

l'eau et la planète

Daniel Zimmer

L'EAU ET LA PLANÈTE

Un avenir au compte-gouttes

ÉDITIONS Charles Léopold Mayer

38 rue Saint-Sabin – 75011 Paris/France

www.eclm.fr

Maison d'édition de la **Fondation Charles Léopold Mayer pour le Progrès de l'Homme** (FPH), les Éditions Charles Léopold Mayer (ECLM) publient des ouvrages sur la transition écologique, économique et sociale. Elles accompagnent les acteurs de la transition afin qu'ils puissent développer, mettre en forme et diffuser leur plaidoyer par l'intermédiaire du livre. Association française à but non lucratif, les ECLM existent depuis 1995 et disposent de plus de 400 titres à leur catalogue. Elles publient aujourd'hui une dizaine de titres par an.

Les ECLM sont membres de la Coredem (Communauté de sites ressources pour une démocratie mondiale : www.coredem.info) et de l'Alliance internationale des éditeurs indépendants (www.alliance-editeurs.org).

© Éditions Charles Léopold Mayer 2024

Essai n° 254

ISBN : 978-2-84377-237-5

Mise en page : Émilie Boismoreau

Conception graphique : Nicolas Pruvost

L'auteur

Daniel Zimmer est ingénieur agronome, titulaire d'un doctorat en hydrologie. Il a mené des recherches et conduit des expertises sur l'influence des activités humaines sur le cycle et la qualité de l'eau dans le monde entier. De 2001 à 2009, il a été directeur du Conseil mondial de l'eau où il a développé une compréhension panoramique des grands enjeux de l'eau. Il travaille à la KIC-Climat, une organisation européenne qui œuvre dans les domaines de l'innovation et du changement climatique. Il y dirige un programme portant sur la gestion durable des territoires. En 2013, il a publié *L'Empreinte eau* aux Éditions Charles Léopold Mayer.

Organisations associées à la diffusion et la promotion :

Le Partenariat Français pour l'Eau (PFE) est la plateforme de référence des acteurs français de l'eau actifs à l'international. Il porte depuis plus de quinze ans un plaidoyer au niveau international pour que l'eau constitue une priorité dans les politiques du développement durable et favorise les échanges entre les savoir-faire français et ceux des autres pays.

Le PFE vise également à faire connaître et à promouvoir l'approche et l'expertise française en matière de gestion de l'eau : une approche particulière car résolument multi-acteurs et toujours innovante depuis sa mise en place dans les années 1960 en France.

Il rassemble aujourd'hui environ 200 membres, acteurs publics et privés de l'eau, qui sont à l'image de la gestion de l'eau en France. Ces acteurs sont regroupés au sein de six collèges : État et établissement publics, collectivités, ONG, entreprises, instituts de recherche et de formation ainsi que des experts qualifiés (dont Daniel Zimmer). Ensemble, les membres du PFE élaborent des messages communs et partagés par tous les collèges et les diffusent dans les enceintes et les instances européennes et internationales telles que les Nations unies, l'Union européenne, ou encore lors d'événements comme les COP Climat ou Biodiversité, les Forums mondiaux de l'Eau ou les Semaines mondiales de l'Eau de Stockholm.

<https://www.partenariat-francais-eau.fr/>

Découvrez la filmographie sur l'eau réalisée par Autour du 1^{er} mai en consultant la fiche du livre sur le site de la maison d'édition : www.eclm.fr

Autour du 1^{er} mai est une association loi 1901 qui se veut un outil de lien social par l'intermédiaire du cinéma. Parmi ses activités d'accompagnement des structures de la transition qui œuvrent vers une société plus juste et plus durable, l'association anime la base Cinéma & Société, un catalogue raisonné de films sur les questions de société qui met à disposition de celles et ceux qui souhaitent organiser des projections toutes les informations nécessaires à l'élaboration de leurs programmations.

<http://autourdu1ermai.fr>

REMERCIEMENTS

Ce livre est le fruit d'une réflexion sur l'eau, son rôle sur la planète, sa gestion par les humains, initiée dans mes travaux de recherche sur l'influence des aménagements, sur son stockage et ses écoulements dans nos campagnes. Cette réflexion s'est poursuivie au cours de multiples et féconds échanges avec des femmes et des hommes cherchant, souvent passionnément, à défendre ses rôles, à la préserver de toutes les dégradations que nos usages lui font subir afin que notre planète puisse rester bleue et verte.

Bleu et vert, deux couleurs de l'eau que j'ai appris à différencier et dont je vais essayer de faire partager la richesse dans ce livre. Deux couleurs qu'il importe de bien comprendre, car elles participent de la stabilité de notre planète.

Un immense merci à toutes les femmes et tous les hommes qui m'ont aidé à déchiffrer l'eau, à revisiter et prendre de la distance et changer mon regard sur non pas «le», mais les divers cycles de l'eau. Il m'est impossible de les citer tous, mais je tiens à mentionner Ghislain de Marsily à qui je dois énormément pour mon travail de recherche et pour nos nombreux échanges sur les enjeux de l'eau sur la planète.

Un grand merci à Stéphanie, Jean Loup, Sylvie et Louis qui ont aidé à rendre mon texte plus accessible et plus compréhensible.

*Quand les vignes gèlent en mon village,
mon prêtre en argumente l'ire de Dieu sur la race humaine,
et juge que la pépie en tienne déjà les Cannibales.*

MONTAIGNE

INTRODUCTION

Il ne se passe pas un jour sans que l'eau ne se rappelle à nous dans les médias ou dans notre quotidien. Abasourdis, nous sommes un peu comme ce pharaon à qui Joseph expliquait la signification de son rêve des sept vaches grasses et des sept vaches maigres. Nous avons nous aussi été prévenus, mais le message n'a pas déclenché de passage à l'action. La leçon de cet épisode biblique est pourtant claire : c'est pendant la période des vaches grasses qu'il faut se préparer à affronter les difficultés. Quand les vaches maigres surgissent, on se retrouve à gérer l'urgence et il devient difficile de prendre du recul, d'élargir notre regard et nos perspectives. Nous nous y efforcerons dans cet essai.

Pour commencer, nous imaginons facilement que le mot «eau» recouvre le même sens pour tous. Or il existe tellement de réalités liées à l'eau. Entre celle qui tombe du ciel, celle qui coule dans les rivières, celle qui rend notre planète bleue, celle qui irrigue nos cellules ou celle encore qui jaillit de nos robinets, les différences sont plus qu'anecdotiques. En vérité, ce n'est pas l'eau en elle-même qui nous intéresse, mais bien les multiples connexions qu'elle établit entre le monde minéral et le monde vivant, et les innombrables services qu'elle nous rend. L'eau n'est pas une fin en soi, elle transporte et recycle, aide à produire, facilite la vie. Elle le fait merveilleusement bien à toutes les échelles, de celle de la cellule jusqu'à celle de la planète.

Quand nous entendons parler d'eau, attachons-nous à saisir la nuance afin d'éviter confusions et amalgames!

Beaucoup d'entre nous ont grandi dans un monde où la disponibilité de l'eau paraissait sans limite comme la plupart des ressources de notre planète. L'eau n'est-elle pas une ressource renouvelable? Son cycle annuel ne nous protège-t-il pas des pénuries comme le faisait la crue du Nil pour les Égyptiens? Nous découvrons avec stupeur qu'à force d'exploiter les ressources de notre planète, nous avons franchi des limites, car nous observons que plusieurs de ses grands cycles ont été modifiés par l'action humaine, au risque de déstabiliser la biosphère dans son ensemble. Celui de l'eau douce est particulièrement sensible tant il est intrinsèquement associé au fonctionnement du vivant. Si l'eau douce paraît aujourd'hui menacée, ce n'est pas forcément parce que nous en avons moins¹, c'est surtout parce que son cycle et sa répartition sur la planète et au cours des saisons changent et parce que nous sommes de plus en plus nombreux à en avoir besoin. D'un monde aux multiples nuances de bleu, nous passons à un monde de forts contrastes entre et au sein

1. Dans cette assertion, il faudrait en toute rigueur distinguer les stocks planétaires d'eau douce qui s'amenuisent, puisque le niveau de l'océan s'élève, pour partie à cause de la fonte des glaces et de la surexploitation des nappes souterraines, et les *flux annuels* échangés entre les grands lieux de stockage qui, eux, augmentent avec le dérèglement climatique. En effet, les quantités d'eau douce véhiculées dans l'atmosphère et celles transportées dans les rivières suite à la fonte des glaciers augmentent quand la température moyenne de la planète monte.

des régions et des saisons. Nous vivons aujourd'hui une intense période de sécheresse ? Gare aux prochaines pluies diluviennes ou aux inondations à venir !

Si le fonctionnement perturbé de la planète dicte sa loi à l'eau douce, nous, les sociétés humaines, en portons une bonne part de responsabilité. L'utilisation que nous faisons de l'eau douce disponible sous toutes ses formes joue un rôle essentiel. Nos prélèvements diminuent l'eau liquide disponible. La production de notre nourriture requiert l'évaporation de grandes quantités d'eau pour partie puisées dans des fleuves ou des nappes souterraines. Les rejets d'eaux usées et de multiples polluants diminuent la vitalité, voire transforment les écosystèmes aquatiques.

Si nous sommes acteurs de ces dérèglements, nous nous devons d'agir pour les atténuer et si possible les corriger. La prise de conscience est là, mais une approche holistique et systémique de la transformation de nos usages est nécessaire. Développer une telle approche demande d'élargir notre perception de l'eau comme nous allons le démontrer.

Dans une première partie, il s'agira ici de modifier notre conception du cycle de l'eau, polarisée sur l'eau bleue, celle qui coule et qu'on peut pomper, en donnant toute sa place à l'eau verte, celle qui s'infiltré et se stocke dans les sols et permet aux plantes et aux écosystèmes de s'épanouir et de verdifier la planète. Ce faisant, cette eau verte se trouve évaporée et recyclée en précipitations de multiples fois au gré des turbulences atmosphériques.

Ce recyclage continental est essentiel, non seulement pour le fonctionnement de la biosphère, mais pour la redistribution de l'eau, y compris de l'eau bleue, sur toute la planète. Nous n'y avons que peu réfléchi, mais sans eau verte, nous aurions moins d'eau bleue !

Comprendre les multiples cycles et recyclages de l'eau est tout aussi essentiel pour penser nos usages de l'eau. Utiliser l'eau, c'est modifier la manière dont elle circule et se répartit dans les sols, l'atmosphère, les rivières... C'est aussi jouer avec les propriétés physiques et chimiques extraordinaires de cette molécule capable de stocker ou de véhiculer de grandes quantités d'énergie, de dissoudre et de transporter de nombreuses molécules qui peuvent aussi bien catalyser la vie que la transformer ou la détruire. Il existe donc de nombreuses façons d'utiliser l'eau qui influent différemment sur son cycle ou sur sa qualité. L'eau bleue peut être simplement détournée temporairement de son écoulement naturel, parfois elle peut être évaporée comme l'est l'eau verte qui trouve son utilité dans le développement des végétaux. Cette diversité ne facilite pas la comptabilité de l'eau. Comme le recyclage de l'eau verte démultiplie l'eau sur la planète, le recyclage de l'eau bleue démultiplie les quantités utilisées. À travers l'analyse des usages, il apparaît que c'est le flux d'eau verte que nous perturbons le plus de manière quantitative, alors que l'eau bleue est surtout perturbée dans sa qualité.

Nous nous interrogerons logiquement sur les conséquences de notre entrée dans l'anthropocène, cette nouvelle ère géologique dans laquelle les actions humaines sont déterminantes pour le fonctionnement de la planète. Sommes-nous en train de franchir certaines limites planétaires? Quel rôle joue l'eau vis-à-vis de ces limites? Là aussi, la distinction entre eau bleue et eau verte se révèle fertile comme le démontrent des recherches récentes. Tandis que la première intervient surtout par son rôle de médium dans le transport et les cycles biogéochimiques planétaires comme ceux de l'azote et du phosphore, la seconde constitue le socle de la biosphère continentale.

La mise au point d'un cadre d'analyse holistique de nos usages de l'eau reste en chantier, mais progresse depuis une vingtaine d'années. Nous analyserons en particulier les deux approches complémentaires d'estimation de notre empreinte eau : l'approche volumique, issue des réflexions de la fin du siècle dernier sur le contenu en eau virtuelle de nos biens de consommation, et l'approche multicritère, plus récente, centrée sur l'eau bleue et les impacts quantitatifs et qualitatifs de son utilisation. L'empreinte eau volumique² vise à estimer les quantités d'eau utilisées pour nos biens de consommation et tente aussi d'intégrer les impacts de nos usages à travers la notion d'eau grise. Mais l'approche reste rudimentaire et incapable de

2. Voir Daniel Zimmer, *L'Empreinte eau*, Éd. C. L. Mayer, 2013.

fournir des comparaisons utiles entre différents biens de consommation. Sa principale vertu est de fournir un cadre d'analyse des types d'eau nécessaires localement et internationalement à nos modes de vie. L'empreinte eau multicritère a quant à elle mis au point une métrique holistique des impacts quantitatifs et qualitatifs de nos usages d'eau bleue, principalement locaux, au prix d'une perte de toute logique volumique.

L'état des lieux et des connaissances étant posé, la deuxième partie traitera des grands défis auxquels nous faisons face. Il nous faut tout d'abord bien comprendre les différences entre sécheresses et pénuries d'eau. Les premières répondent à une logique d'offre, déterminée par la disponibilité de l'eau douce, fonction du bilan pluie-évaporation. Les secondes résultent d'une demande en eau bleue en excès par rapport à l'offre. Bien sûr, c'est la comparaison de l'offre et de la demande qui, in fine, détermine le niveau de stress hydrique, mais il est indispensable de comprendre les déterminants de l'évolution de chacun des deux pôles pour bien agir. Un des critères essentiels est l'accroissement de la demande d'évaporation³ due au réchauffement d'ensemble qui réduit l'offre d'eau bleue. La sensibilité du cycle de l'eau est amplifiée par une rétroaction positive entre eau et température :

3. La demande d'évaporation, aussi appelée évapotranspiration potentielle, se réfère à la totalité de l'énergie disponible pour évaporer de l'eau. Elle n'est satisfaite que lorsqu'il y a de l'eau facile à évaporer.

plus il fait sec, moins on évapore d'eau et plus l'énergie solaire réchauffe l'atmosphère, ce qui en retour augmente encore la demande d'évaporation. Cette non-linéarité explique qu'on ne parvienne plus à recharger les nappes souterraines comme avant et que de nombreux lacs et réservoirs tendent à se vider⁴. Nous verrons que cette sensibilité de l'offre aux conditions météorologiques est particulièrement forte dans la région méditerranéenne.

