaux bassins de production du coton importé par les Français sont, dans l'ordre, la mer d'Aral, l'Indus, le Guadalquivir, le Tigre et l'Euphrate et le Mississippi. Le bassin de la mer d'Aral représente à lui seul 6 % des importations d'eau virtuelle d'irrigation. Or la mer d'Aral, comme nous l'avons déjà mentionné, a été progressivement réduite à une peau de chagrin, notamment du fait de cette production de coton, irriguée à 80 %.

Quel comportement adopter face à cette situation ? Faut-il arrêter d'importer du coton des pays souffrant de pénuries d'eau ? Sans doute serait-il important pour les consommateurs de mieux savoir quelles conséquences leurs modes de consommation ont sur les ressources de la planète, afin d'agir de manière responsable. Une bonne part du chemin pourrait déjà être accomplie si, grâce à une prise de conscience des impacts, le gaspillage était réduit.

VIII. L'EMPREINTE EAU ET LES ENTREPRISES

Pour la majorité des professionnels de l'eau, les concepts d'eau virtuelle et d'empreinte eau sont encore rangés au rayon des théories plus intéressantes pour stimuler le débat que pour guider l'action. Il faut reconnaître qu'ils sont confrontés en priorité aux questions très concrètes touchant à l'eau bleue, à caractère essentiellement local, et ne perçoivent pas forcément dans quelle mesure des considérations internationales devraient interférer avec leur travail.

Les professionnels de l'eau sont pourtant conscients des enjeux mondiaux de l'eau, mais leur vision reste d'une certaine manière « précopernicienne » : le monde entier tourne autour de l'eau. Ainsi, dans les grands forums internationaux, il est toujours difficile d'inscrire l'eau comme une réponse aux enjeux des politiques agricoles, industrielles, démographiques ou de santé publique. L'approche générale est d'analyser les problèmes liés à l'eau et de tenter de les résoudre par une meilleure gestion, plus précisément par une gestion plus « intégrée ».

Mais à force de vouloir maintenir l'eau au centre des débats, le risque est grand de passer à côté des vrais problèmes. Dans un monde de plus en plus interconnecté, la gestion de l'eau risque d'échapper de plus en plus aux gestionnaires de l'eau. Elle sera déterminée autant par la géopolitique, le commerce international, les politiques influant sur la consommation que par la gestion locale des ressources ou des services de l'eau.

LES ENTREPRISES INTERNATIONALES SOUCIEUSES DE MAÎTRISER LEUR EMPREINTE EAU

La réticence vis-à-vis de l'empreinte eau n'est pourtant pas partagée par les entreprises internationales, qui sont nombreuses à s'en soucier pour guider leur développement ou pour soigner leur

image. On peut distinguer plusieurs approches en fonction des risques encourus et des motivations.

Certaines entreprises prélèvent elles-mêmes de l'eau bleue en quantité pour produire des boissons ou d'autres biens riches en eau. On trouve dans cette catégorie les grands producteurs de sodas ou de bière (Coca-Cola, Nestlé, SABMiller...) ou encore des cimentiers (Lafarge,...). Ces entreprises anticipent au moins trois types de risques, des risques de production liés à la dégradation de la ressource en quantité ou en qualité, des risques de conflits locaux liés à la compétition pour la ressource, des risques d'image et de réputation enfin, souvent associés aux précédents.

D'autres entreprises fabriquent des produits riches en eau virtuelle et ont des chaînes d'approvisionnement mondialisées. On trouve dans cette catégorie l'industrie du luxe, comme par exemple LVMH, dont de nombreux produits dépendent de productions agricoles spécialisées (plantes à parfum, cuir...). Pour ces entreprises, le premier risque est dû à la vulnérabilité de leurs chaînes d'approvisionnement qu'elles contrôlent mal car elles sont généralement entre les mains d'intermédiaires soucieux de préserver leur commerce et de ne pas être court-circuités par les entreprises elles-mêmes. Le second risque est lié à leur réputation, et il est d'autant plus important que ces entreprises sont exposées en direct aux consommateurs.

Il existe enfin des entreprises soucieuses de leur image auprès de leurs clients ou auprès du public et qui intègrent les questions d'eau dans leur approche de responsabilité sociale et environnementale. Il peut s'agir soit simplement d'améliorer son image en intégrant des problématiques environnementales (en anglais, green washing), soit de rester compétitif sur le long terme, les deux n'étant pas incompatibles. Le cas de l'entreprise Accor est instructif. Dans l'hôtellerie, l'empreinte eau dépend surtout de l'alimentation, dont nous avons vu au chapitre précédent qu'une part importante était gaspillée, notamment dans la restauration. La chaîne Accor a donc entrepris de réduire son empreinte eau en portant l'effort sur la réduction des pertes alimentaires. L'étude du comportement du consommateur et sa sensibilisation sont ici des éléments clés. Quels sont les modes de présentation de la nourriture, comment améliorer le conditionnement des produits pour minimiser les

gaspillages? Autant de préoccupations suscitées par l'estimation de l'empreinte eau de l'entreprise, qui démontrent que les préoccupations environnementales peuvent aussi être des alliées de la rentabilité.

Les entreprises intégrant l'empreinte eau dans leurs modèles économiques combinent donc quatre principaux types de préoccupations. Une volonté tout d'abord de garantir leurs modèles de production dans la durée et d'éviter les risques liés aux pénuries ou aux dégradations de la ressource en eau. Une volonté de réduire leurs impacts locaux sur les ressources en eau lorsqu'elles en prélèvent des quantités importantes. Une volonté de réduire les risques dans leurs chaînes d'approvisionnement, notamment lorsque ces chaînes sont complexes et difficiles à maîtriser. Une volonté, enfin, de soigner leur image auprès du public et des consommateurs.

LA TRILOGIE RÉDUIRE, RECYCLER, COMPENSER

Cette multiplicité de préoccupations ainsi que le sérieux des problèmes d'approvisionnement et de pénurie d'eau expliquent le grand nombre d'entreprises impliquées dans les estimations d'empreinte eau, et plus généralement dans les approches d'intendance de l'eau²⁸ qui clarifient les engagements des entreprises et les démarches de qualité mises en place pour préserver les ressources.

L'étude mise en œuvre par la compagnie Coca-Cola depuis 2005 est à ce titre intéressante, car elle fait partie des plus abouties. L'entreprise combine les quatre types de préoccupations et de risques évoqués ci-dessus, de processus de production, de chaînes d'approvisionnement, notamment en sucre, de prélèvements et d'impacts sur les ressources en eau locale, et bien sûr de réputation. Elle a engagé des travaux avec des organisations environnementales comme le WWF ou The Nature Conservancy pour analyser l'empreinte eau de ses produits et mettre en place des mesures pour la réduire. Comment ces différents risques sont-ils intégrés dans la politique de responsabilité sociale et environnementale

28. En anglais, *water stewardship*.

de la compagnie? Chaque risque a sa propre démarche. En ce qui concerne les processus de production et d'approvisionnement, la principale empreinte est celle des produits agricoles. Une bouteille de 50 cl de Coca-Cola²⁹ a une empreinte eau de 35,4 litres qui se décompose en 28 litres liés aux ingrédients, 7 litres liés à la production de la bouteille en PET et 0,4 litre lié au processus de production en usine.

Composition de l'empreinte eau d'une bouteille de Coca Cola

TYPES D'EAU	EAU BLEUE	EAU VERTE	EAU GRISE
Composition de l'empreinte eau d'une bouteille de Coca-Cola de 50 cl	8,4 l	15 l	12 l
Origine de l'empreinte	Production des betteraves à sucre Usine de production (0,4 l)	Production des betteraves à sucre	Azote lessivé, refroidissement par l'eau de la bouteille de PET

Source : *Product Water Footprint Assessments, Practical application in corporate water stewardship*, Coca Cola Company, The Nature Conservancy, 2010.

Ces résultats sont utilisés de deux manières. D'abord pour analyser la vulnérabilité de la chaîne d'approvisionnement, ensuite pour mettre en place des mesures correctives. Dans le cas présent, l'abondance d'eau de pluie ou d'irrigation a conduit à se focaliser sur la pollution, et en particulier sur celle liée à la production agricole, car l'absence de traitement induit une empreinte en eau grise. Pour cela, un programme de production durable de betterave à sucre a été mis en place grâce à un partenariat avec le WWF. Toutes les étapes, de la production des betteraves à la fourniture du sucre à l'usine, et en particulier tous les risques de pollution notamment liés à la fertilisation azotée, ont été analysées. Une intercomparaison des modes de production a été réalisée afin de déterminer les

meilleures pratiques à promouvoir pour réduire ces pollutions, notamment par des contrats entre Coca-Cola et les producteurs.

Pour ce qui est des risques liés aux impacts sur la ressource, l'approche retenue repose sur le triptyque réduire, recycler, compenser, ainsi que sur un jeu d'objectifs cibles que l'ensemble des unités de la compagnie Coca-Cola doit chercher à atteindre. La réduction touche essentiellement les processus internes de production, qui doivent devenir les plus efficaces possibles. Ainsi, l'objectif fixé par la compagnie a été d'augmenter l'efficacité de l'eau de 20 % entre 2004 et 2012. Les derniers chiffres disponibles faisaient état d'un gain de 12,6 % en 2009. En ce qui concerne le recyclage, il s'agit de limiter les pollutions en diminuant les quantités rejetées et en améliorant la qualité des rejets par des méthodes de réutilisation et de traitement des eaux usées. L'objectif était là une totale conformité des rejets avec des normes fixées par la compagnie en 2012. Le taux atteint en 2009 était de 89 % de conformité. Enfin, la partie la plus originale de la démarche est l'introduction de mécanismes de compensation : pour chaque volume de ressource prélevé ou dégradé, la compagnie s'engage à mettre en place des mesures de protection portant sur un volume identique en soutenant l'action des communautés ou des autorités locales en faveur de l'eau. Une méthode a été élaborée avec l'ONG étatsunienne The Nature Conservancy afin de déterminer le volume d'eau protégé par différents types d'actions : protection contre l'érosion, création de zones tampons ou de zones humides artificielles... Fin 2009, la compagnie compensait selon les estimations réalisées 22 % des volumes d'eau prélevés grâce à 250 projets dans 70 pays. La compensation devrait devenir intégrale en 2020.

Le risque de réputation est traité en s'associant le plus possible avec des organisations reconnues internationalement pour leur sérieux dans le domaine de l'environnement, comme le WWF ou The Nature Conservancy.

DEUX APPROCHES DU CALCUL DE L'EMPREINTE EAU

Quel que soit le jugement porté sur le rôle de ces multinationales vis-à-vis de nos modèles de consommation, force est de constater

29. L'étude a été réalisée pour une bouteille produite aux Pays-Bas.

que le fait d'être sous le feu des projecteurs et sous celui de la critique les oblige à anticiper les problèmes et à développer des solutions originales qui peuvent faire école pour d'autres organisations et à d'autres échelles. Le travail réalisé par ces entreprises sur leur empreinte eau a indiscutablement permis d'affiner les approches d'évaluation et d'utilisation du concept. La complexité des chaînes d'approvisionnement et leur taille, internationale ou locale, sont à cet égard particulièrement importantes. Pour une entreprise utilisant peu de produits végétaux et ayant surtout un impact local sur les ressources en eau bleue, l'approche complète de l'empreinte eau distinguant les eaux bleues, vertes et grises n'a pas forcément beaucoup de sens. En revanche, une estimation précise des volumes d'eau utilisés et des pollutions engendrées lors des différentes étapes de production peut s'avérer très utile afin de réduire les impacts. Par ailleurs, une entreprise ne peut se permettre d'utiliser des valeurs moyennes. Pour la compagnie Coca-Cola, le travail sur la production de betterave à sucre a conduit à des estimations très précises par pays des trois composantes de l'empreinte eau, dont l'intérêt est évident pour les politiques de l'eau ou agricoles des pays³⁰.

Cette variabilité des préoccupations des entreprises se retrouve aujourd'hui dans deux grandes approches de calcul de l'empreinte eau, pas nécessairement incompatibles, mais qui malheureusement se développent en s'opposant. Le Water Footprint Network développe avec un large réseau d'entreprises la méthode incluant l'ensemble des types d'eau, bleue, verte, grise telle que décrite dans les chapitres précédents. Une autre approche s'attache à déterminer l'empreinte eau en se fondant sur une méthodologie de type « analyse de cycle de vie (ACV) » visant à quantifier les impacts quantitatifs et qualitatifs sur l'eau bleue de l'ensemble des étapes de la vie d'un produit, depuis la production de ses matières premières jusqu'à sa destruction, sa mise en décharge ou son recyclage³¹. Cette seconde approche a conduit au développement d'une norme

internationale ISO³² qui devrait donc devenir une référence essentielle pour le calcul de l'empreinte eau. Elle a la robustesse et la précision des analyses de cycle de vie et pointe la faiblesse de la méthode générale à bien rendre compte des impacts sur l'eau. En effet, argumentent ses promoteurs, si un animal comme un bœuf est élevé dans des prairies permanentes naturelles, pourquoi prendre en compte l'évaporation de la prairie dans l'empreinte eau alors que cette évaporation aurait lieu quoi qu'il arrive et n'a donc pas d'impact évident sur l'eau? Ce qui compte, c'est de réellement quantifier et de comparer de manière fiable les impacts des modes de production afin d'aider les producteurs et les consommateurs à faire les bons choix.

L'argument des promoteurs de l'approche par analyse de cycle de vie paraît fondé : l'empreinte eau doit être avant tout un outil permettant de mieux estimer et, par là, de mieux réduire les impacts de nos productions et consommations sur l'eau. Le choix et l'évaluation des impacts devant guider les utilisateurs de l'eau et les consommateurs finaux est fondamental : doit-on, par exemple, se limiter aux impacts sur l'eau locale ou élargir l'évaluation au niveau global? Doit-on se limiter à l'eau ou les aspects biodiversité doivent-ils aussi être intégrés? Plus généralement, quels enjeux environnementaux doit-on prendre en compte, et ne doit-on pas développer des outils qui vont au-delà de l'environnement et incluent des dimensions économiques et sociales? Idéalement, les outils à développer devraient articuler, d'une part, différents niveaux imbriqués de calcul de l'empreinte eau et, d'autre part, une série d'enjeux sociaux, économiques et environnementaux. Schématiquement, plus on s'intéresse à la production dans un contexte local et plus une approche très précise, fondée sur une analyse de cycle de vie, est intéressante. Plus on souhaite intégrer d'impacts ou d'enjeux, ou plus on se place du point de vue du consommateur, plus il faut utiliser l'approche complète prenant en compte les différents types d'eau. Mais il y a peu de chances qu'un outil unique parvienne à répondre à toutes les préoccupations.

30. L'entreprise Barilla vient de publier une étude qui débouche sur des résultats comparables. Voir Ruini L., Marino M., Pignatelli S., Laio F., Ridolfi L., Water footprint of a large-sized food company. The case of Barilla pasta production. *Water Resources and Industry*, 2013.

31. Voir par exemple : Ridoutt B., Sanguansri P., Nolan M., Marks N., Meat consumption and water scarcity : beware of generalisations. *Journal of Cleaner Production*, 2012.

32. International Standard Organisation, TC207, SC5 « Water Footprint – Requirements and Guidelines, 2012.

Les perspectives des consommateurs ou des producteurs diffèrent, les entreprises elles-mêmes ont des problèmes très divers. Un travail de recensement des méthodes réalisé au démarrage du travail sur la norme ISO révélait au moins seize variantes pour le calcul de l'empreinte eau des entreprises !

IX. QUELLES ACTIONS ? QUELLES SOLUTIONS ? QUELQUES PISTES

La première conférence des Nations unies sur l'eau, organisée à Mar del Plata³³ en 1977, a marqué le début de la prise de conscience internationale des enjeux liés à l'eau. Elle a aussi débouché sur des initiatives concrètes puisqu'elle a entraîné la création de la Décennie internationale de l'eau potable et de l'assainissement. Ses objectifs témoignent à la fois de l'ambition et d'une certaine naïveté de la communauté de l'eau : il s'agissait ni plus ni moins de fournir l'eau potable à l'ensemble des habitants de la planète entre 1980 et 1990 ! Cet objectif louable s'est toutefois heurté à la réalité du terrain : les infrastructures de l'eau coûtent cher et leurs bénéfices, notamment politiques, ne sont pas toujours tangibles, du moins dans le court terme. Après cet échec, l'eau est restée présente dans l'agenda international, et la prise de conscience d'une crise de l'eau est progressivement passée des spécialistes de l'eau au grand public après le sommet de la Terre de Rio en 1992.

À l'occasion de ces premières conférences internationales, la communauté de l'eau a pris conscience de son morcellement en de multiples organisations toutes porteuses d'intérêts spécifiques et souvent divergents. Aussi de nouvelles organisations comme le Partenariat mondial de l'Eau et le Conseil mondial de l'eau ont-elles été créées pour rassembler et mobiliser à tous les niveaux ; le Partenariat mondial de l'Eau pour promouvoir le concept de gestion intégrée des ressources en eau, le Conseil mondial de l'eau pour fédérer l'ensemble des acteurs et agir auprès des politiques. Malgré cela, vingt ans après, il semble que l'eau ne soit pas davantage dans les priorités politiques. Son importance est certes reconnue, mais

33. Cette conférence a été couronnée par une résolution très volontariste à l'Assemblée générale des Nations unies en 1978.

la manière dont on l'appréhende reste éclatée du fait de son rôle essentiel dans de nombreux secteurs.

À propos de l'eau potable et de l'assainissement, les débats se sont focalisés sur les modèles de financement et les parts de responsabilité des secteurs public et privé dans le développement et la fourniture des services. À juste titre, car ces questions constituent réellement le « nerf de la guerre ». Sans entrer ici dans la substance du débat, l'accès à l'eau est un problème non pas de disponibilité physique, mais plutôt de coût et de financement des infrastructures et des services de collecte, de traitement, de fourniture et de traitement de l'eau.

En ce qui concerne les ressources et leur allocation, c'est la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), une gestion tentant de répondre de manière harmonieuse aux exigences des différents types d'utilisateurs d'eau tout en préservant l'eau en quantité et qualité, qui a été promue et souvent présentée comme la panacée pour répondre à la « crise de l'eau ». Si attrayant que soit le concept, sa mise en œuvre s'est heurtée à de nombreuses difficultés, notamment dans le monde émergent ou en développement où les institutions en charge de l'eau sont en construction. Souvent, vouloir intégrer la gestion des ressources a eu comme effet paradoxal de centrer les responsables de l'eau sur l'eau et sur eux-mêmes et non de créer de multiples interfaces avec les autres secteurs et acteurs. La gestion intégrée est devenue un objet en soi, ce qui a de fait réduit le dialogue des spécialistes de l'eau avec les secteurs économiques impliqués dans l'eau. Qui plus est, la gestion intégrée a généralement embrassé l'approche classique limitant la réflexion aux eaux bleues. La complexité de la tâche initiale rendait sans doute l'intégration dans la réflexion des autres types d'eau, verte ou virtuelle³⁴, plus périlleuse.

Dans ce contexte, de nouveaux concepts dérivés des notions d'eau virtuelle et d'empreinte eau peuvent-ils avoir un rôle et pour quels acteurs ? Plusieurs pistes de réflexion sont proposées ci-après.

RECONSIDÉRER LA NOTION DE RESSOURCE EN EAU

Tout d'abord, il est impératif de reconsidérer la notion de ressource en eau. Privilégier les prélèvements d'eau bleue était logique dans un monde de ressources abondantes. Dès lors que les ressources deviennent limitées, non pas dans l'absolu mais par rapport aux besoins humains, la trilogie eau bleue, eau verte, eau grise se doit d'être prise en compte pour évaluer les ressources. Le fait que de nombreux usages ne consomment pas l'eau mais la rejettent après dégradation réduit par ailleurs la pertinence de la notion de prélèvement. Il suffit pour s'en convaincre d'imaginer des prélèvements sans consommation et rejetant une eau non dégradée : de tels prélèvements seraient en théorie sans limites. Ce qui importe est donc bien, d'une part, la consommation, l'eau prélevée qui s'évapore, et, d'autre part, la dégradation, qui réduit les possibilités d'usage et « consomme » de la capacité d'assimilation des écosystèmes aquatiques. La connaissance et la prise en compte de ces dégradations et des capacités d'assimilation des écosystèmes doivent être largement améliorées pour permettre d'estimer au mieux les flux d'eau environnementaux nécessaires au maintien des écosystèmes aquatiques en bon état.