Quant à la demande, elle est tirée vers le haut par la croissance de la production d'énergie et de produits agricoles, elle-même déterminée par la croissance démographique et par l'augmentation du niveau de vie moyen. L'agriculture, tout particulièrement, est stimulée par une consommation accrue de viande et de produits élaborés, et par une demande croissante de biomasse vouée à la production de fibres et d'énergie — souvent passée sous silence dans les débats. Il nous faut ici aussi élargir nos horizons et examiner les questions d'eau non plus simplement en termes de sécurité alimentaire, mais en tenant compte d'une demande de matériaux et d'énergie vouée à croître tandis que nous diminuerons notre dépendance aux énergies fossiles.

4. Luc Chemla *et al.*, « Une étude d'une ampleur inédite révèle que la moitié des lacs et réservoirs du monde perdent de l'eau », *France Inter*, 19/05/2023. <https://www.radiofrance.fr/franceinter/une-etude-d-une-ampleur-inedite-revele-que-la-moitie-des-lacs-et-reservoirs-du-monde-perdent-de-l-eau-2912365>

Nous examinerons ensuite la manière dont l'eau douce est affectée par trois autres défis majeurs. Le premier d'entre eux est la détérioration de sa qualité résultant de nos usages, dont les conséquences sont quelque peu ambiguës. Bien qu'au niveau local, le contrôle de la pollution semble s'améliorer, l'accumulation des polluants dans les mers et les océans se poursuit, provoquant leur eutrophisation et générant des rétroactions négatives sur les continents qu'on commence tout juste à mesurer et à comprendre : pluies de particules plastiques, accumulation de polluants, notamment dans les poissons carnivores au sommet des chaînes trophiques⁵, qui sont les plus consommés. Élargir nos perceptions de l'eau demande donc de plus en plus que nous pensions à la fois eau douce et eau salée ! Nous avons trop longtemps considéré l'océan comme un exutoire bien accommodant, il est urgent de changer ici aussi notre logiciel.

Le deuxième défi est celui du dérèglement climatique qui affecte l'eau et ses changements d'état, de liquide en gaz ou en glace. La structure de la molécule H₂O explique les propriétés uniques de l'eau, et en particulier sa forte capacité de stockage et de transport d'énergie. Quelques 94 % de la chaleur supplémentaire captée par les gaz à effet de serre finissent stockés dans les océans, ce qui explique pour moitié l'élévation de leur niveau. C'est aussi

5. Les chaînes ou réseaux trophiques décrivent la manière dont les différentes espèces des écosystèmes interagissent pour se nourrir.

pour cela que l'eau est associée directement ou indirectement à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes qui s'observe depuis plusieurs décennies. L'eau est à la fois actrice et victime du dérèglement, ce qui en fait un acteur majeur de la nécessaire adaptation !

Le troisième défi est celui de la biodiversité et de la stabilité de la biosphère dont les relations avec l'eau et notamment l'eau verte commencent à être comprises. L'eau, le carbone et la biodiversité interagissent de manière à maintenir le socle d'habitabilité de la planète. Les écosystèmes des sols, dominés par des microorganismes, des champignons et de nombreux types d'animaux, soutiennent la biodiversité des végétaux de surface, contribuent au stockage souterrain du carbone, ce qui, en retour, permet la rétention de l'eau et des nutriments. De telles boucles de rétroactions se produisent à tous les échelons jusqu'à celle de la biosphère tout entière, dont la stabilité est permise par le recyclage continental de l'eau verte, essentiel également pour les puits de carbone continentaux. Serait-ce là qu'il faut rechercher les causes de la formidable stabilité de notre planète depuis le début de l'holocène ?

Comment affronter tous ces défis d'une complexité sans précédent ? Y a-t-il encore de l'espoir ? La troisième partie s'attelle à démontrer que tout n'est pas perdu et que le pire serait de baisser les bras, car seul l'espoir peut encore nous motiver à agir et à éviter l'effondrement. Il nous faut apprendre à penser et à travailler avec des systèmes

complexes qui évoluent et s'adaptent, ce qui rend leur prévisibilité quasi impossible.

Nous ne proposerons pas ici de recettes toutes faites, mais un cadre pour le développement de solutions qui repose sur quatre piliers, présents dans les discours et les médias comme s'opposant les uns les autres, alors qu'ils sont complémentaires. Premier pilier, celui de la recherche d'efficacité dans nos usages de l'eau, paradigme de base des approches d'ingénierie qui, ne crachons pas dans la soupe, ont permis tant de progrès. Le deuxième pilier est celui de la sobriété qui, dans un monde de ressources finies, nous invite à revisiter nos besoins, à les ajuster au gré des augmentations d'efficacité de nos usages, ainsi qu'à revoir l'organisation d'ensemble du modèle économique actuel. Le troisième est celui de la résilience, notre capacité à survivre aux crises, qui nous invite à penser le temps long et à anticiper les évolutions et les risques futurs. Comme nous le verrons, efficacité, sobriété et résilience ne sont pas seulement complémentaires : les gains dans une direction se paient souvent par des pertes dans une autre et réciproquement. C'est donc une recherche d'optimum qu'il nous faut viser.

Le quatrième pilier est celui de la régénération, en pleine effervescence depuis une dizaine d'années. L'idée de régénération trouve son origine dans les capacités des systèmes vivants non seulement de se réparer, mais de prospérer en accumulant de la richesse ou en développant de nouvelles capacités. Elle essaie de dépasser la notion

de durabilité ou de soutenabilité et de démontrer qu'il est possible d'augmenter les capacités de gestion et d'accumulation des richesses des systèmes vivants grâce, entre autres, à des mécanismes de symbiose et de coopération entre espèces. Le cas des coraux qui, dans des mers transparentes et pauvres en éléments nutritifs, parviennent à créer une richesse et une biodiversité exceptionnelle grâce à leur coopération avec des algues est symptomatique. Aujourd'hui, le courant régénératif explose littéralement et touche non seulement les systèmes travaillant avec la nature, tels que l'agriculture, l'écologie ou l'hydrologie, mais aussi les constructions humaines, comme les villes ou les entreprises. En toute logique, l'eau est un ingrédient essentiel des approches régénératives en émergence qui nous invitent à revisiter la manière dont sa gestion peut stimuler le fonctionnement des milieux naturels et des organisations humaines. Nous verrons que là aussi, revoir la manière dont nous appréhendons l'eau apporte bien des surprises et suscite de l'espoir.

PREMIÈRE PARTIE

L'EAU DOUCE

DANS TOUS SES ÉTATS

I. LES CYCLES DE L'EAU

Quand on parle d'eau, de quoi parle-t-on ? D'abord et surtout de l'eau douce et, le plus souvent, au sein de cette eau douce, de celle qui s'écoule, en étant ralentie quelquefois dans des lacs ou des retenues, de celle qui se stocke dans des aquifères en profondeur sous nos pieds, et bien sûr de celle qui surgit, comme par magie, quand nous ouvrons un robinet. Pourtant cette eau-là ne représente qu'une toute petite fraction, un petit pour cent, de l'eau douce, l'essentiel se trouvant dans les sols, dans les glaces et la neige. Et cette eau ne représente à son tour qu'une infime fraction, 3 %, de toute l'eau de la planète, contenue surtout dans nos mers et nos océans sous forme salée, creuset de la vie depuis 4 milliards d'années. Pourquoi est-ce important ? Parce que, comme nous le verrons, si l'on veut penser notre manière de nous relier à l'eau dans un contexte changeant ou de grande tension, il nous faut considérer l'eau dans toutes ses composantes.

LES MILLE VERTUS DE L'EAU

Revenons sur un aspect passé sous silence ci-dessus : une petite partie, 0,06 %, de l'eau douce se trouve aussi dans l'atmosphère, essentiellement sous forme de vapeur. L'eau est un des rares éléments qu'on peut trouver autant sous forme liquide que gazeuse ou solide sur notre planète. Ces différentes « phases » lui confèrent des rôles importants et surtout donnent naissance à des échanges,

des circulations à toutes les échelles entre les différents composants de la Terre et de sa biosphère. Ceux-ci conditionnent et résultent des flux d'énergie qui parcourent notre planète. Car l'eau est non seulement présente partout, mais elle peut contenir et véhiculer beaucoup d'énergie.

La vapeur d'eau joue deux rôles essentiels. Elle est d'abord une des raisons de l'habitabilité de notre planète via l'effet de serre auquel elle contribue pour 60 % ! Elle emprisonne une partie importante de l'énergie solaire et nous permet de bénéficier d'une température moyenne de 15 °C, de 33 °C supérieure à ce qu'elle serait sans effet de serre. Ce réchauffement conduit lui-même à une augmentation de la teneur en vapeur d'eau : chaque degré supplémentaire de température moyenne annuelle augmente la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère terrestre de 7 %. Le GIEC¹ indique même que cette augmentation se traduit par une augmentation moyenne des précipitations terrestres de 1 à 3 %².

La vapeur d'eau présente aussi l'intérêt d'être légère et de pouvoir être entraînée dans les courants atmosphériques auxquels elle prend part. Elle est un véhicule essentiel de la redistribution de l'énergie et de l'eau sur la

1. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. En anglais, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

2. IPCC, "Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment report of the IPCC", V. Masson-Delmotte *et al.* (dir.), Cambridge, Cambridge University Press.

planète. Cette redistribution a donné naissance au concept familier du cycle de l'eau qu'Aristote déjà avait compris, mais dont la démonstration formelle a nécessité plusieurs siècles. Le concept existait, mais il fallait pouvoir mesurer, quantifier et expliquer par quels stratagèmes les sources et les rivières continuaient à couler pendant de longues périodes sèches.

LE GRAND CYCLE DE L'EAU

Le principe du « grand » cycle de l'eau est simple : de l'eau s'évapore des mers et des océans, elle est ensuite véhiculée via les nuages vers les continents où, en s'élevant ou en rencontrant une pression atmosphérique différente, elle se condense à nouveau et retombe sous forme de pluie, de neige ou de grêle. Ces différentes retombées forment ce qu'on appelle les précipitations, un terme emprunté à la chimie pour désigner la formation de substances solides au sein de mélanges liquides. Les précipitations s'infiltrent dans les sols ou ruissellent à leur surface. Elles alimentent des rivières et des nappes souterraines qui finissent par retourner à l'océan en entraînant avec elles des sels dissous extraits des sols et des roches parcourus. Le cycle est bouclé, il conduit à un enrichissement progressif des océans en sels et à une séparation nette entre l'eau douce qui contient peu de sels, de 0 à 2 grammes par litre en général, et l'eau salée qui en contient entre 35 et 40 grammes.

La description ci-dessus a été introduite pour expliquer le fait que nos rivières et nos nappes souterraines se renouvellent suivant une périodicité annuelle, au rythme des

saisons. N'est-il pas naturel de voir se succéder et se reproduire des séquences de conditions sèches et humides, de voir nos rivières et fleuves suivre un régime similaire d'année en année? Depuis trois siècles environ, le principe général du cycle de l'eau douce a été bien compris et les quantités d'eau en jeu ont été quantifiées. Dans sa plus simple expression, ce cycle se décrit par un volume d'environ 40 000 km³ d'eau échangés chaque année entre les océans et les continents. Pour se faire une idée plus concrète du volume contenu dans 1 km³, imaginez un fleuve géant de 100 mètres de large, de 1 mètre de profondeur et de 10 000 km de long.

D'où viennent ces 40 000 km³? Notons que ce volume ne représente même pas un dixième des 486 000 km³ qui s'évaporent chaque année sur toute la planète pour ensuite reprecipiter. Cette évaporation est inégalement répartie : 85 % s'évaporent des océans et 15 % des continents. Quant aux précipitations, 77 % tombent sur les océans et 23 % sur les continents. Il y a une logique à cela, les 8 % d'évaporation excédentaire des océans génèrent les 8 % de pluie excédentaire sur les continents³ et correspondent à cet excédent de 40 000 km³ qui retourne ensuite des continents vers les océans. La boucle est bouclée!

Ces chiffres révèlent un fait intrigant sur lequel nous reviendrons : le total des pluies sur les continents est largement supérieur à 40 000 km³ puisque 23 % du total de 486 000 km³ correspondent à 110 000 km³ annuels.

3. Respectivement 85 % moins 77 % et 23 % moins 15 %.

LES PRÉCIPITATIONS À L'ORIGINE DE L'EAU BLEUE

La simplicité du principe du cycle de l'eau n'a d'égale que la complexité de la manière dont il se produit concrètement ! L'eau circule sans arrêt entre de nombreux milieux à des vitesses très variables. Une molécule d'eau reste dans l'atmosphère après s'être évaporée en moyenne pendant 9,5 jours, dans une rivière ou un fleuve en moyenne pendant 17 jours, dans un lac pendant 30 ans, dans une nappe d'eau souterraine pendant 1 500 ans, dans un glacier pendant plusieurs centaines d'années⁴. Le cycle annuel n'est donc qu'un zoom sur une partie de l'eau douce, l'eau des fleuves ou des nappes souterraines dont la quantité suit grosso modo un rythme annuel et qui assure l'équilibre à long terme entre l'eau des continents et celle des océans. C'est l'eau douce qui, en théorie, peut être pompée, transportée et sur laquelle nous pouvons compter pour une grande partie de nos besoins à l'échelle d'une année. Cette eau douce est nommée l'eau bleue. C'est elle qui assure le retour de l'eau douce vers l'océan à hauteur de 40 000 km³ par an⁵.

Quantifier l'eau bleue, comprendre où et quand on en trouve et où on peut la puiser sont les principaux objectifs des responsables de l'eau. Une première évidence est que

4. Ghislain de Marsily, *L'Eau, un trésor en partage*, Dunod, 2009.

5. Source : Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau. <https://www.unesco.org/fr/wwap>

cette eau est surtout présente là où il pleut. Or les précipitations ne tombent pas uniformément sur la planète, leur répartition dépend du fonctionnement d'ensemble de l'atmosphère qui transporte la vapeur d'eau. Beaucoup d'eau précipite et s'évapore des régions les plus chaudes situées entre l'équateur et les tropiques. C'est là qu'on va retrouver les régions humides où prospèrent les forêts équatoriales. Comme la position de la terre par rapport au soleil oscille au fil des saisons, cette région de pluies équatoriales⁶ migre continûment : il pleut surtout au nord de l'équateur pendant l'été de l'hémisphère nord, et au sud pendant l'hiver de cet hémisphère. Au-delà de ces régions humides, plus au nord ou plus au sud, l'air des régions équatoriales vidé de son eau retombe et génère des régions tropicales plus sèches, voire désertiques comme l'Afrique du Nord, la péninsule arabique, le nord de la Chine ou le nord du Mexique. Plus au nord encore dans l'hémisphère nord (ou plus au sud dans l'autre), on retrouve des zones d'évaporation et de pluies toutefois moins intenses que dans les régions équatoriales. La France se situe dans une de ces régions tempérées où alternent les périodes pluvieuses et plus sèches. Plus au nord ou au sud encore, dans les régions proches des pôles, l'air est à nouveau plus sec et les précipitations peu fréquentes. Les pôles sont des déserts froids.

6. Que l'on nomme la convergence intertropicale.

Cette organisation d'ensemble de la circulation des masses d'air et donc de la vapeur d'eau de la planète, combinée avec une orientation des vents est-ouest dans la région équatoriale et tropicale humide – les fameux alizés – et ouest-est dans les régions tempérées, explique pour une bonne part la forte hétérogénéité des précipitations sur la planète.

DU GLOBAL AU LOCAL

Pour comprendre comment les précipitations se transforment en eau bleue, il faut faire intervenir deux phénomènes : le stockage et l'évaporation.

L'eau qui précipite ne rejoint pas immédiatement un ruisseau ou une nappe souterraine. Lorsqu'elle est gelée et qu'il fait froid, elle peut rester sous forme de neige ou de glace. Lorsqu'elle est liquide, elle peut être retenue ou s'infiltrer dans le sol ou la glace. Si toutefois la perméabilité du sol est insuffisante, elle peut ruisseler à la surface du sol et rejoindre un cours d'eau. Elle ne devient toutefois vraiment de l'eau bleue que si aucun obstacle ne l'arrête. Une haie, un chemin, des végétaux peuvent se dresser sur sa route et contribuer pour partie ou entièrement à son infiltration. Lorsqu'elle s'infiltré, elle peut être retenue par le sol ou le sous-sol, puis, lorsque ces derniers sont assez gorgés d'eau, rejoindre une nappe souterraine. De plus, tant qu'elle n'est pas suffisamment profonde, une partie peut s'évaporer soit directement, soit après avoir été absorbée par une racine et conduite vers les feuilles

d'un végétal. Toute l'eau qui se stocke dans les sols et reste disponible pour l'évaporation constitue ce qu'on appelle l'eau verte.

Ce parcours du combattant de l'eau de pluie ou de neige fait de stockage, d'infiltration, de ruissellement et d'évaporation se produit en chaque endroit de nos paysages et leur combinaison génère à la fois nos eaux bleues de surface ou souterraines ou de l'eau verte. Il est placé sous le contrôle de l'état des sols. Trop secs, trop humides ou gelés et l'infiltration est lente, voire impossible. Couverts de végétaux, ils retiennent davantage d'eau, ce qui facilite l'infiltration et rend cette eau disponible à l'évaporation. Très lisses ou très rugueux, ils vont faciliter ou au contraire stopper le ruissellement. À cela s'ajoute le fait que, suivant la taille des particules qui les constituent, moins de 2 millièmes de millimètre pour les argiles, plus de 2 millimètres pour les sables, les sols ont des capacités d'infiltration variables, faibles pour les argiles, fortes pour les sables.

Au long de ce parcours, l'eau bleue s'enrichit de différentes substances minérales ou organiques qui racontent son histoire. Il y a celles que l'on retrouve classiquement dans nos eaux minérales (calcium, potassium, carbonates, nitrates...), peut-être quelques pesticides, notamment si l'eau a ruisselé à la surface de sols agricoles, mais aussi du carbone organique lié aux bactéries ou à des végétaux morts.

LE PETIT CYCLE DE L'EAU

Au quotidien, le grand cycle de l'eau importe surtout aux utilisateurs d'eau « brute », peu ou non traitée, comme les agriculteurs ou les producteurs d'énergie. Pour la plupart de ses utilisateurs, l'eau se résume à l'utilisation d'eau rendue potable après avoir été pompée dans une nappe souterraine ou une rivière. Ce n'est qu'épisodiquement que le grand cycle se rappelle à nous, comme ce fut le cas lors de l'été 2022 lorsque de nombreuses communes virent leur approvisionnement en eau fondre comme neige au soleil. Bien sûr, les conditions particulièrement sèches en étaient la première cause, mais de nombreuses années de relative abondance hydrique avaient souvent laissé les fuites, piscines et terrains engazonnés se multiplier. La prise de conscience fut douloureuse, mais sans doute salutaire vu la vitesse du dérèglement climatique.

Notre eau quotidienne est le produit de ce que les professionnels de l'eau nomment « le petit cycle de l'eau ». Ce dernier démarre avec le pompage ou le captage, continue avec la potabilisation puis la distribution. Après utilisation, l'eau est principalement dégradée en qualité ou « usée » et, pour une petite part, évaporée, notamment quand elle a servi à arroser gazons et plantes. Dans les pays industrialisés, l'eau usée est souvent collectée et acheminée vers des stations d'épuration avant de retourner vers les cours d'eau. Cela n'est pas le cas des pays en développement où la part des eaux usées traitées est faible, souvent moins de 20 %.

Rien de réellement cyclique dans tout cela, si ce n'est que l'eau traitée rejetée dans les cours d'eau va pouvoir être prélevée à nouveau plus à l'aval pour une nouvelle séquence d'utilisation et de traitements. Une même quantité d'eau va donc être recyclée plusieurs fois le long de son trajet vers la mer. La notion de ressource en eau est donc, d'une certaine manière, élastique puisque, tant qu'elle ne s'évapore pas, l'eau peut être réutilisée.

Le cycle de l'eau est généralement représenté de manière simplifiée en se limitant à des échanges entre continents et océans. Il masque la complexité des échanges et du stockage d'eau sous forme gazeuse, liquide et solide qui se produit sur l'ensemble de la planète. À l'échelle plus locale, ce cycle se focalise sur l'eau de nos rivières, lacs et nappes souterraines, celle qu'on peut pomper, stocker et utiliser via des réseaux de tuyaux ou de canaux, qu'on appelle l'eau bleue. La vision annuelle de ce cycle n'est qu'un zoom sur des phénomènes se produisant en réalité à des échelles de temps variables, de quelques jours à plusieurs siècles, facilités par le retour « cyclique » des saisons sur la planète.

II. ÉLARGIR NOTRE PERCEPTION : L'EAU BLEUE ET L'EAU VERTE

Revenons sur ce fait intrigant : si le « bouclage » du cycle entre continents et océans engage environ 40 000 km³ d'eau chaque année, les précipitations totales sur les continents s'élèvent à 110 000 km³. D'où vient et que devient donc la différence de 70 000 km³ de pluie ?

L'AMPLIFICATION DU CYCLE DE L'EAU PAR LE RECYCLAGE CONTINENTAL

S'il pleut davantage sur les continents, on n'y stocke pas pour autant de l'eau en permanence. L'eau douce y est recyclée, évaporée puis reprécipitée. À proximité de l'océan, lorsqu'on est sous les vents dominants, la pluie provient essentiellement de l'évaporation de l'eau de l'océan. Elle est d'ailleurs relativement riche en sodium et autres éléments présents dans l'eau de mer. Une partie de cette pluie se transforme en eau bleue, mais une autre partie, infiltrée dans les sols, est évaporée à nouveau, en grande partie par les plantes, pour rejoindre les nuages et reprécipiter plus loin, souvent à plusieurs centaines de kilomètres. C'est ce « recyclage » continental qui augmente les quantités de précipitations sur les continents.

Plus on réévapore puis reprécipite l'eau sur les continents, plus on y augmente la pluie. Plus on s'éloigne de l'océan, plus la part de la pluie qui en provient diminue et plus la pluie provient d'eau réévaporée et recyclée. Sous nos latitudes, plus de 90 % de la pluie vient de l'océan en France, autour de 70 % en Allemagne, moins de 50 % dans l'ouest de la Russie¹.

La vision classique du cycle de l'eau est donc tronquée. Il faudrait en toute rigueur représenter une série de cycles successifs comprenant évaporation d'eau en provenance des sols et des masses d'eau libre, transport par les nuages, précipitations, génération d'eau bleue et d'eau verte, cycles se déplaçant et se multipliant dans la direction des vents dominants. L'eau qui précipite ne provient pas que de l'océan, mais pour une part importante de l'eau verte évaporée précédemment qui est ainsi recyclée. Le recyclage continental amplifie les quantités de précipitations des continents.

Dans la zone équatoriale et tropicale humide, ce même phénomène est observé, mais comme les alizés soufflent d'est en ouest, le recyclage continental de l'eau suit cette direction. C'est en Afrique de l'Est que la majeure partie de l'eau de pluie provient de l'océan et en Afrique de l'Ouest qu'elle résulte de la réévaporation de l'eau des pays situés

1. Nous nous référons ici au travail pionnier de Van der Ent *et al.*, "Origin and fate of atmospheric moisture over continents", *Water Resources Research*, vol. 46, 2010.

plus à l'est. En Amérique latine, la situation est proche, mais l'eau océanique provient surtout du nord-est, des Caraïbes, et se recycle en direction du sud-ouest. Plus au sud, au-delà de l'équateur, on retrouve une dominance des vents d'ouest et un recyclage de l'eau douce d'ouest en est.

Nous avons mentionné au chapitre précédent l'importance des vents dominants dans la distribution de l'eau sur la planète. Nous comprenons maintenant mieux pourquoi. Sans le recyclage de l'eau de pluie, il pleuvrait beaucoup moins sur nos continents. L'amplification annuelle du cycle de l'eau grâce au recyclage continental a été quantifiée grâce à des outils de simulation informatique². Cette amplification est en gros égale au rapport entre l'eau verte et l'eau bleue, soit un facteur de 1,7 environ. Ce rapport varie selon les continents : l'Asie et l'Afrique bénéficient le plus de ce recyclage avec un facteur supérieur à 1,9. L'Océanie, l'Amérique du Nord et l'Europe sont les moins bien pourvus avec des facteurs respectivement de 1,25, 1,45 et 1,53³.

Quels sont les facteurs influençant ce recyclage continental? Deux au moins ont été identifiés. Tout d'abord le relief puisqu'en entraînant la vapeur d'eau en altitude,

2. D'après Van der Ent *et al.*, *op cit.* On trouvera également des explications dans un article de Johan Rockström *et al.*, "Why we need a new economics of water as common good", *Nature*, n° 615, 2023. <https://doi.org/10.1038/d41586-023-00800-z>

3. Voir davantage d'explications dans *L'Empreinte eau*, *op. cit.*

il favorise sa condensation et donc les précipitations. Dans l'Himalaya par exemple se trouve une véritable pompe à eau : l'eau qui s'y évapore y reprécipite avant d'avoir pu migrer vers l'est. Plus de 80 % de l'eau de pluie y résulte d'un recyclage pour une bonne part local ! En Afrique de l'Ouest également, les zones montagneuses bénéficient de taux de recyclage supérieurs à 70 % et pour partie locaux.

Le second facteur est la végétation, et tout particulièrement les forêts qui évaporent de l'eau tout au long de l'année. On observe ce phénomène surprenant : dans les grandes régions boisées, le recyclage local de l'eau de pluie est plus élevé qu'ailleurs et peut atteindre 32 %⁴. De tels taux s'observent en Amazonie et dans une moindre mesure dans la forêt congolaise. Si l'évaporation des arbres est aussi capitale, c'est qu'elle entraîne avec elle des composés organiques volatils, des bactéries ou certains sels qui activent la condensation de la vapeur d'eau en altitude⁵. Cette condensation provoque la pluie, mais elle réchauffe aussi l'atmosphère⁶ et crée des courants

4. Voir les travaux de Markus Berger *et al.*, "Water Accounting and Vulnerability Evaluation (WAVE): Considering Atmospheric Evaporation Recycling and the Risk of Freshwater Depletion in Water Footprinting", *Environmental Science and Technology*, 24 mars 2014. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es404994t>. Le coefficient de recyclage local dépend de la taille du bassin-versant ou du pays. Il est la plupart du temps compris entre 1 et 10 %.

5. Une belle synthèse des différents rôles des forêts sur le cycle de l'eau a été publiée par David Ellison *et al.*, dans "Trees, forests and water : Cool insights for a hot world", *Global Environmental Change*, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>

6. À l'inverse de l'évaporation qui demande de l'énergie et la refroidit.

ascendants qui entraînent un appel d'air. C'est pourquoi le recyclage continental ne suit pas exactement la direction est-ouest dans la partie tropicale de l'Amérique du Sud, contrairement à l'Afrique : le poumon vert de l'Amazonie est suffisamment puissant pour organiser autour de lui la circulation atmosphérique et attirer l'eau de l'océan Atlantique en provenance du nord-est.

L'évaporation des zones végétalisées est généralement nommée évapotranspiration, pour bien indiquer que le phénomène comprend aussi bien l'évaporation d'eau en provenance du sol que celle interceptée par les plantes lors des pluies et la « transpiration » par les végétaux. L'utilité de ce terme a été discutée, car la transpiration n'est qu'une forme d'évaporation. Pour simplifier, nous ne garderons que le terme d'évaporation par la suite, en nous rappelant que, dans un sol couvert de plantes, c'est par les feuilles que s'opère la quasi-totalité de l'évaporation de l'eau.

COMPLÉMENTARITÉ ET RÔLES DES DEUX TYPES D'EAU

Nous comprenons maintenant ce que représentent ces 70 000 km³ d'eau de pluie « supplémentaires » sur les continents. Ils sont le produit de ces multiples séquences d'infiltration, d'évaporation et de précipitation qui y redistribuent l'eau. Ils correspondent à la totalité de l'eau verte impliquée dans ces séquences au cours d'une année.