Par ailleurs, dès que la pression sur l'eau bleue ou les menaces de dégradation deviennent importantes, intégrer l'eau verte – l'eau de pluie retenue par les sols qui ne ruisselle pas vers les cours d'eau et ne s'infiltrer pas vers les nappes souterraines – dans les ressources potentielles devient essentiel. En revanche, ces ressources en eau verte étant plus difficiles à estimer et à gérer, elles nécessitent la mise au point d'outils spécifiques.

Sans changement dans la notion de ressource en eau, le risque actuel est grand de voir le discours sur l'eau perdre sa capacité à décrire les problèmes et à apporter les réponses nécessaires. Il est urgent d'établir des définitions précises, ne serait-ce que du terme « ressource en eau renouvelable ». Les chiffres présentés dans différents rapports ne sont souvent pas comparables. Ainsi, en général, on se réfère aux données de la banque Aquastat de la FAO qui ont le mérite d'être standardisées et faciles d'accès, mais qui considèrent l'ensemble du bilan « pluie-évapotranspiration » comme la ressource renouvelable. De même, il est essentiel de ne pas considérer

34. Les eaux grises, avatar des eaux bleues, sont plus facilement intégrées dans les raisonnements.

les usages uniquement sous l'angle des prélèvements d'eau bleue dans les rivières et les nappes, mais de produire des comptes de l'eau précis qui fournissent des informations sur la consommation par évaporation des ressources prélevées. Enfin, il est fondamental d'établir une métrique permettant de représenter mieux les usages du secteur de l'énergie. C'est dans ce domaine que le flou entre prélèvements et consommation est le plus grand et que l'augmentation anticipée de la demande risque le plus d'accroître les tensions. La communauté de l'eau se doit de donner aux décideurs et aux parties prenantes une image plus précise et plus pertinente des compétitions entre usages, notamment au sein des grands bassins-versants.

MIEUX CONSIDÉRER ET MIEUX GÉRER L'EAU DE PLUIE

Intégrer l'eau verte dans les raisonnements sur les ressources va de pair avec une utilisation plus intelligente de l'eau de pluie. Il s'agit en particulier de tirer parti des réductions de coût de transport et d'énergie que cela permet. L'eau présente en effet un inconvénient majeur, sa masse volumique qui rend toutes opérations de pompage et de transport coûteuses. La part de l'énergie utilisée pour ces opérations est logiquement élevée. En Californie, par exemple, elle est de 19%, et elle peut atteindre 30% dans certains États de l'Inde où l'irrigation se fait par pompage dans les réserves souterraines³⁵. Utiliser l'eau de pluie à proximité de l'endroit où elle tombe peut permettre d'éviter des coûts de transport, même si cela crée en contrepartie des coûts de stockage. Un bilan coût-avantage s'impose.

Les villes peuvent et doivent être les messagères de nouvelles approches. Elles ont des besoins d'eau considérables et certaines prélèvent leurs ressources jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres. Pour autant, la pluie qui tombe sur la ville est généralement perçue d'abord comme un problème. L'imperméabilisation des sols,

combinée à sa possible contamination, fait de l'eau de pluie un problème de drainage avant tout, posant des problèmes de pollution, de surcharge des stations d'épuration et de sous-capacité des réseaux lors d'orages violents. Il doit être possible aujourd'hui de penser les choses autrement, et ce, surtout dans les villes en forte expansion du monde émergent et en développement où les problèmes de disponibilité en eau, de gestion des eaux usées et des eaux de pluie se posent de manière conjointe. Des idées et des solutions nouvelles sont possibles et testées ici ou là, partant par exemple des besoins de stockage, d'irrigation des plantes ou des opportunités offertes par la végétalisation des bâtiments ou des toits-terrasses. Ce stockage et l'accroissement de la végétation améliorent la « bioclimatisation » de la ville et sa résilience aux événements climatiques extrêmes. Pour autant, ces améliorations doivent se faire avec beaucoup de précautions afin de ne pas mettre en péril les services publics d'eau et d'assainissement. L'expérience montre en effet que les souhaits d'économie d'eau, souvent attisés par les augmentations de coût, ont tendance à réduire les consommations d'eau. La plupart des villes européennes voient aujourd'hui leurs consommations baisser régulièrement, ce qui fragilise les équilibres économiques des services publics³⁶. Cette tendance peut être amplifiée par les prélèvements individuels, soit sous forme de pompages dans les nappes, soit sous forme d'utilisation d'eau de pluie. Tant que cette eau est utilisée pour arroser des plantes et stimuler le verdissement, elle ne pose pas de problème. En revanche, si elle est utilisée en concurrence avec l'eau potable en étant réinjectée dans le réseau, elle va à la fois réduire le revenu du gestionnaire et augmenter le volume d'eaux usées de manière clandestine, et donc augmenter les coûts de l'assainissement.

Pour le monde rural et l'agriculture, mieux prendre en compte l'eau de pluie revient à redonner à l'agriculture pluviale ses lettres de noblesse. Même pour un pays comme la Tunisie, pourtant l'un des moins riches en eau, l'agriculture pluviale contribue pour près

35. Source: *The Global Energy Water Nexus: A Solution and Two Problems*, Allan T., Presentation at AAAS (American Association for the Advancement of Science) meeting, « Science without Borders », Washington, 2011 in http://ec.europa.eu/dgs/jrc/downloads/jrc_aaas2011_energy_water_allan.pdf

36. Voir à ce propos J. Souriau, *Les Principaux déterminants de la consommation d'eau à Paris. Un état des lieux*, Eau de Paris, Engref, 2011. À Paris la consommation annuelle a baissé en moyenne de 1,4% par an entre 1990 et 2010.

de 70 % à la valeur de la production agricole³⁷. Or c'est dans cette agriculture que les plus grands gains de productivité de l'eau sont possibles car, comme nous l'avons souligné plus haut, lorsque les rendements sont faibles, beaucoup d'eau est évaporée pour rien. Les techniques et les méthodes sont disponibles et ont souvent été testées depuis des siècles par les agriculteurs. Il suffit de les remettre au goût du jour, d'une part en leur accordant de l'intérêt, et d'autre part en utilisant les connaissances développées ces dernières années. Il existe pour cela de nombreuses recettes ayant toutes fait leurs preuves, alliant conservation de l'eau dans les sols, collecte d'eau de pluie, irrigation de complément et retenues collinaires³⁸.

REPENSER LA PRODUCTIVITÉ DE L'EAU

Repenser la place de l'eau de pluie et des différents types d'eau est un préalable à une étape plus importante : allouer les ressources aux productions les plus « utiles ». Faut-il produire des tomates ou des céréales en Espagne ou en France ? Cela a-t-il un sens pour l'Europe du Nord d'importer des produits maraîchers du Maroc et de Tunisie et d'y exporter des céréales ? Plus généralement, dans quelle mesure l'interdépendance croissante du système agricole et alimentaire mondial accroît-elle la sécurité alimentaire ou augmente-t-elle au contraire les risques de pénurie ? Ces questions complexes dépassent toutes le strict cadre de la politique de l'eau, mais elles sont fortement connectées à la manière dont on alloue l'eau aux différents secteurs économiques. Les gestionnaires de l'eau ont donc la responsabilité de fournir aux politiques et aux autres secteurs économiques des connaissances et des outils qui facilitent la réflexion et la prise de décision.

Allouer l'eau de manière optimale questionne la notion de productivité de l'eau, jusqu'ici traitée de manière réductrice du fait de la priorité donnée à l'eau bleue et aux approches hydrauliciennes. Dans les périmètres irrigués, par exemple, comme nous l'avons vu

dans le cas de la Tunisie, une part importante de l'eau d'irrigation finit par se perdre au lieu d'alimenter les cultures. À l'échelle mondiale, cette part est de l'ordre de 30 % des quantités d'eau prélevées. Ces pertes n'en sont souvent que pour l'agriculture et finissent par profiter à la biodiversité ou à des utilisateurs non agricoles. Pourtant, elles ont réussi à mobiliser l'essentiel de la réflexion des gestionnaires de l'eau agricole³⁹. « Davantage de récolte pour chaque goutte⁴⁰ » a été, et reste, le slogan le plus populaire des spécialistes de l'irrigation. Certes, ces pertes ont des incidences économiques et il faut les réduire, mais au vu des efforts mis en œuvre, des investissements consentis depuis de longues années et des succès très relatifs obtenus dans ce domaine, il est temps de réexaminer les priorités. Le fait de consacrer une telle part de la réflexion et de l'action à l'efficacité hydraulique témoigne en effet d'un centrage de l'eau sur elle-même. La productivité de l'eau doit questionner non seulement les techniques d'irrigation et les pertes d'eau associées, mais, bien au-delà, la valeur que l'on tire de chaque goutte pour l'économie, la société et l'environnement, suivant le triptyque du développement durable. Comment les différents types d'eau contribuent-ils au développement économique d'un utilisateur, d'une région, d'un pays ? Quels impacts et aménités apportent-ils aux écosystèmes et à notre environnement ? Comment aident-ils à maintenir de l'emploi ou à garantir la stabilité d'une population rurale ou urbaine ? La réflexion sur ces dimensions de la productivité de l'eau est balbutiante et il est urgent de développer des outils permettant de les intégrer. Il faudrait pour cela pouvoir analyser les différents coûts et bénéfices de la mobilisation d'eau bleue ou verte et des transferts d'eau virtuelle pour le développement économique, pour la préservation des écosystèmes tant aquatiques que terrestres, et pour la société en termes de maintien de l'emploi ou de prévention des migrations. C'est en élargissant cette vision de la productivité qu'on donnera à la gestion intégrée de l'eau sa véritable dimension.

37. F. Lebdi, *Contraintes de l'agriculture irriguée aux opportunités du marché. Cas de la Tunisie*, op.cit.

38. Voir *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*, op.cit.

39. Lire à ce propos l'argumentaire développé par C. Perry *et al.* in "*Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities*", *Agricultural Water Management*, vol. 96, 2009.

40. En anglais, *more crop per drop*.

REPENSER LA GESTION TRANSFRONTALIÈRE DE L'EAU

Un autre domaine clé pour l'action est celui de la gestion des eaux transfrontalières qui, il faut le souligner, a beaucoup évolué ces dernières années, notamment grâce à la mise en place de programmes de coopération et d'institutions de bassin. La qualité de cette gestion est essentielle pour assurer le développement et la paix, en particulier dans des régions où la croissance démographique risque d'augmenter les tensions sur les ressources naturelles.

L'eau structure la géographie physique et humaine. Les grands bassins-versants comprennent généralement à l'amont des régions montagneuses bien arrosées où la densité de population n'est pas forcément très élevée. À l'aval, on trouve généralement des plaines, des grandes villes et une forte densité de population. Les complémentarités amont-aval sont donc importantes. L'amont peut stocker de l'eau, produire de l'électricité, développer l'agriculture, fournir de l'eau de qualité pour l'aval. L'aval peut servir de débouchés, contribuer au développement économique de l'amont. Encore faut-il que ces complémentarités soient examinées attentivement et transformées en opportunités de coopération et pas en antagonismes. Ici aussi, se focaliser sur l'eau est une erreur : c'est bien l'ensemble des richesses potentielles et des aménités qu'il faut intégrer dans les raisonnements et dans l'action.

Dans les grands bassins internationaux, les premières activités à intégrer et à coordonner sont les productions alimentaires et d'énergie. Le triptyque⁴¹ eau, alimentation, énergie est en effet celui qui répond aux urgences du moment, l'agriculture et l'énergie étant de loin les plus gros utilisateurs d'eau. Par ailleurs, l'expérience récente a montré que l'augmentation des coûts de l'énergie et ses répercussions sur l'alimentation exacerbent les tensions entre l'amont et l'aval des bassins-versants. Les avantages potentiels et les possibilités de coopération et de stabilisation de régions entières sont considérables. Les pays de l'amont ont l'opportunité de développer à la fois la production de nourriture et de l'énergie pour eux-mêmes et pour leurs voisins de l'aval qui peuvent, eux,

produire et exporter des produits manufacturés. L'accroissement des échanges de produits agricoles au sein des bassins-versants présenterait l'avantage de ne pas introduire de distorsions trop importantes entre agricultures, car les différences de productivité y sont moindres qu'entre pays classiquement exportateurs et pays importateurs. Le cas du bassin du Nil est symptomatique de ce potentiel de coopération, il suffit d'examiner sa géographie physique et humaine pour s'en rendre compte. Du sud au nord, les quantités de pluie diminuent, tout comme le potentiel de l'agriculture pluviale. En Égypte, seule l'irrigation avec l'eau du Nil permet l'agriculture. Dans la région du delta, tout au nord, vivent près de 80 millions de personnes, avec des densités de plus de 1 000 habitants au kilomètre carré. En revanche, dans le sud du bassin, les densités sont bien plus faibles, de l'ordre de 80 à 100 habitants au kilomètre carré. À l'évidence, le sud du bassin aurait un très large potentiel pour établir une coopération avec le Nord dans la production d'énergie et de nourriture.

Repenser l'eau dans ces grands bassins, c'est donc élargir une démarche trop centrée sur le partage de l'eau au partage plus général des richesses et aménités produites par l'eau. Il s'agit d'utiliser ces richesses pour tisser un réseau de coopérations devant améliorer et consolider la stabilité régionale.

ANTICIPER LES CONSÉQUENCES DÉMOGRAPHIQUES DES PÉNURIES D'EAU

De manière générale, les approches à développer doivent inviter les gestionnaires à ne pas s'attacher exclusivement à l'eau, mais aussi à identifier tout ce sur quoi l'eau peut avoir une influence, à se demander s'il n'est pas tout autant de leur ressort de gérer la disponibilité de l'eau que d'anticiper les conséquences de son absence.

L'abondance relative de l'eau détermine la manière dont les hommes utilisent leurs territoires, la démographie ou les habitudes alimentaires. Paradoxalement, ces dernières sont plutôt végétariennes quand l'eau est abondante, plutôt carnivores quand l'eau est rare. Ce phénomène s'explique par le fait que, lorsque l'eau est présente, il est plus efficace de se nourrir de produits végétaux.

41. On utilise aussi de plus en plus le terme anglais *nexus*.

Un même territoire peut aussi, dans ce cas, héberger une plus grande population. Mais lorsque l'eau est rare, le pâturage par les ruminants permet de bien valoriser la maigre production de matière organique. Dans ces conditions, la densité de population demeure faible. La disponibilité en eau a un impact à la fois sur les densités de population et sur leurs variations dans le temps. Le manque d'eau peut générer des migrations, comme par exemple en Afrique de l'Ouest où l'on observe depuis des décennies un courant migratoire des pays sahéliens vers les pays côtiers⁴², et créer des tensions qui, lorsqu'elles surgissent, paraissent déconnectées de l'eau. Il peut aussi maintenir des populations dans la pauvreté et, ce faisant, réduire la vitesse de la transition démographique, et donc accroître la population dans des régions où l'eau ne suffira pas à produire la nourriture nécessaire. De telles « poches de malthusianisme » risquent fort d'apparaître dans un futur proche et leurs conséquences doivent être prévenues.

Les évolutions démographiques de moyen terme doivent également être mieux anticipées par les gestionnaires de l'eau et les ingénieurs en charge de l'eau et des périmètres irrigués. Créer l'abondance d'eau dans une région finit souvent par bouleverser les équilibres démographiques. L'augmentation de densité de population de ces périmètres est une tendance à surveiller de près car elle génère automatiquement une augmentation des besoins de nourriture et de cultures vivrières. La dimension marchande du périmètre se réduit alors, et avec elle la capacité du pays à subvenir aux besoins de ses villes et celle des agriculteurs de payer pour le bon fonctionnement et l'entretien des infrastructures.

Concrètement, les gestionnaires de l'eau ne doivent plus simplement raisonner les valeurs de l'apport d'eau, mais aussi les conséquences du manque d'eau, et ce, sur le moyen et le long terme. Gérer l'absence d'eau doit faire partie de leurs préoccupations. Il faut sortir de la rhétorique classique consistant, comme il a été évoqué au début de ce livre à propos de l'Égypte en 2008, à résoudre les problèmes par une simple augmentation de l'efficacité hydraulique

de l'eau. Certes, améliorer l'efficacité présente beaucoup de vertus et demeure une nécessité dans tous les secteurs d'utilisation de l'eau. Mais cela ne suffit pas pour diminuer les risques de pénuries alimentaires ou pour réduire les migrations environnementales et les autres tensions qui se développent dans la durée. Celles-ci requièrent non pas de gérer mieux l'eau, mais d'anticiper les impacts des pénuries en eau, tout particulièrement sur la nourriture, afin d'alerter les autres secteurs économiques et de prendre les mesures appropriées.

Il est également possible de proposer des pistes pour les nombreux autres acteurs qui comprennent de plus en plus qu'à leur manière ils sont eux aussi des gestionnaires de l'eau.

DÉVELOPPER L'INTENDANCE DE L'EAU DES ENTREPRISES⁴³

De nombreuses entreprises grosses consommatrices d'eau ont compris que l'eau est porteuse de forts enjeux et qu'il importe de dépasser les visions étriquées classiques pour examiner tout particulièrement le triptyque eau, alimentation, énergie ainsi que ses connexions avec le changement climatique. Pour ces entreprises, les fluctuations des prix de l'alimentation et de l'énergie sont des signes avant-coureurs des menaces à venir car elles témoignent des tensions sur les ressources d'un monde de plus en plus interdépendant⁴⁴. Les approches fondées sur l'empreinte eau permettent de déterminer leur vulnérabilité et celle de leurs chaînes d'approvisionnement, et de prendre des mesures pour réduire les risques associés. Ces mesures concernent tout d'abord, à l'échelon local, l'efficacité en eau des procédés de production et les possibles réductions des prélèvements complétées pour quelques entreprises pionnières par des mécanismes de compensation. Les approches plus générales se référant à l'empreinte eau vont plus loin de deux manières.

42. Voir les travaux du Club du Sahel, et particulièrement *Preparing for the Future: A Vision of West Africa in the Year 2020*, édité par Jean-Marie Cour and Serge Snrech, OCDE, 1998.

43. Voir à propos de l'action des entreprises le site du Conseil mondial des entreprises pour le développement durable. <http://www.wbcsd.org/work-program/sector-projects/water.aspx>

44. D. Waughray (dir.), *Water Security: The Water-Food-Energy-Climate Nexus, The World Economic Forum Water Initiative*, Island Press, Washington, 2011.

Elles permettent d'inclure l'eau virtuelle soit à un niveau local comme dans le cas de la production sucrière pour les entreprises de production de sodas, soit à un niveau plus international pour diagnostiquer des impacts ou des risques particuliers. L'ensemble de ces approches contribue à ce qu'on appelle aujourd'hui l'« intendance environnementale » ou l'« intendance de l'eau⁴⁵ » des entreprises et à leurs actions de responsabilité sociale et environnementale.

Dans les entreprises porteuses de cette démarche, les secteurs gros utilisateurs de l'eau (agroalimentaire et alimentation, luxe, ciment, chimie...) sont en pointe. Une étude commanditée par la compagnie ING pour le secteur agroalimentaire résume bien les approches en cours de développement qui s'inspirent souvent du thème de la troisième révolution industrielle⁴⁶ développé par l'économiste Jeremy Rifkin⁴⁷. Pour cette étude, les entreprises gagnantes de demain sont celles qui seront capables d'intégrer complètement leurs modèles économiques en maîtrisant de l'amont à l'aval toutes les étapes allant de la durabilité de leurs chaînes d'approvisionnement à la promotion de modes de consommation responsables.