Même si la redistribution continentale est complexe, on peut retenir que les 110 000 km³ d'eau de pluie annuels génèrent 70 000 km³ d'eau verte et 40 000 km³ d'eau bleue appelée souvent eau « utile », car c'est elle qui préoccupe au premier chef les gestionnaires de l'eau. L'eau verte est-elle pour autant inutile ? Nous allons, tout au long de ce livre, nous employer à lui redonner ses lettres de noblesse.

Les deux types d'eau, bleue et verte, ont des rôles importants et complémentaires. L'eau bleue joue un rôle socio-économique évident puisqu'elle suscite le développement de nombreuses infrastructures, barrages, centrales hydroélectriques, réseaux d'adduction, stations de traitement et de refroidissement et bien d'autres encore. Il n'est pas étonnant que cette eau ait mobilisé l'essentiel de l'attention des humains depuis longtemps !

Le rôle environnemental de l'eau bleue n'est pas à négliger pour autant. Elle entretient une multitude d'écosystèmes aquatiques qui, par leurs rôles régulateurs des cycles de nombreux éléments chimiques, font de l'eau un agent épurateur des pollutions anthropiques. Elle constitue aussi un élément clé du fonctionnement des deltas et des zones côtières qu'elle alimente en alluvions et en substances nutritives. Lorsque les quantités d'eau diminuent à l'aval des grands fleuves, tous les écosystèmes côtiers déclinent, les productions piscicoles et aquacoles sont menacées. Lorsque les alluvions apportées régressent, c'est la stabilité du trait de côte des deltas, qui résulte d'un équilibre subtil entre les apports de sédiments et leur érosion, qui est menacée.

Ces fonctions ont leur revers de médaille. L'eau bleue peut véhiculer des substances polluantes ou des nutriments en excès et contribuer aux marées vertes ou aux zones mortes anoxiques à l'embouchure des fleuves sur lesquelles nous reviendrons.

L'attention portée à l'eau verte⁷ est récente. C'est une agrohydrologue suédoise, Malin Falkenmark, qui, la première, dans les années 1990, alerta la communauté internationale sur l'importance de l'eau verte⁸. Elle a été suivie par de nombreux chercheurs qui ont progressivement clarifié le concept. Pourtant, le concept d'eau verte reste peu popularisé comme on peut le constater en effectuant une recherche sur Internet. Alors que cette eau verte joue un rôle socio-économique critique puisqu'elle est essentielle à la production agricole ou forestière. Sans elle, il n'y aurait pas de sécurité alimentaire, sans elle les écosystèmes clés de la planète seraient en péril et le recyclage continental de l'eau serait bien moindre. Mais on pourrait aussi imaginer une planète plus riche en forêts et savanes générant davantage de précipitations et de recyclage et donc d'eau verte. Nous verrons d'ailleurs que la régénération d'écosystèmes permet d'entrevoir un tel scénario. Notons aussi le lien entre l'eau verte et la santé des sols : l'eau verte maintient en bon état de fonctionnement les plantes et

7. Il existe aussi un autre concept d'eau verte, se référant à une eau contenant des algues ou des microalgues donnant effectivement à l'eau une couleur verte.

8. Malin Falkenmark, "Land-water linkages. A synopsis" dans "Land and Water integration and river basin management", *FAO Land and Water Bulletin*, n° 1, p. 15-16, 1995.

leur biodiversité. Grâce à leurs racines, les plantes enrichissent le sol en humus, ce qui en retour permet au sol de retenir davantage d'eau verte et donc rend les agroécosystèmes plus résistants en saison sèche. L'eau verte joue donc un rôle clé dans la maintenance des puits de carbone continentaux qui absorbent un quart de nos émissions de gaz à effet de serre chaque année.

LES LIMITES PLANÉTAIRES

L'eau joue un rôle essentiel dans la stabilité du fonctionnement de notre planète, rôle qui est sous le feu des projecteurs depuis qu'un groupe de chercheurs du Stockholm Resilience Centre a introduit le concept de « limites planétaires » dans un article de 2009 qui a ouvert un nouveau champ de recherches⁹.

À l'origine, une observation des climatologues : nous vivons une période unique dans l'histoire de notre planète. Depuis 12 000 ans, nous sommes sortis de la dernière glaciation et entrés dans une période plus douce, l'holocène. La température et le climat se sont stabilisés de manière remarquable. Si l'on zoome sur cette période, on note quelques variations lentes, une légère augmentation au début, une baisse légère dans les 5 000 dernières années, mais des variations de la température moyenne planétaire inférieures à un demi-degré, tout au moins jusqu'au XIX^e siècle. Depuis lors l'augmentation est brutale.

9. L'article fondateur est celui de Johan Rockström *et al.*, "A safe operating space for humanity", publié dans la revue *Nature* en 2009 (vol. 461).

Si l'on examine la même courbe sur le dernier million d'années, rien de tel. La température moyenne terrestre fluctue beaucoup plus, de 5 à 6 °C, en quelques décennies parfois, au rythme des glaciations et réchauffements accompagnés du développement ou de la fonte de quantités de glace colossales provoquant des variations du niveau de la mer d'une centaine de mètres ! La stabilité du climat de l'holocène est intrigante ! Se pourrait-il qu'elle ait contribué au succès remarquable de notre espèce ? Grâce à elle en effet, les hommes ont pu coloniser de nombreux milieux en s'adaptant progressivement. Sans toutes les techniques disponibles aujourd'hui, il fallait du temps pour sélectionner des plantes à cultiver, pour apprendre à reconnaître et à mobiliser de nouvelles ressources. Ce temps et cette stabilité ont été à notre disposition et ont permis de nous sédentariser, de développer des villes et des infrastructures, d'apprendre à gérer les risques variés auxquels nous sommes confrontés. Même dans ce contexte, cela n'a pas été facile, l'histoire nous le révèle. La variabilité du climat a en effet été suffisante pour rendre difficiles les premières domestications et les premières mises en culture¹⁰.

10. Jean-François Berger, « Les changements climato-environnementaux de l'Holocène ancien et la néolithisation du bassin méditerranéen », *La Révolution néolithique dans le monde*, J.-P. Demoule (dir.) CNRS éditions, 2010. <https://books.openedition.org/editions-cnrs/15662?lang=en>

Tous les mystères de la stabilité de l'holocène ne sont pas encore percés, mais une chose est sûre, il n'y a pas eu auparavant de période aussi stable et favorable aux humains sur notre planète. De plus, même pendant les deux millions d'années ayant précédé l'holocène, la température de la planète ne s'est élevée de plus de 0,5 °C au-dessus de la moyenne de la période préindustrielle que pendant quelques périodes extrêmement fugaces. En augmentant la température moyenne de la planète de plus de 1 °C, nous sortons déjà des conditions de l'holocène et des deux millions d'années précédentes.

Le concept de limite planétaire doit être bien compris : il ne signifie pas que la planète franchisse un seuil qui risque de détruire la biosphère. Elle en a vu d'autres ! Il signifie qu'en franchissant certains seuils, nous risquons de sortir de la zone de confort de l'holocène qui a permis à l'humanité de prospérer. En sortant de ces conditions, la planète pourrait basculer dans un autre mode de fonctionnement comme cela s'observe dans de nombreux écosystèmes¹¹. Vu la complexité de notre planète, il est probable qu'il faille modifier plusieurs mécanismes de son horlogerie pour provoquer cette déstabilisation. Aussi les limites planétaires constituent-elles un ensemble de mécanismes

11. Le travail du Stockholm Resilience Centre s'attache à documenter depuis plusieurs décennies la manière dont les écosystèmes et certains systèmes humains basculent de manière abrupte d'un mode de fonctionnement à un autre. Un exemple souvent mentionné est celui de la transformation d'une forêt tropicale en savane.

et de conditions interdépendantes qui soit jouent un rôle, soit sont des témoins clés de la stabilité du fonctionnement de l'holocène.

Quels sont ces mécanismes garants de la stabilité planétaire? Tous ne sont pas forcément connus à ce jour, mais le Stockholm Resilience Centre en a proposé neuf : le climat, la biosphère, la mobilisation des terres pour les usages humains, les cycles de l'azote et du phosphore, l'eau douce, la couche d'ozone, les aérosols, l'acidification des océans et la pollution chimique (voir Annexe 1). Pour chacun d'eux, une zone de confort, une zone à risque et une zone de fort risque de déstabilisation ont été proposées qui sont constamment discutées et affinées par de nombreux travaux de recherche¹². Nous allons voir que l'eau, verte et bleue, joue un rôle essentiel dans ces limites planétaires.

Le cycle de l'eau tel que représenté classiquement n'est qu'une version tronquée de la réalité. La circulation de l'eau ne se produit pas uniquement au sein d'un bassin-versant allant de la mer, où elle s'évapore, aux montagnes où elle précipite avant de retourner vers l'océan via

12. Voir la synthèse publiée en septembre 2023 : Katherine Richardson *et al.*, "Earth beyond six of nine planetary boundaries", *Science Advances*, vol. 9, n° 37. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adh2458>

les cours d'eau et les nappes souterraines. Elle implique toute une série d'autres bassins-versants dans lesquels l'eau évaporée se recycle successivement en générant de nouvelles précipitations, de l'eau bleue et de l'eau verte et ainsi de suite. Ce recyclage continental de l'eau douce est essentiel au bon fonctionnement de la biosphère continentale qui en est aussi un acteur majeur. Il agit en démultipliant les quantités d'eau douce disponibles pour les écosystèmes et en redistribuant l'eau verte et bleue sur les continents. Il est essentiel à la stabilité du fonctionnement de la planète telle qu'observée depuis la fin de la dernière glaciation qu'il faut préserver à tout prix. À travers lui, la distinction entre eau bleue, dite « utile » et eau verte, implicitement « inutile », est à revoir.

III. LES USAGES DE L'EAU ET LEURS IMPACTS

Pour comprendre les tensions actuelles sur l'eau douce, il ne suffit pas de connaître les quantités d'eaux bleues et vertes disponibles, il faut aussi savoir combien d'eau nous utilisons et quels sont les besoins à satisfaire. Mais que signifie exactement utiliser l'eau ? Quels sont les besoins pour quels utilisateurs ?

QUE SIGNIFIE UTILISER L'EAU ?

Il y a de nombreuses manières d'utiliser l'eau – boire, nettoyer, arroser, irriguer, produire de l'énergie – et chacune d'elles a sa propre logique. Nous, les animaux de type mammifère, buvons parce que l'eau, qui représente environ 70 % de notre corps, est essentielle pour véhiculer en permanence les substances nutritives, les produits de la digestion, les hormones et de nombreuses autres substances que nous produisons. Nous absorbons l'eau soit sous forme liquide, soit, pour une part souvent importante, à travers nos aliments. Nous en rejetons pour ne pas l'accumuler, soit par nos excréments liquides et solides, soit sous forme de vapeur d'eau par notre transpiration et notre respiration.

Pour nos cousines les plantes c'est différent. Elles absorbent de l'eau essentiellement par leurs racines qui exercent une succion osmotique pour pomper l'eau verte à leur disposition dans le sol. Les racines sont de véritables exploratrices. Elles travaillent souvent en étroite collaboration avec des champignons ou des bactéries. Elles sont capables d'aller chercher de l'eau à grande profondeur dans le sol et le sous-sol. Comme nous, les plantes ont besoin d'eau pour véhiculer les substances nutritives ou celles synthétisées par la machinerie cellulaire. Mais ces fonctions ne requièrent que de petites quantités d'eau. Par où cette eau est-elle rejetée? Par les feuilles, par de petits opercules nommés « stomates » situés dans autant de petites cavités présentes généralement sur leurs faces inférieures et par lesquelles l'eau s'évapore. Les stomates sont munis de deux cellules en forme de haricot accouplées qui ont une propriété intéressante : elles sont une sorte de baromètre de la pression de l'eau dans la plante. Si ces cellules sont gorgées d'eau, la pression est importante et leur interface ménage un orifice grand ouvert sur la cavité stomatique. Que l'eau vienne à manquer et ces cellules se ramollissent, fermant de ce fait l'orifice laissant passer l'eau. Une plante flétrit lorsqu'elle manque d'eau et ce flétrissement réduit les pertes d'eau. Formidable régulation qui s'accompagne d'un autre processus fondamental. C'est aussi par les stomates que les plantes absorbent le gaz carbonique de l'air qu'elles vont combiner à l'eau pour le transformer en sucres puis en substances nutritives. Il leur faut donc deux types de canaux : un premier pour remonter l'eau et l'amener aux stomates où elle va

s'évaporer, un second pour redistribuer les éléments nutritifs produits par la photosynthèse. Les stomates sont donc le lieu de convergence des cycles de l'eau et du carbone de la planète. Comme nous le verrons plus loin, les quantités d'eau évaporées par les plantes sont bien plus grandes que les quantités d'eau que les hommes ou les animaux rejettent.

Il existe d'autres manières d'utiliser l'eau. Les usages sanitaires et de nettoyage sont fréquents dans nos habitations comme dans l'industrie. Ils utilisent la capacité de l'eau à dissoudre et à servir de véhicule à des produits indésirables¹. Ces usages se sont beaucoup développés dans la seconde partie du XIX^e siècle sous l'impulsion du courant hygiéniste, lorsqu'on a compris le rôle des microbes dans les maladies infectieuses. Ils ont permis d'améliorer la santé publique considérablement. Le cas de la ville de Marseille, ouverte sur le monde, et donc particulièrement exposée par son port et les nombreux voyageurs de passage, est particulièrement éclairant². De nombreuses épidémies de choléra et d'autres maladies infectieuses ont émaillé la vie locale au cours du XIX^e siècle. Lors des premières épidémies étudiées, dans les années 1830,

1. Cette fonction de dissolvant de l'eau provient des propriétés électriques de l'eau dues à l'attraction plus grande exercée par l'atome d'oxygène sur les électrons que celle des atomes d'hydrogène.