Pour aller dans cette direction, il faut dépasser les approches classiques fondées sur l'eau bleue dont les recommandations aboutissent à des plaidoyers en faveur de mesures économiques limitées au recouvrement des coûts et qui, étant donné leur caractère nécessairement réducteur, finissent par mettre les différents acteurs dans des situations de confrontation plus que de coopération. On peut certes critiquer le côté « lessivage vert » ou environnemental et la recherche d'image, mais il faut reconnaître que la mobilisation proactive des entreprises est exemplaire, notamment pour les gestionnaires de l'eau. Ainsi, les approches de compensation ouvrent des pistes d'action nouvelles qui pourraient et devraient demain guider l'action publique en faveur de l'eau. Pourquoi ne pas imaginer que des villes suivent cet exemple et compensent leurs

prélèvements en payant pour le renforcement de services écosystémiques afin de bénéficier d'une eau de meilleure qualité ?

DÉPASSER LES CADRES INSTITUTIONNELS CLASSIQUES

Pour améliorer la gestion de l'eau, il faut transformer ses parties prenantes en véritables acteurs de changement. À cet égard, les cadres institutionnels ont tendance à figer les capacités d'évolution et à freiner les initiatives partant du niveau local. Ces cadres institutionnels sont marqués par une vision descendante associée au paradigme d'une ressource en eau publique gérée par des lois sous la responsabilité d'un État souverain. Or le développement des connaissances et les nouveaux outils (réseaux sociaux, outils de négociation multi-acteurs...) pourraient permettre des initiatives locales fondées sur la notion de ressource en eau commune gérée de manière collective.

Le développement en cours d'outils comme les « crédits d'eau verte⁴⁸ » offre à cet égard un exemple de création de nouvelles chaînes de valeur liées à l'eau et aux services écosystémiques. Ces crédits incitent les parties prenantes à identifier et à quantifier les coûts et bénéfices des services de l'eau et des services écosystémiques associés. D'un côté, les bénéficiaires peuvent être des villes, des entreprises, des particuliers dont les biens peuvent être protégés des inondations par des mesures de rétention d'eau, ou dont les coûts de traitement de l'eau sont réduits. De l'autre, des villes et villages de l'amont, des agriculteurs ou d'autres utilisateurs d'eau dont l'action en faveur de l'eau a un coût et bénéficie aux acteurs de l'aval. L'idée des « crédits d'eau verte » est de stimuler des transactions directes entre ceux qui mettent en œuvre des « bonnes pratiques » et les bénéficiaires de ces dernières. Les approches vont au-delà du paiement pour les services écosystémiques classiques. Une ville ou une entreprise peut, par exemple, payer du stockage d'eau à l'amont pour réduire ses risques d'inondations ou une réduction des intrants agricoles garantissant une eau de qualité

45. En anglais, *environmental stewardship* ou *water stewardship*.

46. La troisième révolution industrielle théorise un changement total de paradigmes pour lutter contre le changement climatique et l'épuisement des ressources.

47. Voir G. Rijk et M. Gulpers, *The Third Industrial Revolution. Multi-Committed Company (MCC): The Archetype to Capture Consumer Loyalty. Food, Beverages, HPC: A Thematic Insight*, ING, 2010.

48. En anglais, c'est le terme *green water credits* qui est utilisé.

ou réduisant les coûts de traitement de l'eau. La mise en œuvre de tels outils n'est qu'expérimentale à ce stade et c'est surtout dans les pays en développement que des tests sont en cours⁴⁹. Elle nécessite la mise en place d'un cadre institutionnel qui identifie les acteurs et leurs interactions, évalue coûts et bénéfices et met en place des mécanismes de suivi et de transactions financières.

REPENSER LES GASPILLAGES D'EAU

Pour les citoyens des pays industrialisés, l'empreinte eau et l'élargissement de la notion de ressource aux différents types d'eau invitent à réfléchir, bien au-delà de l'eau du robinet, aux impacts de leurs modes de consommation sur la production des nombreux produits contenant de l'eau virtuelle en grande quantité. Les produits riches en eau virtuelle, et notamment ceux importés d'autres pays, doivent être pris en compte, sans toutefois tomber dans des raisonnements simplistes. Importer des produits d'autres pays a, certes, des conséquences, mais qui ne sont pas nécessairement négatives. Les pays arides ont souvent besoin d'exporter des produits agricoles valorisant bien l'eau dont ils disposent pour importer des produits riches en eau virtuelle et il faut se souvenir que les transferts internationaux ont globalement un impact positif sur l'empreinte eau mondiale. De plus, la consommation de produits locaux n'est pas non plus la panacée, même si elle favorise largement la prise de conscience des consommateurs. Une note du Commissariat général au développement durable français démontrait récemment la complexité de ces questions en soulignant le fait que l'empreinte carbone des circuits courts est souvent plus élevée que celle des produits importés⁵⁰.

Attention aussi aux raccourcis relatifs à la consommation de viande, dont la production a certes de nombreux impacts, mais valorise bien des milieux naturels où d'autres productions seraient difficiles, comme les zones de parcours des milieux arides ou les régions en prairie permanente des pays tempérés. Stopper toute

consommation paraît donc extrême, mais réduire notre consommation de viande présente de nombreux avantages, notamment pour notre santé.

En revanche, il est un domaine où les consommateurs peuvent et doivent avoir un impact : c'est celui du gaspillage qu'il faut réduire considérablement. Gaspiller de la nourriture ou des vêtements en fibres naturelles signifie gaspiller des centaines, voire des milliers, de litres d'eau et donc bien plus que ce qui est nécessaire à nos besoins sanitaires et culinaires. Lorsque les produits sont originaires de régions arides, l'eau gaspillée aurait pu être utilisée soit pour produire de la nourriture, soit pour préserver la biodiversité. L'action doit ici passer par une prise de conscience. Les études menées par le WRAP au Royaume-Uni montrent en effet que la perception du gaspillage est faible. Pour la majorité des personnes enquêtées, les pertes sont minimales et beaucoup se montrent surprises en apprenant qu'elles jettent chaque année inutilement plus de 1 000 euros de nourriture dans leur poubelle.

Pour tous les gaspillages, il importe d'être conscient que ce n'est pas seulement l'eau que l'on dépense (qui a la possibilité de se régénérer), mais toutes les autres ressources mobilisées non renouvelables ou dégradées par les processus de production. On gaspille, par exemple, beaucoup d'énergie : celle requise pour le transport et le traitement de l'eau, celle nécessaire pour cultiver la terre, pour produire des engrais, pour transporter, stocker, transformer les produits agricoles en nourriture. On risque de dégrader ensuite d'autres ressources naturelles comme les sols ou la biodiversité. On génère également de manière inutile des pollutions et des émissions de gaz à effet de serre. Bref, ici encore, il importe de prendre conscience de tout ce que « cachent » l'eau ou les produits riches en eau virtuelle.

L'amélioration de l'étiquetage des produits pourrait ici contribuer à la prise de conscience. On peut d'abord envisager l'étiquetage des dates limites de vente ou des recommandations de consommation, souvent confondues, qui méritent clarification. Les dates limites de vente, en particulier, ne signifient pas que les produits deviennent impropres à la consommation. Les opérations de sensibilisation à ce propos commencent à se répandre et à avoir un impact. Toutefois, les gaspillages dans le commerce de détail ne constituent qu'une faible part du total et le comportement doit

49. On consultera à ce propos le site <http://www.greenwatercredits.net/>

50. Consommer local. *Les avantages ne sont pas toujours ceux que l'on croit*, note 158, 2013. Disponible sur www.developpement-durable.gouv.fr

surtout évoluer à la maison et dans la restauration collective où l'essentiel des pertes « à la fourchette » se produit.

Un étiquetage de l'empreinte eau des produits pourrait-il être utile ? On peut en douter, étant donné l'hétérogénéité des approches d'estimation de l'empreinte eau et la variabilité des empreintes possibles pour un même type de produit. Une telle mesure aurait certes pour intérêt d'accroître la sensibilisation des consommateurs aux quantités importantes d'eau virtuelle, mais un objectif identique peut être obtenu par des campagnes de sensibilisation avec un rapport coût-efficacité bien meilleur.

ACCROÎTRE LES SYNERGIES ENTRE POLITIQUES DE L'EAU, DE L'AGRICULTURE ET DE L'ÉNERGIE

Pour les gouvernements et les institutions intergouvernementales, une nouvelle approche des politiques de l'eau et des politiques connexes, en particulier celles de l'énergie et de l'agriculture, est possible et nécessaire. L'eau est en effet autant sinon davantage concernée par celles-ci que par la politique de l'eau elle-même. Or, aujourd'hui, ces politiques se développent en parallèle, voire en opposition, et sans grande coordination. Le triptyque eau, alimentation, énergie est et sera de plus en plus au cœur de tensions fortes en réponse à la croissance démographique, au développement économique et aux transitions rendues nécessaires par la menace du changement climatique.

Pour progresser dans la coordination de ces trois politiques, il faut, entre autres choses, leur permettre de dialoguer plus facilement. Or les impacts ou l'empreinte eau de l'énergie sont difficilement comparables à ceux de l'agriculture. L'agriculture a une incidence sur les consommations (l'eau évaporée), tandis que l'énergie ne fait que prélever. Qui plus est, l'énergie rentre mal dans la logique classique : les prélèvements opérés par l'hydroélectricité sont très élevés, mais la dégradation de la qualité de l'eau rejetée étant faible, ils ne sont classiquement pas intégrés dans les chiffres des usages. L'eau nécessaire au refroidissement des centrales thermoelectriques ne figure pas davantage dans les prélèvements de nombreux pays. L'empreinte eau pourrait aider à corriger cette

approche en identifiant plus précisément les volumes réellement consommés et les impacts sur la qualité de la ressource (empreinte eau grise). Mais elle reste aujourd'hui incapable de prendre en charge deux aspects importants. Le premier, concernant surtout l'hydroélectricité, a trait aux impacts sur la qualité de l'eau et des écosystèmes de long terme qui sont difficiles à estimer précisément. Ces impacts sont de plus liés à l'introduction de barrages dont le rôle est souvent multifonctionnel, et l'impact difficile à attribuer à la seule hydroélectricité. Le second a trait à la compétition entre usages et besoins de l'agriculture, de l'énergie et des écosystèmes, qui ne se résume pas à des volumes prélevés, mais dépend beaucoup de la géographie et du climat. Il est par exemple fondamental de savoir si les pics de demande des secteurs de l'énergie et de l'agriculture sont concomitants ou s'ils se produisent dans différentes saisons. De manière non intuitive, c'est lorsque les besoins se manifestent à différentes périodes que les tensions risquent d'être les plus vives car l'eau relâchée par les barrages pour la production d'énergie ne peut alors être réutilisée par l'agriculture.