2. Lire à ce sujet : Bertrand Mafart, Marc Morillon, « Les épidémies à Marseille au XIX^e siècle », *Bulletins et Mémoires de la société d'anthropologie de Paris*, t. 10, 1998. https://www.persee.fr/doc/bmsap_0037-8984_1998_num_10_1_2504

la contagiosité de ces maladies n'était pas bien établie et les traitements encore inconnus. La mortalité était considérable. Près de 50 % des personnes infectées moururent lors de la première épidémie de choléra de cette période. Ce taux resta élevé jusqu'à la fin du siècle, décroissant quand même avec l'amélioration des soins jusqu'à 8 %. À cette époque, l'eau potable était souvent prélevée dans des puits et le réseau d'assainissement n'était pas encore en place. Les eaux usées étaient souvent rejetées dans des puisards, voire dans la rue elle-même. Ce n'est que dans les années 1880 que le mouvement hygiéniste finit par convaincre des bienfaits de l'assainissement et d'une eau potable collectée en dehors des zones habitées, et traitée. Mais il fallut encore attendre 1896 pour voir un grand collecteur d'égouts être installé à Marseille et les habitations progressivement équipées du tout-à-l'égout. Au début du ^{xx}e siècle, les épidémies se firent rares grâce à la combinaison de l'hygiène et à l'apparition des vaccins.

Dans le domaine de l'énergie, on utilise d'autres propriétés de l'eau. Sa molécule possède par exemple une forte capacité de stockage de chaleur, à l'état liquide deux fois plus importante que celle du bois, de l'huile ou de l'éthanol, à l'état gazeux, deux fois plus grande que celle de l'air ou de l'oxygène. Sa grande disponibilité en fait donc un matériau idéal pour véhiculer la chaleur, d'où son utilisation dans le chauffage ou dans le refroidissement des centrales thermiques. Dans ces utilisations, l'eau liquide n'est pas « perdue », mais recyclée ou rejetée plus chaude que lors de son prélèvement.

Une autre propriété intéressante de l'eau pour l'énergie est son poids qui permet de produire de l'énergie grâce à la force de gravité, mais rend son transport sur de grandes distances onéreux. L'énergie de l'eau a longtemps été utilisée directement pour faire tourner des moulins qu'on retrouve encore aujourd'hui en grand nombre sur les cours d'eau français. Il en resterait près de 20 000 sur les 100 000 ayant existé à leur apogée, au milieu du XIX^e siècle³. Après la découverte de l'électricité, de nombreux moulins ont été convertis pour en produire. L'intérêt pour cette énergie s'est fortement accru au XX^e siècle, suscitant la construction de nombreux barrages. Elle représente aujourd'hui près de 16 % de l'électricité mondiale (12 % de l'électricité française) et plus de la moitié de l'énergie renouvelable⁴ produite chaque année dans le monde⁵. Ces scores remarquables tiennent au nombre impressionnant de grands barrages⁶ érigés dans le monde : plus de 50 000 dont 10 000 voués exclusivement à l'hydroélectricité.

3. Hydraulois, « 18 769 moulins en France ? Un inventaire imprécis et un chiffre minimisé », 09 avril 2017. <http://www.hydraulois.org/2017/04/18-769-moulins-en-france-un-inventaire.html>

4. « Énergie hydroélectrique », Wikipédia, l'encyclopédie libre. https://fr.wikipedia.org/wiki/Énergie_hydroélectrique

5. International Hydropower Association, "Facts about hydropower". <https://www.hydropower.org/iha/discover-facts-about-hydropower>

6. D'après la Commission internationale des grands barrages, on nomme « grand barrage » un ouvrage de plus de 15 mètres de haut ou de 5 à 15 mètres de haut et permettant le stockage de plus de 3 millions de m³ d'eau.

DES IMPACTS TRÈS VARIABLES

Comme les usages utilisent des propriétés diverses de l'eau, leurs impacts sur sa quantité et sur sa qualité sont variables.

D'un point de vue quantitatif, ce sont les plantes qui mènent la course. Non seulement elles utilisent beaucoup d'eau, mais elles l'évaporent. Les autres usages n'ont qu'un faible impact quantitatif puisqu'ils n'évaporent pas l'eau ou très peu, mais la rejettent après usage. Qui plus est ils font de plus en plus appel au recyclage, ce qui leur permet de ne pas prélever beaucoup. Ainsi, pour éviter les pénuries, de nombreuses centrales thermiques ont été équipées de systèmes de recirculation qui réduisent fortement leur gourmandise en eau. En revanche, tous ces usages ont un impact qualitatif important : l'eau est rejetée dans un état dégradé. Nos usages domestiques sont parmi les plus polluants, car nos excréments contiennent une grande quantité de matière organique ainsi que des substances médicamenteuses qui perturbent fortement les écosystèmes aquatiques. Les stations d'épuration sont encore loin de pouvoir filtrer toutes les substances nocives. Tous les usages sanitaires et industriels enrichissent l'eau de produits également potentiellement polluants. Les usages liés à l'énergie sont particuliers : le refroidissement des centrales thermiques réchauffe l'eau. Les centrales hydroélectriques modifient le régime des cours d'eau et réduisent fortement les quantités de sédiments transportés. Dans chaque cas, les écosystèmes aquatiques sont impactés, souvent sur de longues distances.

Les impacts sur les sédiments se propagent sur la totalité du fleuve à l'aval. Ainsi de nombreux deltas sont en voie de régression, car leurs dépôts ne sont pas suffisants pour contenir les assauts des mers ou des océans dont le niveau s'élève avec le dérèglement climatique. Sans ces sédiments, les productions piscicoles et aquacoles des zones côtières périssent. Et puis des tonnes de particules s'accumulent dans les barrages, diminuant leurs capacités de stockage et, dans une moindre mesure, leur productivité. La Commission internationale des grands barrages estime qu'entre 0,3 et 0,5 % de leur volume total de stockage est perdu chaque année dans le monde⁷.

Retenons à ce stade qu'il y a deux grandes catégories d'usages, ceux qui comme l'agriculture, évaporent le plus possible d'eau, et ceux qui, au contraire, cherchent à minimiser les pertes tant liquides qu'à l'état de vapeur, mais qui dégradent soit la qualité de l'eau relâchée dans les milieux, soit le bon fonctionnement de ces milieux. Additionner deux types d'usages dont les finalités divergent fortement n'a pas grand sens.

COMPTER L'EAU : UNE ENTREPRISE DIFFICILE

Quand les ressources en eau sont mises sous tension par les activités humaines et le changement climatique,

7. Hydrocoop, « Influence de la sédimentation sur les projets de barrage », *Bulletin CIGB*, n° 144. <http://fr.hydrocoop.org/sedimentation-barrages/>

il est essentiel de savoir quelles quantités d'eau nous utilisons, de quelle manière et où. Pour cette comptabilité, on peut s'intéresser aux prélèvements d'eau bleue et additionner les entrées et les sorties d'eau, mais il n'est pas sûr que ce soit utile, car une eau pompée puis relâchée dans un fleuve va pouvoir être recyclée ou réutilisée plus à l'aval. Si cela se produit plusieurs fois successivement, la somme des pompages risque d'être importante et difficile à comparer à la totalité de l'eau qui s'écoule dans la rivière. Combien de fois utilise-t-on et réutilise-t-on l'eau le long d'un fleuve ? On dit souvent que le long de son trajet, l'eau du Nil est utilisée six fois !

Ainsi, inclure dans le comptage à la fois des pompages d'eau d'irrigation agricole et des pompages pour d'autres usages n'a pas grand sens puisque, dans un cas, l'eau va en grande partie s'évaporer, dans l'autre, elle va rejoindre à nouveau un cours d'eau. Pour résoudre cette difficulté, il a été décidé de distinguer les deux manières d'utiliser l'eau pour comptabiliser ses usages : d'un côté au travers des prélèvements réalisés – le plus souvent par pompage –, de l'autre en comptabilisant l'eau évaporée par ces usages ou éventuellement incorporée dans les produits. On parle dans ce cas de « consommation ». Ces deux types d'utilisation doivent être distingués uniquement dans le cas de l'eau bleue, puisque l'eau verte ne peut être que consommée. Pour un usage donné, la différence entre prélèvement et consommation quantifie l'eau qui retourne vers les fleuves ou les nappes souterraines, après avoir été éventuellement épurée. Cette différence est relativement

faible dans le cas de l'eau agricole, mais importante dans les autres usages.

L'EAU BLEUE QUE L'ON PRÉLÈVE

Les données relatives aux usages de l'eau sont celles des Nations unies publiées par le Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau⁸ sous l'égide de l'Unesco (voir Annexe 2). Elles présentent et quantifient ces usages en les classant en trois grandes catégories, l'eau agricole, l'eau des villes, l'eau industrielle. Elles ne concernent que l'eau bleue.

Du fait du triplement de la population mondiale au xx^e siècle, l'utilisation de l'eau a évolué fortement. En 1900, l'humanité prélevait environ 600 km³ d'eau dans les fleuves et les rivières, soit un peu plus de 1 % des 40 000 km³ d'eau bleue. L'accélération des prélèvements est d'abord progressive, puis s'accroît après la Seconde Guerre mondiale. On prélevait déjà plus de 3 000 km³ à la fin des années 1970. Le rythme d'augmentation a légèrement décliné depuis, mais on a encore ajouté plus d'un milliard de kilomètres cubes pour atteindre 4 000 à 5 000 km³ autour de l'année 2015. L'imprécision de ce dernier chiffre provient de l'hétérogénéité de la comptabilité des prélèvements effectués pour l'énergie, de nombreux pays

8. Voir la page de présentation du programme sur <https://www.unesco.org/fr/wwap>

n'incluant pas l'eau de refroidissement de leurs centrales thermiques dans leurs données.

En un siècle, notre pression sur les ressources en eau bleue a donc été multipliée par 6 à 8 tandis que la population n'était multipliée que par 3. Notre gourmandise en eau s'explique pour moitié par la croissance démographique, mais pour l'autre moitié par un changement important de nos modes de vie, plus urbains, plus dépendants aussi de la consommation de viande et de nos modes de production et de consommation.

Sur les trois catégories d'utilisations, c'est l'agriculture qui domine. À elle seule, elle est responsable de 2 600 à 2 800 km³ ⁹ d'eau prélevée chaque année pour l'irrigation. C'est l'agriculture qui donne à la courbe d'évolution sa tendance générale. Et plus particulièrement le développement de l'irrigation dans le monde de l'après-guerre. C'est aussi le ralentissement de l'expansion de l'irrigation depuis les années 2000 qui a infléchi la croissance des prélèvements. D'après la FAO (Food and Agriculture Organization)¹⁰, ce n'est pas tant l'eau qui manque que les terres pouvant être encore équipées qui limitent son

9. Les chiffres les plus à jour des Nations unies datent de 2012, d'où l'utilisation d'une fourchette puisque les extrapolations sont hasardeuses.

10. FAO, « L'état des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde. Des systèmes au bord de la rupture. Rapport de synthèse 2021 », 2021. <https://www.fao.org/3/cb7654fr/online/cb7654fr.html>

expansion. Seules l'Amérique latine et l'Afrique ont encore des terres à équiper, mais la première est bien pourvue en eau et la seconde n'a pas pu jusqu'ici mobiliser les ressources financières nécessaires au développement des infrastructures.

Le second domaine d'utilisation est celui de l'industrie, responsable de 800 à 900 km³ de prélèvements chaque année¹¹. Ce total est à prendre avec beaucoup de précautions vu l'imprécision sur l'eau de l'énergie mentionnée ci-dessus. En revanche, dans tous les cas, il ne prend pas en compte l'hydroélectricité. Les prélèvements totaux incluant l'énergie (mais non l'hydroélectricité) sont plutôt de l'ordre de 1 800 km³¹². Ils ont eux aussi fortement augmenté au xx^e siècle, à un rythme plus rapide encore que ceux de l'irrigation. Ils ont ensuite ralenti à l'entrée du xxi^e siècle, beaucoup d'industries mettant en place des techniques de recyclage de l'eau.

Le troisième domaine est celui de l'eau potable et des usages urbains. Il comprend une grande variété d'utilisations, sanitaires, de consommation, mais aussi d'arrosage des parcs et pelouses. Il est responsable de 400 à 500 km³ de prélèvements annuels qui ont eux aussi crû rapidement

11. Dans ce domaine, et particulièrement pour l'énergie, la distinction entre prélèvements et consommations n'est pas toujours faite, on utilise souvent indifféremment les deux termes, ce qui ne facilite pas la lecture des données.

12. Pour plus de détail, voir discussion dans *L'Empreinte eau*, op. cit. p. 74-84.

et continuent à le faire puisque l'adduction d'eau potable est encore loin d'être terminée dans de nombreux pays en développement. Selon les Nations unies, 30 % de la population mondiale n'a toujours pas accès à une eau saine à proximité de son lieu d'habitation en 2023¹³.

On peut légitimement se demander si nos prélèvements d'eau bleue n'excèdent pas les niveaux permis pour le bon fonctionnement de la planète. Cette question a été beaucoup débattue et il semble que ce ne soit pas le cas puisque plus de la moitié des prélèvements finissent par retourner vers les cours d'eau ou les nappes souterraines. Elle suscite néanmoins deux remarques. Tout d'abord l'hétérogénéité spatiale et temporelle de l'offre d'eau bleue est grande. Certaines régions arides n'ont quasiment pas d'eau bleue à leur disposition, des régions humides en ont à profusion, notamment pendant les périodes de fortes pluies. Pour cette raison, le total de 40 000 km³ d'eau bleue annuel doit être largement amputé pour déterminer les quantités disponibles pour les activités humaines. Jamais nous ne pourrions utiliser les débits colossaux de l'Amazone ou des grands fleuves sibériens ! Les quelques estimations tentées par le Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau indiquent que, sur le total ci-dessus, seuls 20 000 km³ environ par an seraient accessibles. Par ailleurs, maintenir les écosystèmes aquatiques

13. Nations unies, "Goal 6. Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all". <https://sdgs.un.org/goals/goal6>

dans un bon état de fonctionnement nécessite des écoulements minimaux, aussi appelés « flux environnementaux ». Ces flux sont de l'ordre de 30 % des débits totaux des cours d'eau, soit environ 6 000 km³ par an si l'on ne considère que le total accessible.

Même si les valeurs ci-dessus, qu'on trouve plus dans la tête des experts que dans des rapports officiels, restent approximatives, elles montrent que les quantités d'eau bleue prélevées restent globalement compatibles avec l'offre. Ce qui ne préjuge pas de difficultés locales, vu la grande hétérogénéité de la distribution des ressources.

L'EAU BLEUE QUE L'ON CONSOMME

Les Nations unies fournissent également les niveaux de *consommation* d'eau douce des trois secteurs. Sans surprise l'agriculture est la plus consommatrice, et de très loin, puisque sa vocation est d'évaporer l'eau. 70 % de l'eau prélevée pour l'irrigation est évaporée par les cultures, ce qui signifie aussi que 30 % ne l'est pas et retourne vers les nappes d'eau souterraines ou les cours d'eau. Les autres types d'usages rejettent l'essentiel de leurs prélèvements et n'en consomment que de 5 à 15 %.

Au total la *consommation* d'eau bleue, de l'ordre de 1 700 à 2 100 km³¹⁴, pour les usages humains exacerbe les différences entre l'agriculture, qui se taille la part du lion avec 90 % de l'eau bleue consommée, et les autres usages.

Toute l'eau prélevée et non évaporée est rejetée dans les cours d'eau ou les nappes souterraines dont elle dégrade la qualité en l'absence de stations d'épuration, ce qui reste de loin la règle à l'échelle mondiale. La capacité d'épuration naturelle des milieux récepteurs est mise à rude épreuve, car elle requiert des écosystèmes sains, bénéficiant de chaînes trophiques capables de dégrader les substances polluantes ou de résister aux augmentations de température. Si les écosystèmes sont dégradés, la pollution s'accumule dans les eaux de surface, d'autant plus qu'on la pompe et on la rejette plusieurs fois successivement et dans les eaux souterraines parce que l'épuration y est beaucoup plus lente. En Chine, les nombreuses industries rendent 30 % de l'eau douce impropre à la production d'eau potable¹⁵.

Pour avoir une vision complète des usages, il reste une consommation d'eau bleue difficile à classer et à estimer :

14. La fourchette basse est ici la plus réaliste puisqu'elle tient compte de l'eau verte des périmètres irrigués, contrairement aux chiffres des Nations unies. Cette fourchette basse est aussi celle retenue par les scientifiques travaillant sur les limites planétaires.

15. Stéphanie Monjon, Léa Boudinet, « État de l'environnement en Chine : quelles évolutions ces dernières années ? », *Green*, vol. 1, n° 1, 2021. <https://www.cairn.info/revue-green-2021-1-page-128.htm>

celle de l'évaporation d'eau des 800 000 barrages et retenues qui stockent au moins 7 000 km³ ¹⁶ d'eau bleue. L'évaporation des 50 000 grands barrages est évaluée par les Nations unies à 200 km³ par an, mais la réalité est sans doute plus proche de 700 km³ pour ces grands barrages uniquement¹⁷.

L'EAU VERTE QUE L'ON CONSOMME

Ce n'est que récemment que de premières estimations de l'eau verte mobilisée par les activités humaines ont été réalisées. Les progrès de la télédétection, l'estimation des rendements des cultures et des superficies de pâturages ont permis d'évaluer ces quantités.

L'agriculture mondiale fonctionne aujourd'hui encore principalement grâce à la pluie, et ce, même dans les régions arides. Un pays comme la Tunisie, pays le plus aride du Maghreb, utilise pour son agriculture 80 % d'eau verte et 20 % d'eau bleue¹⁸. L'eau verte est utilisée pour des cultures vivrières, notamment les céréales, pour l'olivier et pour l'élevage, alors que l'eau bleue va surtout à des cultures à haute valeur ajoutée comme celle des fruits

16. D'après la Commission internationale des grands barrages, voir *op. cit.* <http://fr.hydrocoop.org/sedimentation-barrages/>

17. Arjen Y. Hoekstra, Mesfin M. Mekonnen "The blue water footprint of electricity from hydropower", *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 16, 2012.

18. Mustapha Besbes, Jamel Chahed, Abdelkader Hamdane, *Sécurité hydrique de la Tunisie. Gérer l'eau en conditions de pénurie*, Éd. L'Harmattan, 2014.

et légumes. À l'échelle de la planète, l'agriculture strictement pluviale consomme environ $4\,900\text{ km}^3$ d'eau verte pour la production végétale. Comme les cultures irriguées bénéficient aussi d'eau de pluie à hauteur de 700 km^3 environ, la consommation d'eau verte par les cultures s'élève à $5\,600\text{ km}^3$ d'eau par an, soit 79 % de l'eau totale nécessaire aux cultures ($7\,100\text{ km}^3$).

La production agricole pluviale, pour importante qu'elle soit, est bien moins productive dans les climats arides. Beaucoup d'eau évaporée, ne profite pas aux plantes quand les rendements se réduisent. Pour les céréales, on observe qu'en dessous de 2 tonnes produites par hectare, l'efficacité de l'eau diminue : les plantes ne recouvrent plus les sols entièrement et c'est par le sol qu'une partie de l'eau s'évapore. À même quantité évaporée on produit donc moins. Il a été estimé¹⁹ que cette diminution d'efficacité de l'agriculture pluviale conduisait à $1\,500\text{ km}^3$ de pertes d'eau ! Au-delà de 2 tonnes par hectare en revanche, l'efficacité de l'eau varie peu : la production est proportionnelle à la quantité d'eau évaporée.

Notre utilisation d'eau verte ne se limite pas aux cultures. Elle est également essentielle aux activités d'élevage, à travers les pâturages et les parcours. L'estimation des quantités d'eau verte consommées par ces activités

19. Voir la discussion dans Ghislain de Marsily (dir.), *Les Eaux continentales*, rapport de l'Académie des sciences sur la science et la technologie n° 25, Éditions EDP Sciences, 2006.

demande à la fois de connaître la densité d'animaux élevés et les superficies disponibles. Le volume total consommé est d'environ 900 km³ par an²⁰.

Nous utilisons également de l'eau verte pour notre bois de feu. Il existe aujourd'hui peu de données sur cette consommation d'eau essentiellement verte, mais on peut la déduire des chiffres de production et de consommation de bois de feu. Elle est de l'ordre de 1 100 km³ par an²¹.

UNE VUE D'ENSEMBLE PLANÉTAIRE

Nous avons maintenant en main tous les éléments d'une vision globale du cycle annuel de l'eau douce (voir le détail des chiffres dans l'Annexe 2). Sur les 110 000 km³ d'eau de pluie continentale, un peu plus de 61 000 km³ sont utilisés par les écosystèmes « naturels », le moteur du recyclage continental. Si l'on déduit aussi les 40 000 km³ d'eau bleue qui retournent vers les océans, il reste 9 000 km³ d'eau, ceux consommés par les activités humaines. Ces volumes sont essentiellement ceux de l'eau verte utilisée pour produire de la biomasse ayant vocation à être convertie en nourriture humaine, en fourrage et nourriture pour nos élevages, en biomatériaux divers dans le textile et la construction, et en bioénergie. De manière surprenante,

20. Arjen Y. Hoekstra, Mesfin M. Mekonnen, "The water footprint of humanity", *PNAS*, vol. 109, 2012. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1109936109>

21. Voir *L'empreinte eau*, *op. cit.*

les aliments végétaux représentent une fraction faible et décroissante de cette biomasse. À l'échelle européenne, en 2019, cette fraction n'était que de 13 % de la masse totale produite²². La part du lion, 59 %, revenait au fourrage et à la nourriture animale. Suivaient les biomatériaux (15 %) et la bioénergie (13 %), cette dernière étant en progression rapide.

Le reste, l'eau bleue consommée, l'est principalement par l'irrigation (1 600 km³)²³ et par les barrages et réservoirs (700 km³). Les usages urbains et industriels viennent ensuite et n'évaporent qu'une faible fraction de l'eau (150 km³ en tout).

La part de l'agriculture irriguée varie fortement, allant de 40 à 50 % en Asie du Sud, en Afrique du Nord et au Moyen-Orient, à 10 % ou moins en Afrique subsaharienne, en Océanie et en Europe. L'irrigation n'occupe sur la planète que 20 % des terres cultivées, mais elle produit 45 % de la valeur ajoutée de l'agriculture²⁴.

22. Peu de données disponibles à l'échelle mondiale, mais le Joint Research Centre (JRC) européen fournit cette répartition des 1,2 milliard de tonnes de biomasse produites annuellement en Europe. "Food, feed, fibres, fuels. Enough biomass for a sustainable bioeconomy?" 27septembre 2019. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news/food-feed-fibres-fuels-enough-biomass-sustainable-bioeconomy-2019-09-27_en, (répartition corrigée ici des produits forestiers).

23. Les chiffres concernant l'irrigation sont sujets à de nombreuses variations suivant qu'on intègre ou non l'eau verte évaporée des périmètres irrigués. Le volume de 1 600 km³ ne concerne que l'eau bleue.

24. Ghislain de Marsily, *L'Eau, un trésor en partage*, Dunod, 2009.

Retenons de cette vue d'ensemble que du point de vue des consommations, notre dépendance à l'eau verte est essentielle pour la production de nourriture. Pour autant, la productivité de cette eau est moins grande que celle de l'eau bleue d'irrigation, car l'agriculture pluviale de nombreux petits agriculteurs ne produit que des rendements faibles.

À L'ÉCHELLE D'UN PAYS OU D'UNE RÉGION : LE CAS DE LA FRANCE

Dans le cas d'un pays, d'une région, il est possible de tenir le même raisonnement qu'à l'échelle mondiale, à condition de prendre également en compte les échanges d'eau bleue entre pays voisins, ce qui n'est pas toujours chose facile. Ainsi lorsqu'un fleuve comme le Rhin devient une frontière, qui a le droit de s'en approprier, même virtuellement, l'eau qui s'y écoule? Pour les nappes d'eau souterraines transfrontalières, c'est même encore plus compliqué, car l'eau ne connaît pas les frontières! Tant que l'eau est abondante, ces questions demeurent théoriques, mais dès qu'elle devient rare, elles peuvent entraîner de nombreux casse-tête pratiques et diplomatiques.

Les nappes souterraines du nord Sahara s'étendent par exemple sur 600 000 km² de l'Algérie à la Libye en passant par la Tunisie. Elles se répartissent dans deux couches aquifères dans lesquelles de grandes quantités d'eau s'écoulent d'ouest en est. Gérer une telle ressource présente un enjeu majeur pour les trois pays impliqués,

d'autant que les prélèvements annuels, souvent opérés à plus de 1000 mètres de profondeur, y ont atteint 2,5 km³ dès les années 2000²⁵. Qui plus est, l'eau extraite est souvent fortement salée et à des températures quelquefois supérieures à 60 °C. Dans leur partie est, les aquifères sont artésiens : lorsqu'on creuse un puits, l'eau jaillit et ne peut plus être arrêtée. Il faut donc trouver un moyen de la stocker ou de l'utiliser rapidement. Pour coordonner la gestion de cette ressource, tout un arsenal de mesures, de contrôles, d'outils de simulation a dû être mis en place pour faciliter le partage qui requiert des négociations régulières.

La France métropolitaine (voir le détail en Annexe 2) reçoit en moyenne 510 km³ de précipitations soit 932 mm par an²⁶. Cette moyenne résulte d'un arrosage abondant des régions montagneuses qui reçoivent plus de 1000 mm par an, parfois jusqu'à 2000, contre 600 à 900 mm ailleurs. Ces précipitations se transforment en moyenne pour 40 % en eau bleue (198 km³) et pour 60 % (312 km³) en eau verte, des proportions quasi identiques à celles de la planète.

25. Observatoire du Sahara et du Sahel, « Système aquifère du Sahara septentrional, Gestion commune d'un bassin transfrontière », 2003. https://www.riob.org/sites/default/files/IMG/pdf/1_RAPPORT_DE_SYNTHESE.pdf

26. Ou encore 932 litres d'eau sur chaque mètre carré.

La pression moyenne sur les ressources en eau bleue est modérée avec un total de 26,7 km³²⁷ prélevés. Là aussi la France colle à la moyenne mondiale. En revanche, la répartition des usages est très différente puisque ce sont les prélèvements des centrales thermiques (16 km³) qui se taillent la part du lion²⁸ et non l'agriculture irriguée (2,9 km³). Les usages urbains occupent eux la seconde place avec 5,3 km³ soit le double, 2,6 %, de la moyenne planétaire. Les parcs et jardins de nos villes, les piscines, dont la prolifération a été phénoménale dans les décennies passées²⁹, contribuent à une valeur moyenne de 145 litres par habitant et par jour³⁰. Les prélèvements d'eau industrielle autre qu'énergétique viennent en dernière position avec 2,5 km³ par an. L'évolution des prélèvements des deux dernières décennies est contrastée : ceux de l'agriculture augmentent alors que les autres diminuent par une recherche d'efficacité constante incluant davantage de recyclage de l'eau.

27. En excluant les prélèvements requis pour alimenter l'important réseau de canaux français qui représentent plus de 5 km³.

28. Et aussi par un manque de cohérence dans les données mondiales, de nombreux pays n'incluant pas les prélèvements des centrales thermiques dans leurs données.

29. Jérôme Fourquet, Jean-François Cassely, *La France sous nos yeux*, Le Seuil, 2021.

30. Voir EauFrance, « La maison et la ville, usages de l'eau et des milieux aquatiques ». <https://www.eaufrance.fr/la-maison-et-la-ville>. Voir aussi l'article de Gary Dagorn, Léa Sanchez, « Quelles quantités d'eau sont prélevées et consommées par la population, les usines et l'agriculture en France ? », *Le Monde*, 16 août 2023. https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2023/04/01/usines-agriculture-eau-potable-queelles-quantites-d-eau-sont-prelevees-et-consommees-par-secteur_6167836_4355770.html

La consommation d'eau est logiquement dominée par l'agriculture, tant pour l'eau bleue que pour l'eau verte. Les cultures et pâturages évaporent environ 14 % de la pluie contre 7,4 % à l'échelle mondiale. La valorisation agricole des territoires français laisse aux écosystèmes terrestres une fraction de la pluie plus faible qu'à l'échelle mondiale, 46,5 % contre 56,4 %.

USAGES DE L'EAU ET LIMITES PLANÉTAIRES

L'influence de l'homme sur le cycle de l'eau met-elle la stabilité de notre planète en péril? La première version de la recherche effectuée sur les limites planétaires³¹ incluait l'utilisation d'eau douce comme un des facteurs possibles de déstabilisation, en se limitant à l'eau bleue. L'article proposait un seuil de consommation d'eau douce de 4000 km³ à ne pas dépasser pour ne pas sortir de la stabilité de l'holocène. Cette consommation était estimée à 2600 km³ annuels³². Le seuil n'était donc pas franchi, même si la répartition spatiale des ressources et des prélèvements suscitait quelques interrogations.