Accroître les synergies entre les politiques de l'eau, les politiques agricoles et les politiques de l'énergie commence donc par la création d'une métrique commune intégrant à la fois les prélèvements, les consommations, le degré de compétition et les impacts qualitatifs sur l'eau. À défaut, les acteurs et les institutions qui les représentent à tous les échelons resteront enfermés dans des « jeux à somme nulle » : ce qui est gagné par les uns restera perdu par les autres.

REPENSER LA SÉCURITÉ EN EAU

La communauté internationale de l'eau l'a démontré : l'eau a jusqu'ici été un facteur de coopération entre les peuples et les nations⁵¹. Les tensions pour le partage de la ressource existent certes et, comme l'indique à juste titre Aaron Wolf, un des experts les plus

51. Voir les travaux d'Aaron Wolf à ce sujet – par exemple, son article "Shared Waters, conflict and cooperation", *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 32, 2007 – ainsi que la base de données de conflits liés à l'eau, disponible sur <http://www.transboundarywaters.orst.edu/>

reconnus de la question, gérer l'eau revient pour une bonne part à gérer des conflits. Ces derniers restent toutefois locaux et ne dégénèrent pas en guerres. L'eau n'est pas à elle seule suffisante pour créer un cocktail explosif à grande échelle. Il faut pour cela d'autres ingrédients liés à la maîtrise d'autres ressources productives ou à des oppositions culturelles.

Si cet état de fait est bien démontré, il est légitime de se poser la question de l'avenir. Les tensions grandissantes sur les ressources en eau pourraient-elles dégénérer demain en guerres de l'eau ? Cette question est suffisamment préoccupante pour avoir fait l'objet de réflexions par les agences de sécurité de plusieurs pays. La DIA (Defense Intelligence Agency) des États-Unis, dont l'action est spécifiquement centrée sur les questions de défense, a publié en 2012 un rapport sur la sécurité en eau⁵² concluant que de nombreux pays connaissent de sérieux problèmes d'eau qui risquent de déstabiliser les États et de créer d'importantes tensions régionales, sans toutefois provoquer de conflit majeur dans les dix prochaines années. Il souligne aussi que, d'ici à 2040, la croissance de la demande en eau pour la nourriture et l'énergie sera supérieure à ce que l'amélioration de gestion de l'eau pourra fournir et qu'au-delà de dix ans la possibilité que l'eau devienne une arme politique est importante entre pays ayant à partager des ressources. Les deux grands bassins-versants les plus exposés sont, selon le rapport, celui de l'Amou-Daria en amont de la mer d'Aral en Asie centrale (Afghanistan, Tadjikistan, Turkménistan, Ouzbékistan) et celui du Brahmapoutre partagé entre la Chine, l'Inde et le Bangladesh.

Comme souvent, les tensions résultent des anticipations de modification du régime d'écoulement des eaux, notamment à la suite de la construction de grands barrages. La Chine, par exemple, s'apprête à construire juste en amont de sa frontière avec l'Inde un gigantesque barrage qui devrait produire davantage d'hydroélectricité que celui des Trois Gorges⁵³. Dans le cas de l'Amou-Daria,

les tensions sont déjà très vives entre le Tadjikistan et l'Ouzbékistan^{54 55}, et c'est le barrage de Rogun, devant stocker 14 km³ d'eau, qui les attise. Ce cas est particulièrement typique des difficultés entre les pays de l'amont et de l'aval. Le Tadjikistan, à l'amont, a une économie moins développée et souhaite produire de l'énergie. L'Ouzbékistan, à l'aval, est davantage peuplé et a une économie fortement dépendante de l'irrigation. De plus, la production d'énergie utilise l'eau surtout pendant la période hivernale, quand l'irrigation n'est pas nécessaire pour les cultures.

Avons-nous aujourd'hui une vision pertinente des conflits liés à l'eau ? Cela est loin d'être évident. Dans les cas évoqués ci-dessus, l'origine des difficultés est manifeste et, même si les solutions ne sont pas faciles à mettre en place, les pays peuvent faire appel à des arbitrages externes. La Banque mondiale a ainsi été appelée à proposer des solutions dans le cas de l'Amou-Daria.

Mais souvent, les tensions liées à l'eau se développent dans la durée et de manière peu visible, comme l'a montré Tony Allan dans son travail précurseur sur l'eau virtuelle. Les échanges de produits alimentaires et les migrations – internes ou entre pays – résultant de l'insuffisance d'eau peuvent un temps masquer les difficultés. Leur suivi est nécessaire pour améliorer la compréhension et prévenir l'arrivée du conflit. La sécurité en eau ne peut être pensée en dehors de la sécurité alimentaire et des évolutions démographiques.

ANTICIPER DES CATACLYSMES MAJEURS

Les changements tendanciels ne sont pourtant qu'une des composantes des conflits. Ils sont source de tensions, mais ce sont souvent des événements ponctuels qui créent les déflagrations. Ces événements ponctuels peuvent être d'origine humaine, mais

52. *Global Water Security: The Intelligent Community Assessment*, Defense Intelligence Agency, Washington, 2012. <http://www.wilsoncenter.org/event/global-water-security-the-intelligence-community-assessment>

53. Voir : <http://legeoscope.wordpress.com/2012/05/11/bataille-deau-au-tibet/>

54. Voir à ce sujet : <http://www.futuredirections.org.au/publications/energy-security/27-energy-security-swa/464-tajik-energy-policy-creates-regional-tension.html>

55. Voir aussi : http://www.gwu.edu/~ieresgwu/assets/docs/ponars/pepm_217_Juraev_Sept2012.pdf ainsi que : <http://www.waterpolitics.com/2013/03/26/central-asian-water-tensions-solving-tajikistans-energy-crisis/>

aussi liés à des catastrophes naturelles. À cet égard, il faut se souvenir que les sécheresses et les famines associées sont, avec les grandes épidémies, les catastrophes naturelles les plus meurtrières. Le nombre de personnes tuées dans des catastrophes naturelles a fortement diminué depuis les années 1970, grâce à l'augmentation de production permise par la révolution verte qui a réduit la fréquence des famines⁵⁶. Les sécheresses n'ont plus, depuis lors, affecté la population mondiale à l'échelle de ce qui se produisait précédemment comme lors des grandes sécheresses de la seconde moitié du XIX^e siècle qui ont provoqué des dizaines de millions de morts. Ces événements, analysés en détail par Mike Davis⁵⁷ (et décrits également par Ghislain de Marsily⁵⁸), se sont produits en deux temps, dans les années 1876-1878 et dans les années 1896-1900, toutes marquées par des événements de type El Niño d'ampleur considérable qui ont généré des sécheresses catastrophiques affectant simultanément l'Inde, la Chine, le Brésil et l'Afrique de l'Est. Entre 2 et 4% de la population mondiale a alors été décimée. Se préparer à des événements d'une telle ampleur est du ressort des gouvernements et de mécanismes internationaux. Si la disponibilité en nourriture s'est accrue depuis la révolution verte et a contribué à réduire les impacts des catastrophes, la situation actuelle est lourde de menaces, comme le démontre l'absence de régression de la sous-nutrition depuis le début du XXI^e siècle. Dans un monde de plus en plus interconnecté et faisant face à une rareté accrue des ressources, des catastrophes naturelles, même locales, auront de plus en plus tendance à se transmettre en cascade et à affecter la population de la planète tout entière. Concrètement, il faut mettre en place des mécanismes permettant d'assurer aux pays vulnérables un soutien en cas de crise, comme des accords commerciaux visant à garantir la sécurité alimentaire. De tels accords pourraient notamment être passés entre pays de l'amont et de l'aval des grands bassins-versants afin de ne pas mettre en compétition des agricultures aux productivités trop différentes.

56. Voir la base de données mondiales sur les catastrophes : <http://www.emdat.be>

57. M. Davis, *Génocides tropicaux : catastrophes naturelles et famines coloniales (1870-1900). Aux origines du sous-développement*, La Découverte/Poche, 2006.

58. G. de Marsily, *L'Eau, un trésor en partage*, op.cit.

CONCLUSION

Revenons sur une des prémisses de ce livre : nous croyons connaître et comprendre les problèmes de l'eau car nous en avons une expérience tangible, quotidienne. La réalité est pourtant tout autre. La question de l'eau est bien plus complexe que nous ne le pensons car elle s'immisce dans des enjeux, des domaines extrêmement variés, de manière souvent cachée et sous des formes diverses. Les quelques dizaines de litres d'eau potable que nous utilisons chaque jour nous sont familiers, mais nous ne savons rien des milliers de litres que nos modes de vie requièrent. Nous voyons les effets tangibles, immédiats, de l'eau, mais nous comprenons mal que, dans la durée, ces effets se combinent et finissent par resurgir sans que la dimension « eau » soit perceptible. Sans une exploration nouvelle de ces faces cachées de l'eau, il y a fort à parier que nous ne serons en mesure ni d'apporter des solutions à la crise de l'eau, ni de nous préparer à ses conséquences.

ANTICIPER LES CRISES

Les crises sont généralement des événements brutaux qui paraissent uniquement déterminés par des causes immédiates : prix de l'énergie, catastrophes naturelles, spéculation... Pourtant, elles sont généralement le produit de tensions accumulées sur des périodes longues qui, un peu comme dans le fameux « effet papillon », masquent des causes lointaines, dont l'eau peut faire partie. Ce rôle de l'eau disparaît de notre compréhension au moment où la crise survient.

La démographie, et en particulier les migrations et l'exode rural, offre un exemple de ces influences de l'eau dans la durée. La disponibilité de l'eau et le développement économique qu'elle stimule créent un attrait et peuvent déplacer des populations en provenance de zones mal pourvues par l'hydrographie. Ainsi en est-il dans les périmètres irrigués de pays secs dont la population

peut croître soit par l'immigration, soit par une croissance endogène non contrebalancée par de l'exode rural. Lorsque la densité de population s'accroît, il faut produire plus de cultures vivrières. Or ces dernières ne rentrent pas dans une logique commerciale, elles ne reçoivent pas les intrants (fertilisants, eau...) dont elles auraient besoin, ont des rendements faibles et occupent des surfaces disproportionnées. Ces périmètres risquent alors progressivement de ne plus remplir le rôle pour lequel ils ont été construits et qui est de nourrir les villes.

Tant que ces phénomènes restent relativement localisés, ils ne provoquent pas de crise. Il n'en est pas de même lorsqu'ils se produisent à plus large échelle, comme c'est le cas en Afrique de l'Ouest. Depuis de nombreuses années, la croissance démographique des pays arides du Sahel conduit à des migrations vers les pays du golfe de Guinée mieux arrosés, et en premier lieu vers la Côte d'Ivoire, plus attrayante économiquement. Dans la durée, ces migrations peuvent avoir un effet déstabilisant, ce qui est le cas pour la Côte d'Ivoire depuis les années 2000.

Ces effets de l'eau sur la démographie sont néanmoins complexes et encore peu analysés⁵⁹. Prenons l'exemple de la transition démographique, cette phase de développement qui combine un taux de mortalité réduit et le maintien d'une fécondité élevée, et qui par conséquent s'accompagne d'une croissance démographique forte. Des pays ou des régions pauvres en eau peuvent avoir plus de difficultés que d'autres à réaliser leur transition démographique si le manque d'eau ralentit le développement économique alors que se maintient une fécondité élevée. La transition prend typiquement de l'ordre d'une cinquantaine d'années, mais peut durer davantage si le développement économique est lent. Des régions sèches et pauvres peuvent ainsi voir leurs populations augmenter au-delà de ce que les territoires où elles sont établies peuvent supporter, ce qui risque fort de générer des tensions et des crises⁶⁰.

Ces dernières peuvent éclater sur place si d'autres éléments culturels, territoriaux ou d'appropriation de ressources sont présents. Elles peuvent aussi s'exporter à travers l'émigration d'une partie de la population, et notamment celle des jeunes adultes. Ce mécanisme risque alors de transférer les problèmes puisqu'il conduit à réduire la fécondité de la région d'émigration et à augmenter celle de la région d'immigration.

Un autre exemple de crise ayant des relations avec l'eau est celui des crises alimentaires, comme celle de 2008, provoquées par des prix de l'énergie en hausse, des spéculations ou des catastrophes naturelles. Dans ce cas, le mécanisme sous-jacent n'est pas tant la démographie que l'internationalisation de l'eau par le biais des transferts d'eau virtuelle. Dans le monde interconnecté d'aujourd'hui, environ un cinquième de l'empreinte eau mondiale s'échange grâce au commerce international et l'alimentation représente 80 % des transferts. Tant que la production est suffisante, cette interdépendance augmente la sécurité alimentaire. Mais depuis plus de dix ans, la croissance de la production alimentaire suit avec difficultés celle de la population, ce qui a conduit à une diminution des stocks mondiaux de céréales et à une stabilisation de la sous-alimentation. La crise de 2008 a montré que les tensions génèrent des phénomènes en cascade, dont le plus manifeste a été l'escalade de mesures protectionnistes de nombreux pays cherchant à assurer leurs importations ou à réduire leurs exportations, le tout dans une panique généralisée.

À travers ces exemples, il paraît clair que les relations entre eau et crises sont complexes à appréhender et que l'eau seule n'est jamais le seul facteur. Ce qui ne doit pas conduire à conclure trop hâtivement que le manque d'eau n'est pas générateur de conflits. D'autant que les tensions devraient être amplifiées par le changement climatique qui va rendre les régions humides encore plus humides et asséchera davantage les régions arides.

ÉLARGIR LES PERSPECTIVES GRÂCE À L'EMPREINTE EAU

L'eau bleue n'est et ne sera pas disponible en quantités suffisantes dans de nombreuses régions et dans de nombreux bassins-versants

59. Voir par exemple à ce sujet P. Vimard, R. Fassassi, Démographie et développement en Afrique : éléments rétrospectifs et prospectifs, *Cahiers québécois de démographie*, vol. 40, n° 2, 2011. <http://www.erudit.org/revue/cqd/2011/v40/n2/1011544ar.html>

60. Daniel Cohen, in *Homo Economicus*, Albin Michel, 2012, mentionne ainsi l'existence de « poches de malthusianisme ».

pour répondre aux besoins humains et maintenir les services écosystémiques essentiels à la résilience de nos sociétés. Se limiter aux raisonnements sur l'eau bleue, c'est un peu comme rechercher un objet égaré dans la nuit uniquement sous la lumière d'un lampadaire. Il est urgent de prendre la mesure des différents types d'eau que nous utilisons. C'est ce à quoi nous invite la notion d'empreinte eau, à condition toutefois de ne pas tomber dans un piège, celui de sacraliser les chiffres et les évaluations. L'empreinte eau doit être un outil pour élargir nos perspectives et trouver de nouvelles solutions. Elle ne peut ni ne doit devenir une fin en soi. Le foisonnement actuel des réflexions et des méthodes d'évaluation n'est pas mauvais car, en fonction des problèmes à résoudre, différents modes d'estimation des impacts sont possibles. Si une entreprise souhaite comparer différents processus de production afin de minimiser ses impacts au niveau local, elle n'a sans doute pas besoin de tenir compte de l'eau de pluie ou de l'eau virtuelle importée. En revanche, les consommateurs doivent pouvoir faire des choix et, pour cela, avoir une bien meilleure connaissance des chaînes d'approvisionnement et de leurs impacts sur la planète que celle disponible aujourd'hui. Pour eux, l'empreinte eau doit intégrer les différentes formes d'eau, y compris l'eau virtuelle, et les impacts de leurs utilisations. Observons aussi qu'une approche d'ensemble des empreintes carbone, écologique serait nécessaire, ce qui supposerait ici encore que l'eau soit pensée comme une des dimensions à prendre en compte.

Quant aux responsables politiques, qui doivent combiner des perspectives extrêmement diverses, ils ne peuvent se contenter d'estimations de l'empreinte eau. Leurs décisions doivent être guidées par des estimations de la productivité de l'eau dépassant la vision hydraulicienne courante, limitée aux pertes dans les tuyaux ou les canaux. Les outils nécessaires doivent permettre d'évaluer conjointement les valeurs et les productivités économiques, sociétales et environnementales des différentes formes d'eau – et donc des composantes de l'empreinte eau –, suivant les trois axes du développement durable. La productivité économique est la plus simple à analyser. La dimension sociale est plus compliquée et se mesure, par exemple, en nombre d'emplois maintenus ou en réduction de l'exode rural. La dimension environnementale est également

complexe et s'évalue en biodiversité épargnée ou en pollutions évitées et, in fine, en services environnementaux gagnés ou protégés. Ces trois dimensions doivent s'appliquer aux différentes formes d'eau utilisées et inclure la composante « eau virtuelle » afin de donner les éléments de choix les plus complets possible.

GLOSSAIRE

Agriculture irriguée : la production agricole dépendant pour partie d'eau d'irrigation.

Agriculture pluviale : la production agricole ne dépendant que de l'eau de pluie.

Consommation d'eau : évaporation d'eau (bleue, verte ou autre) consécutive à un usage. L'agriculture a pour vocation de faire « consommer » de l'eau par les plantes. À distinguer de « prélèvement ».

Eau bleue : l'eau douce qui circule dans les fleuves ou est stockée dans les nappes souterraines et que l'on peut pomper.

Eau d'irrigation : l'eau bleue utilisée pour arroser les cultures. Les cultures irriguées utilisent en général à la fois de l'eau d'irrigation et de l'eau verte provenant de la pluie.

Eau de surface : l'eau bleue circulant dans les cours d'eau ou les canaux.

Eau grise : désigne souvent l'eau usée, c'est-à-dire l'eau bleue dégradée après usage. Dans la terminologie émergente de l'empreinte eau, l'eau grise désigne la quantité d'eau bleue nécessaire pour diluer suffisamment l'eau usée rejetée pour rendre l'eau à nouveau disponible pour un autre usage.

Eau souterraine : l'eau bleue présente dans les nappes d'eau souterraines.

Eau verte : l'eau de pluie stockée dans les sols et pouvant être utilisée par la végétation.

Eau virtuelle : le volume d'eau nécessaire à la production d'un produit. Le concept est surtout utilisé pour décrire les quantités d'eau associées au commerce des produits. Il a été introduit par Tony Allan au début des années 1990.

Empreinte eau : le volume d'eau nécessaire à la production d'un produit, en intégrant tous les stades de sa chaîne de production. Par extension, le volume d'eau requis pour un mode de vie donné, pour une entreprise, un pays. Généralement, pour être comparable aux ressources, l'empreinte eau doit être ramenée à une année. Elle se décompose en eau bleue, eau verte et eau grise.

Empreinte eau de production : l'empreinte eau interne d'un pays pour ses activités de production de biens, d'énergie et d'eau potable. Une partie de cette empreinte de production est exportée sous forme d'eau virtuelle.

Empreinte eau de consommation : l'empreinte eau des produits consommés dans un pays. Elle inclut l'empreinte des produits du pays (différence entre l'empreinte de production et des exportations d'eau virtuelle) et l'eau virtuelle des produits importés (et non réexportés).

Prélèvement : pompage d'eau bleue dans un cours d'eau ou une nappe d'eau souterraine. À distinguer de « consommation ».

Recyclage continental : l'alimentation des précipitations des continents par de l'évaporation en provenance des continents et non de l'océan. Grâce au recyclage continental, les précipitations sur les continents s'élèvent à 113 000 km³. Si seule l'eau évaporée des océans arrosait les continents, les précipitations n'y seraient que de 40 000 km³.

Ressources en eau : classiquement, les quantités d'eau bleue disponibles pour les usages humains.