Cette approche initiale a quelque peu évolué récemment tant pour l'eau bleue que pour l'eau verte. La stabilité de la planète dépend de sa capacité à distribuer

31. Voir l'article fondateur de Johan Rockström *et al.*, *op. cit.*

32. Dans le tableau a de l'Annexe 2, on retrouve cet ordre de grandeur en ajoutant à toutes les colonnes d'eau bleue (b) consommée les 1500 km³ évaporés par l'irrigation.

l'eau bleue et l'eau verte grâce au recyclage continental de l'eau décrit au chapitre II. À cet égard, il est établi que les grandes forêts équatoriales et tropicales du Congo et de l'Amazonie jouent un rôle critique³³. Les perturbations de l'eau verte sont donc tout aussi importantes que celles de l'eau bleue et tout aussi sensibles à la déforestation des forêts tropicales et à la dégradation des écosystèmes par les activités humaines. À précipitations inchangées, l'anthropisation de nos bassins-versants et de l'usage des sols contribue à transformer davantage de précipitations en eau bleue par ruissellement. La pompe alimentant le recyclage continental de l'eau devient moins efficace.

L'importance de l'eau verte pour la planète étant actée, il restait à trouver une manière d'examiner comment transcrire son rôle sur la stabilité planétaire. En 2020, une première différenciation de la limite en 6 sous-limites a été proposée³⁴, soulignant la complexité du problème. L'eau étant au cœur du système planétaire, elle influence autant qu'elle est influencée par ses multiples interactions avec les sols, la végétation, le carbone, le climat qui créent une multitude de boucles de rétroaction. Mais dans

33. Lang Wang-Erlandsson et al., "A planetary boundary for green water", *Nature*, vol. 3, juin 2022. https://www.nature.com/articles/s43017-022-00287-8.epdf?sharing_token=hier2n70_tPCIC8-r06bmdRgNojAjWeI9jnR3ZoTv0P2KmS6Qajbkp2nZuUVCQ0Vp_PoLfySeHBsRgAquqylOp9LnWtWwctu_gtf2IN3rQca4cpkK1yn9HaZMp0U7_CeAUSZHD1Xu5KL_3KimuwqoA5hdvBx21Dt1POSVkd0=

34. Tom Gleeson et al., "The Water Planetary Boundary: Interrogation and Revision", *One Earth*, mars 2020. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.009>

l'esprit des limites planétaires, il fallait revenir à un faible nombre de facteurs, ce que Lang Wang-Erlandsson et ses co-auteurs ont proposé en 2022³⁵. Après avoir analysé plusieurs variables possibles, ils ont retenu celle de l'humidité des sols, et plus précisément la proportion des sols de la planète dont l'humidité s'écarte de manière importante de la moyenne observée³⁶ pendant l'holocène. L'humidité du sol présente l'intérêt d'être une grandeur directement influencée par les activités humaines, elle peut donc aussi servir de levier d'action pour un bon fonctionnement de la planète. Nous y reviendrons.

Le résultat de ce travail approfondi est qu'au cours de l'holocène, entre 10 et 11 % de la planète rencontrait des conditions extrêmes de sécheresse ou d'humidité des sols, et ce, de manière très stable, pour autant qu'on puisse en juger avec les outils d'observation et de simulation dont nous disposons aujourd'hui. Or, depuis les années 1920, cette proportion a augmenté de manière régulière pour atteindre la valeur de 16 % en 2005, témoignant d'une sortie des conditions de l'holocène concernant l'eau verte. Il n'existe pour l'instant pas d'étude solide permettant d'indiquer s'il existe un écart seuil des conditions extrêmes d'eau verte à ne pas dépasser, même si un article récent³⁷ propose une valeur de 50 % à titre provisoire.

35. Lang Wang-Erlandsson *et al.*, "A planetary boundary for green water", *op. cit.*

36. En pratique, l'humidité de fréquence plus élevée ou plus faible que les 5^e et 95^e centiles.

37. Katherine Richardson *et al.*, "Earth beyond six of nine planetary boundaries", *op. cit.*

En 2023, de nouveaux travaux³⁸ utilisant une approche similaire à celle de l'eau verte ont montré que la variabilité des débits d'eau bleue des rivières de la planète s'est elle aussi écartée de la stabilité de l'holocène depuis la première décennie du xx^e siècle. Les écoulements très faibles ou très élevés qui affectaient environ 9 % de la surface de la planète pendant l'holocène de manière régulière se retrouvent aujourd'hui sur 18 % de cette surface. Le fait que ces débits extrêmes soient plus fréquents que pendant la période préindustrielle³⁹ est un signe de déstabilisation, mais là aussi, il est difficile d'en tirer des conclusions hâtives. Un seuil critique provisoire de 50 % a, ici aussi, été proposé.

Que déduire de ces travaux sur la limite planétaire de l'eau douce? Que les écoulements d'eau bleue soient influencés par les activités humaines, et sans doute aussi par le dérèglement climatique sur lequel nous reviendrons, n'est pas surprenant. Que la distribution de l'eau verte soit affectée elle aussi paraît plus étonnant, eu égard à sa dépendance des écosystèmes et des grands biomes qui en sont les consommateurs les plus importants. Ce changement indique-t-il que le recyclage continental, essentiel pour la redistribution de l'eau à travers les continents,

38. Miina Porkka et al., "Global water cycle shifts far beyond pre-industrial conditions – planetary boundary for freshwater change transgressed", EarthArXiv, mai 2023. DOI: 10.31223/X5BP8F

39. La période préindustrielle étant supposée représentative des conditions de l'holocène.

est en train d'évoluer? Dans la logique des limites planétaires, c'est sans doute sur ce phénomène qu'il faudrait axer la réflexion. Encore faudrait-il pour cela qu'on progresse dans sa compréhension. Comment la redistribution est-elle affectée par la modification des grands biomes? Quelles sont les conséquences de l'anthropisation de la planète, et en particulier des prélèvements d'eau et de l'irrigation, sur ce recyclage? Et finalement n'aurions-nous pas là un moyen de mieux cibler des mesures correctives afin de renforcer ce phénomène essentiel? Nous verrons que les approches régénératives (voir chapitre XIII) ouvrent des pistes et invitent à l'expérimentation.

Ces quelques réflexions montrent que, dans l'état des connaissances, déterminer des seuils de risque liés à l'eau douce indépendants d'autres limites planétaires comme celles de la déforestation ou de l'intégrité de la biosphère reste difficile, l'eau étant au cœur de la mécanique planétaire.

Dans un monde aux ressources finies, il est important de compter précisément l'eau que nous utilisons. Or les divers usages de l'eau rendent la comptabilité particulièrement délicate. Schématiquement, il y a deux grandes façons d'utiliser l'eau. Les plantes pompent de l'eau dans les sols, soit verte, soit bleue lorsqu'elle est apportée par irrigation, et l'évaporent. Leur impact est surtout quantitatif, même si des exportations de substances nocives

peuvent être générées par les pratiques agricoles. Les autres usages utilisant les capacités hygiéniques ou énergétiques de l'eau ont surtout des impacts qualitatifs. Ils dégradent la qualité de l'eau ou des milieux aquatiques lorsque l'eau est rejetée après usage, notamment en l'absence d'épuration.

Globalement nous *consommons* surtout de l'eau verte pour produire notre nourriture. Cette eau participe au recyclage continental. Nos *prélèvements* sont dominés par la production d'énergie et par l'agriculture. Ils s'élèvent à un dixième de la totalité de l'eau bleue. Un peu moins de la moitié de ces prélèvements environ retourne dans les cours d'eau ou les nappes souterraines.

L'eau douce contribue à la stabilité de la planète. Elle est une des limites planétaires identifiées par le Stockholm Resilience Centre. Depuis le début du xx^e siècle, il semble que le cycle de l'eau, tant pour l'eau bleue que pour l'eau verte, s'écarte progressivement des conditions stables ayant prévalu pendant l'holocène. Davantage de recherches restent nécessaires pour déterminer un seuil au-delà duquel les perturbations du cycle de l'eau douce deviendraient critiques pour cette stabilité.

IV. EAU AGRICOLE, EAU VIRTUELLE

Il nous faut maintenant aborder un point essentiel. Pourquoi l'agriculture utilise-t-elle autant d'eau, qu'elle soit verte ou bleue? Cela tient au fonctionnement des plantes, car ces dernières ne se servent pas de l'eau de la même manière que les animaux. Pour elles, il faut le plus possible en évaporer, car, sans évaporation, elles ne peuvent pas absorber le gaz carbonique nécessaire à la photosynthèse¹. Or, sans gaz carbonique, pas de production de glucides, pas de croissance ni de leurs parties aériennes ni de leurs racines, pas d'énergie pour pomper l'eau dont elles ont besoin. Les plantes font donc face à un dilemme : soit elles s'épanouissent et, avec davantage de feuilles, elles évaporent davantage, soit elles rabougrissent, flétrissent, consomment de moins en moins d'eau et ne se développent plus.

LES PLANTES, DES GOURMANDES EN EAU

Tous les jardiniers en font l'expérience, même pour un petit carré de jardin, il faut dès qu'il fait beau et chaud arroser souvent! Un rapide calcul donne une idée plus

1. Voir chapitre III : « Que signifie utiliser l'eau ? » pour la présentation de l'usage de l'eau par les plantes.

précise. Si l'on distribue les 70 000 km³ d'eau verte sur les 148 millions de km² des continents, on trouve que chaque mètre carré évapore en moyenne 471 litres d'eau chaque année, soit une cinquantaine d'arrosoirs. Comme au moins 41 % des terres de la planète se trouvent en climat sec ou aride², on conçoit que cette évaporation soit bien supérieure pour de nombreux écosystèmes et a fortiori pour des cultures sélectionnées pour être productives. Comme 471 litres par m² représentent 4 710 m³ par hectare, les quantités d'eau nécessaires aux plantes et aux cultures sont très élevées, sans commune mesure avec celles utilisées pour nos besoins sanitaires.

Parmi les cultures, les céréales occupent le haut du panier avec des besoins de l'ordre du millier de litres d'eau par kilogramme de grain ! Et quand le rendement descend en dessous de 2 tonnes par hectare, la productivité de l'eau diminue fortement : il peut même falloir plusieurs milliers de litres par kilo de grain³ quand les rendements sont faibles^{4 5}. Pour des rendements plus élevés, la productivité augmente lentement et finit par se stabiliser au-delà de

2. D'après la Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification.

3. 1 litre par kilogramme est équivalent à 1 m³ par tonne.

4. Johan Rockström, "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.

5. Jacob Kijne J. *et al.*, "Opportunities to increase water productivity in agriculture with special reference to Africa and South Asia", project report, Stockholm Environment Institute, 2009. https://www.researchgate.net/publication/344807631_Opportunities_to_increase_water_productivity_in_agriculture_with_special_reference_to_Africa_and_South_Asia

5 tonnes par hectare. À 8 tonnes par hectare, un rendement courant en France, il ne faut plus que 500 à 600 litres d'eau par kilo de grain. Comme précédemment expliqué, cette évolution de la productivité tient au fait que lors de faibles rendements, davantage d'eau est évaporée par le sol et donc une part moindre de l'eau est réellement utilisée par la culture.

Parmi les céréales, il y a également des différences. Le maïs est la céréale la plus efficace pour produire du grain. À rendement égal, il a besoin de 20 % d'eau en moins que le blé. Étant apparu plus récemment, il a connu des teneurs en CO₂ de l'atmosphère plus faibles que les autres céréales et capte cette molécule de manière plus efficace. Mais comme il s'est développé sous un climat tropical, il grandit et a besoin d'eau pendant l'été alors qu'en zone tempérée, les réserves d'eau des sols sont faibles. Il faut donc l'irriguer.

À l'autre bout du spectre, il y a le riz qui, du fait de son mode de production « les pieds dans l'eau », évapore aussi beaucoup d'eau, et notamment d'eau d'irrigation. À rendement égal, il consomme deux fois plus d'eau que le blé. Heureusement, il existe aussi des variétés de riz pluvial qui se contentent d'eau verte et qui consomment moins d'eau.

Les fruits et légumes sont moins gourmands et ne demandent que quelques centaines (150 à 400) de litres d'eau par kilogramme de produit. La championne toutes catégories est la pomme de terre qui se contente d'une centaine de litres par kilo. Étant donné sa richesse nutritive,

la pomme de terre est la nourriture à recommander en cas de pénurie alimentaire grave, ce que l'histoire a d'ailleurs démontré⁶. Les nombreuses données aujourd'hui disponibles révèlent aussi la variabilité des besoins en eau, du simple au double, suivant les pays et les climats.

Un autre ordre de grandeur mérite d'être gardé en tête : il faut en moyenne un litre d'eau pour produire une kilocalorie alimentaire végétale.

LE CAS DE LA VIANDE

Nous ne mangeons pas que des produits végétaux bruts, loin de là. Notre alimentation est faite de produits transformés : pain, pâtes, huiles, viande, charcuteries, œufs, lait, fromage... Or la plupart des transformations démultiplient les quantités d'eau nécessaires, tout particulièrement lorsqu'elles impliquent des animaux.

L'utilisation des animaux comme intermédiaires de production alimentaire est aussi vieille que l'agriculture. À cela il existe au moins deux raisons. Tout d'abord les ruminants, contrairement à nous, sont capables de digérer les fibres végétales, comme la cellulose, qui abondent dans les herbes ou les arbustes. Ils ont permis à de nombreuses sociétés de survivre dans des milieux arides où

6. Ali Nawab, "Nutritional Water Productivity and Global Food Security", *Journal of Agricultural Engineering*, vol. 48, n° 1, 2011.

les rendements des plantes cultivées ne sont pas garantis. Les animaux y sont de véritables « assurances-vie » puisque, en cas de pénurie, ils constituent un stock de nourriture immédiatement disponible. La seconde raison réside dans leur rôle essentiel dans le recyclage de la fertilité, une forme d'économie circulaire que les sociétés agraires ont développée dès le Moyen Âge et sans doute encore bien plus tôt. Les déjections animales sont riches en azote et phosphore que les plantes puisent dans les sols. En les recyclant, par exemple grâce à la jachère pâturée, les déjections en reconstituent la fertilité. Avec l'introduction massive des engrais de synthèse à la fin des années 1960, ce rôle clé des animaux dans l'agriculture et notre production alimentaire est devenu invisible.