BIBLIOGRAPHIE

> OUVRAGES

- > *Charting our Water Future*, Water Resources Group, Washington, 2010.
- > *L'Empreinte eau de la France*, WWF, 2012.
- > *Le Monde en 2030 vu par la CIA*, Édition des Équateurs, 2013.
- > Rapports mondiaux sur la mise en valeur des ressources en eau (I, II, III, IV), Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau, Unesco, Paris, Earthscan, Londres, 2003, 2006, 2009, 2012.
- > *Saving Water: From Field to Fork. Curbing Losses and Wastage in the Food Chain*, Stockholm International Water Institute, Stockholm, 2008.
- > *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*, Earthscan, Londres, International Water Management Institute, Colombo, 2007.
- > ALLAN (T.), *Virtual Water: Tackling the Threat to Our Planet's Most Precious Resource*, I. B. Tauris, Londres, 2011.
- > BATES (B. C.), KUNDZEWICZ (Z. W.), WU (S.) et PALUTIKOV (J. P.) [dir.], *Climate Change and Water*, Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Genève, 2008.
- > COSGROVE (W. J.) et RIJSBERMAN (F. R.), *World Water Vision, Making Water Everybody's Business*, World Water Council, Earthscan, Londres, 2000.
- > DAVIS (M.), *Génocides tropicaux : catastrophes naturelles et famines coloniales (1870-1900). Aux origines du sous-développement*, La Découverte/Poche, 2006.
- > GLEICK (P. H.) [dir.], *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*, Oxford University Press, Oxford, 1993.
- > GOMES (N.), TOUMA (J.) et ALBERGEL (J.), *Water Harvesting Techniques. State of the Art, New Researches and Challenges*, Aquastress Report, 2008.
- > GUSTAVSSON (J.), CEDERBERG (C.), SONESSON (U.), VAN OTTERDIJK (R.) et MEYBECK (A.), *Global Food Losses and Food Waste: Extent Causes and Prevention*, FAO, Rome, 2011.
- > HOEKSTRA (A.), CHAPAGAIN (A.), ALDAYA (M.) et MEKONNEN (M.), *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the global standard*, Earthscan, Londres, 2011.
- > LERIDON (H.) et MARSILY (G. de) [dir.], *Démographie, climat et alimentation mondiale*, rap-

port RST n° 32, Académie des sciences, Éditions EDP Sciences, 2011.

> MARSILY (G. de) [dir.], *Les Eaux continentales*, rapport RST n° 25, Académie des sciences, Éditions EDP Sciences, 2006.

> MARSILY (G. de), *L'Eau, un trésor en partage*, Dunod, 2009.

> STEDUTO (P.), HSIAO (T.), FERERES (E.) et RAES (D.), *Crop Yield Response to Water*, FAO, Rome, Irrigation and Drainage Paper n° 66, 2012.

> WAUGHDRAY (D.) [dir.], *Water Security: The Water-Food-Energy-Climate Nexus*, The World Economic Forum Water Initiative, Island Press, Washington, 2011.

> PRINCIPAUX ARTICLES SCIENTIFIQUES

> BESBES (M.), CHAHED (J.), HAMDANE (A.) et MARSILY (G. de), "Changing water resources and food supply in arid zones: Tunisia", in Schneier-Madanes (G.) et Courel (M. F.) [dir.], *Water and Sustainability in Arid Regions*, Springer, CNRS Éditions, 2009.

> HOEKSTRA (A.) et CHAPAGAIN (A.), "Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern", *Water Resources Management*, vol. 21, 2007.

> HOEKSTRA (A.), MEKONNEN (M.), *The water footprint of humanity*, PNAS, vol 109, 2012. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1109936109

> ROCHE (P. A.) et ZIMMER (D.), « Eau, aménagement et usages », in Marsily (G. de) [dir.], *Les Eaux continentales*, rapport RST n° 25, Académie des sciences, Éditions EDP Sciences, 2006. Disponible sur : http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_.html/RST25.htm

> ROCKSTRÖM (J.), *Magnitude of the Hunger Alleviation Challenge – Implications for Consumptive Use*, séminaire "Balancing food and environmental security: Finding opportunities for improving livelihoods", Stockholm International Water Institute, Stockholm, 2004.

> SHIKLOMANOV (I. A.), "World fresh water resources", in P. H. Gleick (dir.), *Water in Crisis: a Guide to the World's Fresh Water Resources*, Oxford University Press, Oxford, 1993.

> TRENBERTH (K. E.), SMITH (L.), QIAN (T.), DAI (A.) et FASULLO (J.), "Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data", *Journal of Hydrometeorology*, vol. 8, 2007.

> VAN DER ENT (R. J.), SAVENIJE (H.), SCHAEFLI (B.) et STEELE-DUNNE (S.), "Origin and fate of atmospheric moisture over continents", *Water Resources Research*, vol. 46, 2010.

> WADA (Y.), VAN BEEK (L. P. H.) et BIERKENS (M. F. P.), "Non sustainable groundwater sustaining irrigation: A global assessment", *Water Resources Research*, vol. 48, 2012.

> ZIMMER (D.) et RENAULT (D.), "Virtual water in food production and global trade: Review of methodological issues and preliminary results", in *Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade*, Value of Water Research Report Series n° 12, IHE, Delft, 2003.

> ISO-TC-207-SC5 Water footprint, requirements and guidelines (dans articles persos/water footprint) four phases of life cycle, assessment, i.e. goal and scope definition (see 5.2), inventory analysis (see 5.3), impact assessment (see 5.4) and interpretation (see 5.5).

> Product Water Footprint Assessments_ Practical Application in Corporate Wa.pdf dans articles persos/water footprint. Doc. de Coca-Cola et The Nature Conservancy.

> Water futures, dans articles persos/water footprint. Approche de SABMiller de *water stewardship*.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	7
----------------------	---

PRÉFACE	11
----------------	----

INTRODUCTION	15
---------------------	----

PREMIÈRE PARTIE - RESSOURCES ET USAGES DE L'EAU	21
--	----

I. LES RESSOURCES EN EAU SUR LA PLANÈTE :	
QUELQUES NOTIONS À REDÉFINIR	23
> La variabilité de l'eau, source des difficultés	24
> La définition classique des ressources en eau	26
> Les ressources renouvelables par continent	29
> Le recyclage continental	34

II. L'APPROCHE CLASSIQUE DES USAGES DE L'EAU :	
EXCÈS DE PRÉLÈVEMENTS ET PÉNURIES	39
> La vision classique des usages	41
> Les pénuries en eau à travers le monde	46
> Les pénuries de nature économique	49
> Le minage des eaux souterraines	51

III. LE TRIPTYQUE EAU, ALIMENTATION, ÉNERGIE, OU COMBIEN D'EAU	
UTILISONS-NOUS VRAIMENT ?	57
> L'agriculture, les plantes et l'eau	58
> Des végétaux aux produits transformés	61

> Retour sur la consommation d'eau agricole	63
> Combien d'eau pour l'alimentation ?	67
> Combien d'eau pour nourrir la planète en 2050 ?	70
> La consommation de viande : une autre clé de l'avenir	72
> L'eau et l'énergie	74
> Des usages mal pris en compte	81
> Retour sur les usages	84

DEUXIÈME PARTIE - VERS UNE NOUVELLE

APPROCHE DES USAGES DE L'EAU	91
------------------------------	----

IV. L'EAU VIRTUELLE, OU COMMENT LA CRISE DE L'EAU

ÉCHAPPE AUX EXPERTS	93
> Les deux facettes de la crise de l'eau	93
> Pourquoi l'eau des champs est-elle moins visible ?	94
> Comment estimer le contenu en eau virtuelle des échanges alimentaires ?	98
> Quel ordre de grandeur planétaire ?	100
> Qui importe, qui exporte ?	102
> L'eau virtuelle permet-elle d'économiser l'eau ?	103

V. DE L'EAU VIRTUELLE À L'EMPREINTE EAU

> Une apparente filiation avec l'empreinte écologique	107
> L'empreinte eau et ses composantes	109
> Empreinte eau et durabilité des usages	110
> Estimation de l'empreinte eau mondiale	112
> Les empreintes nationales, aspects comptables	114
> Les empreintes nationales, quelques résultats	115

TROISIÈME PARTIE - COMMENT L'EMPREINTE EAU OUVRE

DE NOUVELLES PERSPECTIVES	119
---------------------------	-----

VI. L'EMPREINTE EAU DES PAYS

> La problématique de l'eau dans les pays méditerranéens : le cas exemplaire de la Tunisie	121
> Bonne gouvernance et prix de l'eau : le dilemme des pays pauvres en eau	124
> L'eau virtuelle	127
> Quelles réponses possibles à l'augmentation des besoins en eau virtuelle ?	131
> L'exemple d'un pays européen : l'empreinte eau de la France	133
> Comment cette analyse peut-elle aider les pays ?	141
> Retour sur la méthode	143

VII. L'EMPREINTE EAU ET LE CONSOMMATEUR

> Alléger l'empreinte eau de notre régime alimentaire	146
> Une empreinte eau à l'image de la culture d'un pays	148
> Carnivores ou végétariens ? L'évolution des régimes alimentaires des dernières décennies	151
> Régimes alimentaires et productivité nutritionnelle de l'eau	153
> Pertes et gaspillages alimentaires	156
> Des pertes variables tout au long de la chaîne alimentaire	157
> La surconsommation des ménages et de la restauration collective	159
> Un impact mondial colossal	161
> Retour sur les calories et la viande	163
> Quels impacts sur l'eau ?	164
> L'eau grise des produits industriels	166

VIII. L'EMPREINTE EAU ET LES ENTREPRISES

> Les entreprises internationales soucieuses de maîtriser leur empreinte eau	169
> La trilogie réduire, recycler, compenser	171
> Deux approches du calcul de l'empreinte eau	173

IX. QUELLES ACTIONS ? QUELLES SOLUTIONS ? QUELQUES PISTES	177
> Reconsidérer la notion de ressource en eau	179
> Mieux considérer et mieux gérer l'eau de pluie	180
> Repenser la productivité de l'eau	182
> Repenser la gestion transfrontalière de l'eau	184
> Anticiper les conséquences démographiques des pénuries d'eau	185
> Développer l'intendance de l'eau des entreprises	187
> Dépasser les cadres institutionnels classiques	189
> Repenser les gaspillages d'eau	190
> Accroître les synergies entre politiques de l'eau, de l'agriculture et de l'énergie	192
> Repenser la sécurité en eau	193
> Anticiper des cataclysmes majeurs	195
<hr/>	
CONCLUSION	197
> Anticiper les crises	197
> Élargir les perspectives grâce à l'empreinte eau	199
<hr/>	
GLOSSAIRE	203
<hr/>	
BIBLIOGRAPHIE	205