L'élevage a aussi construit nos paysages ouverts, riches en vertes prairies, souvent dans des régions peu propices aux cultures parce que trop humides ou au relief trop accidenté.

D'un point de vue énergétique et écologique, se nourrir d'animaux n'est pas efficace puisqu'il faut mobiliser des végétaux pour les nourrir, végétaux qui pourraient tout aussi bien nourrir directement des êtres humains⁷. Tous les animaux ne sont pas logés à la même enseigne

7. Cette logique semble toutefois insuffisante pour expliquer l'organisation des chaînes trophiques dont le sommet est toujours occupé par des espèces carnivores, certes en général les moins nombreuses.

dans leur efficacité de transformation. Les ruminants sont peu efficaces, car ils sont conçus pour digérer des fibres complexes. Pour produire un kilogramme de viande de bœuf, il faut une bonne dizaine de kilos de végétaux qui eux-mêmes ont consommé de l'eau. Au total, entre ce qu'il faut pour les plantes et ce qu'il faut pour les animaux – une toute petite partie – on compte environ 13 000 litres d'eau. Les porcs viennent en seconde position avec environ 5 000 litres d'eau par kilo et les volailles suivent avec 4 000 litres par kilo. Ces valeurs sont des ordres de grandeur qui donnent aussi une idée de la capacité de conversion des plantes en protéines ou en calories⁸ de nos cousins animaux. Elles expliquent le fait que quasiment 60 % de la biomasse agricole et 70 % des céréales soient utilisées comme nourriture pour nos élevages en Europe.

LES AUTRES PRODUITS TRANSFORMÉS

Mais il n'y a pas que la viande. De nombreux aliments sont soit des produits animaux, soit extraits des végétaux. Les œufs, le lait et tous les laitages, le café, les huiles et bien d'autres requièrent de grandes quantités d'eau. La comptabilité de l'eau n'est pas toujours simple, car un animal peut produire différentes substances, par exemple de la viande, du lait et du cuir, auxquelles il faut attribuer l'eau des végétaux consommés. Mais des ordres de grandeur de

8. En pratique, la conversion en protéines est nettement plus efficace que la conversion en calories.

l'eau utilisée peuvent être estimés qui suffisent à nous faire réfléchir. Un litre de lait revient à 800 litres d'eau, un verre de vin à 120 litres, une tasse de café à 140 litres, un litre d'huile souvent autour de 5 000 litres d'eau.

On peut aussi s'intéresser aux productions agricoles non alimentaires. Un autre grand consommateur d'eau est le coton que nous importons en grandes quantités pour nos vêtements. Un seul T-shirt en coton coûte 2 700 litres d'eau. Et nous en jetons beaucoup... Les biocarburants ne sont pas en reste. Chaque litre coûte entre 3 500 et 4 000 litres d'eau et on en produisait environ 160 milliards de litres en 2021. À eux seuls, ils accaparent donc quasiment 600 km³ d'eau, soit 8 % de l'eau de l'agriculture mondiale. Leur production augmente rapidement, elle a doublé entre 2010 et 2020 selon l'OCDE.

RÉGIMES ALIMENTAIRES ET BESOINS EN EAU

À l'échelle mondiale, les 8 100 km³ d'eau consommés par l'agriculture représentent environ 1 050 m³ par an pour chaque personne, soit près de 2 900 litres d'eau par jour. Avec un litre d'eau pour produire une kilocalorie, le chiffre est cohérent avec les données de production agricole de la FAO de 3 000 kilocalories par habitant et par an. Notons toutefois que ce que nous mangeons réellement représente environ 2 000 kilocalories, la différence étant due aux pertes et gaspillages de nourriture de la ferme à la fourchette qui s'élèvent à 30 % du total.

Ces valeurs moyennes mondiales cachent une importante variabilité⁹ due à la part de produits animaux dans les régimes alimentaires et aux différences de productivité de l'agriculture. Une nourriture végétarienne peut faire baisser les besoins quotidiens à moins de 1 700 litres par jour par personne. On trouve de telles valeurs en Asie du Sud-Est et en Afrique centrale, dans des régions humides, où vivent de nombreux végétariens. C'était le cas en Chine il y a encore 30 ans, quand les apports de protéines animales restaient limités. Cette situation a changé rapidement avec le développement économique, et en raison de l'appétit pour la viande de porc et de volaille des Chinois. De 20 kilos¹⁰ par an et par personne dans les années 1980, la consommation est passée en 2020 à 63 kilos. La Chine consomme aujourd'hui 28 % de la viande produite dans le monde et la moitié de toute la viande de porc¹¹ ! Par comparaison, les valeurs européennes s'échelonnent entre 70 et 90 kilos par personne et par an¹² et celles des États-Unis atteignent les 120 kilos !

9. Voir par exemple : Francesca Harris et al., "The Water Footprint of Diets: A Global Systematic Review and Meta-Analysis", *Advances in Nutrition*, vol. 11, 2020. [https://advances.nutrition.org/article/52161-8313\(22\)00262-9/fulltext](https://advances.nutrition.org/article/52161-8313(22)00262-9/fulltext)

10. Il s'agit de chiffres de production et non pas de consommation nette.

11. Charlie Campbell, "How China Could Change the World by Taking Meat Off the Menu", *Time*, 22 janvier 2021. <https://time.com/5930095/china-plant-based-meat/>

12. "Meat Consumption in Europe", *Landgeist*, 5 octobre 2021. <https://landgeist.com/2021/10/05/meat-consumption-in-europe/>

On observe donc logiquement des valeurs quotidiennes supérieures à 4000 ou 5000 litres par personne dans les pays où la viande constitue une part importante de l'alimentation, États-Unis, Europe, Australie, Russie, Afrique du Nord notamment. On trouve aussi des valeurs élevées dans des pays à faible productivité agricole où la nourriture contient également une part de viande comme les pays sahéliens ou la Mongolie. Les données indiennes sont également instructives. Dans ce pays, la nourriture requiert plus d'eau que dans d'autres pays où les végétariens sont nombreux, et ce, pour une raison simple, la consommation importante de lait et de produits laitiers. Les animaux en effet ne fournissent pas que de la viande!

De ce rapide survol, nous pouvons retenir deux choses importantes. Tout d'abord, si nous voulons économiser de l'eau, évitons le gaspillage alimentaire. Même si la viande est moins gaspillée que les fruits et légumes, les 30 % de pertes et de gaspillages alimentaires représentent de loin les plus grands gaspillages d'eau. Ensuite, ajustons notre consommation de viande à nos besoins. Les recommandations de l'OMS sont d'une trentaine de kilogrammes par an¹³ pour garantir notre santé. Au-delà de cette valeur, le risque de maladie cardio-vasculaire augmente. Nous avons donc de la marge.

13. « Réduire la viande : porc, bœuf, veau, mouton, agneau, abats ». <https://www.mangerbouger.fr/1-essentiel/les-recommandations-sur-l-alimentation-l-activite-physique-et-la-sedentarite/reduire/reduire-la-viande-porc-baeuf-veau-mouton-agneau-abats>

Une autre particularité intrigue : c'est souvent dans les pays arides que les régimes alimentaires contiennent le plus de viande. Cette particularité s'explique par les rôles précédemment évoqués des ruminants qui servent d'assurance-vie en cas de sécheresse. Mais ce qui par le passé constituait une adaptation à l'aridité est devenu un handicap lorsque la population a augmenté et que les habitudes alimentaires ont persisté.

Produire notre nourriture quotidienne est donc de loin ce qui demande le plus d'eau. Mais l'eau dont il s'agit est principalement de l'eau verte, cette eau de pluie qui a été stockée dans les sols. Et lorsqu'on irrigue, on utilise l'eau d'une nappe, d'un lac ou d'un fleuve n'ayant pas été potabilisée. Les tensions sur les ressources en eau pour l'irrigation sont souvent dues au fait que l'eau doit être prélevée pendant des périodes sèches pendant lesquelles l'eau est moins abondante.

PRODUIRE LOCALEMENT OU IMPORTER ? L'IMPORTANCE DE L'EAU VIRTUELLE

S'il faut de l'ordre de 1000 m³ d'eau par personne et par an pour produire notre nourriture, de nombreux pays éprouvent des difficultés à mobiliser de telles quantités, sachant que la plupart des cultures requièrent 400 à 500 millimètres de pluie — soit de 4000 à 5000 m³ par hectare! — répartis sur quelques mois de l'année et que la superficie cultivable est souvent réduite dans les pays arides. Certains pays n'atteignent même pas ce volume en un an!

À la fin des années 1980, un chercheur anglais du nom de Tony Allan s'est interrogé sur le faible nombre de conflits liés à l'eau au Moyen-Orient, alors que la disponibilité de l'eau y était notoirement insuffisante pour satisfaire les besoins des populations. Il s'est rendu compte que ces pays répondaient au stress d'une manière simple : au fur et à mesure de l'accroissement démographique, ils importaient davantage de nourriture et notamment de céréales. Les courbes d'augmentation de population et de production agricole étant prévisibles à court et moyen terme, les quantités de céréales à importer le sont également¹⁴.

La mondialisation des échanges des dernières décennies a donc masqué l'accroissement des tensions sur l'eau agricole. Elle s'est faite pour partie sous forme d'aide alimentaire de la part de pays excédentaires, dont les États-Unis et la France, ce qui a créé des situations de dépendance aux fortes implications géopolitiques¹⁵. Les pays d'Afrique du Nord sont emblématiques de cette situation ; ils sont parmi les plus gros importateurs mondiaux de céréales et représentent à eux seuls le tiers du marché mondial de blé. Dès les années 2000, la dépendance de ces pays aux céréales importées était de l'ordre de 50 % et

14. Voir *L'Empreinte eau*, *op. cit.*

15. Le concept d'arme alimentaire, consciemment évoqué par certains pays, a suscité de nombreux débats dans les dernières décennies du xx^e siècle. Voir Joseph Collins, « La CIA et l'arme alimentaire », *Le Monde diplomatique*, septembre 1975. <https://www.monde-diplomatique.fr/1975/09/COLLINS/33375>

elle continue d'augmenter continûment au rythme de la croissance démographique.

Tony Allan a été le premier à convertir les importations de produits agricoles en mètres cubes d'eau équivalents. Il a nommé cette eau l'eau virtuelle¹⁶. Les volumes de cette eau échangés entre pays sont en moyenne de 1 800 à 2 000 km³ d'eau par an, soit un quart de l'eau de la production agricole mondiale. Les plus gros exportateurs d'eau virtuelle sont les États-Unis, l'Australie, le Brésil et le Canada. Les plus gros importateurs sont les pays du Maghreb et du Moyen-Orient, le Mexique et le Japon. Beaucoup de pays comme ceux d'Europe, la Chine et l'Inde¹⁷ sont à la fois de gros exportateurs et de gros importateurs d'eau virtuelle.

L'augmentation de la dépendance des pays importateurs, alimentée à la fois par les difficultés des agricultures des pays en développement à nourrir une population de plus en plus urbaine et par le mouvement général de mondialisation de la seconde moitié du xx^e siècle, a clairement démontré ses limites et risques associés. La crise alimentaire des années 2008 et le conflit en Ukraine en sont deux

16. Tony Allan, *Virtual Water, Tackling the Threat to Our Planet's Most Precious Resource*, I.B. Tauris, Londres, 2011.

17. Voir « Eau virtuelle échangée par le biais du commerce international », Statistiques mondiales en temps réel, consoGlobe-Planétoscope. <https://www.planetoscope.com/consommation-eau/1773-eau-virtuelle-echangee-par-le-biais-du-commerce-international.html>

illustrations. La crise de 2008 a été déclenchée par des augmentations brutales des prix de l'énergie qui ont généré des augmentations du coût des intrants (engrais, produits phytosanitaires, énergie) et de transport. L'envolée des prix a ensuite été exacerbée par les spéculations sur les produits dont le cours dépend de bourses internationales (comme le blé ou le maïs). Et pour les produits qui ne le sont pas, comme le riz, la crainte d'une pénurie peut à elle seule conduire des pays à importer massivement ou au contraire à restreindre leurs exportations¹⁸. Au deuxième trimestre 2008, les prix des principales denrées alimentaires avaient plus que doublé. Aux facteurs énoncés ci-dessus s'était ajoutée une succession de mauvaises récoltes conduisant à une diminution des stocks : en 2007, les stocks de blé avaient été divisés par quatre par rapport à l'an 2000. Une autre cause possible a également suscité beaucoup de débats : la part croissante de la transformation de céréales en bioéthanol qui a amoindri la capacité du système mondial à répondre à la crise et a également contribué à la chute des stocks mondiaux. Au moins trente pays ont alors connu des émeutes de la faim. Plus de la moitié des pays impactés ont pris des mesures de réduction de taxes ou de contrôle des prix¹⁹.

18. *Main basse sur le riz* de Jean-Pierre Boris (2010, Fayard) analyse bien la cascade d'événements de la crise du riz de cette période

19. Anuradha Mittal, "The 2008 Food Prices Crisis: Rethinking Food Security Policies", Rapport UNCTAD n° 56, 2009. https://unctad.org/system/files/official-document/gdsmjpg2420093_en.pdf

Le manque d'eau n'est à l'évidence ni la seule raison de la multiplication des échanges d'eau virtuelle ni la raison des crises alimentaires. Mais il contribue à la vulnérabilité de nombreux pays engagés dans des relations commerciales imposées et non choisies. Comme les nouvelles crises récentes l'ont montré, la production et les chaînes d'approvisionnement locales sont essentielles à la souveraineté et à la résilience des sociétés.

Si les plantes ont besoin de beaucoup d'eau, c'est que cette dernière régle leur capacité d'absorption du gaz carbonique, la brique de base de la photosynthèse. Par kilogramme de biomasse, il faut entre 100 et 2 000 litres d'eau. Les produits élaborés ou transformés que nous consommons multiplient ces besoins par un facteur variant de 5 à 10. Produire notre nourriture requiert en moyenne 3 000 litres d'eau par jour et par personne, soit 1 050 m³ par personne et par an. Dans les pays industrialisés et là où on mange beaucoup de viande ou de produits élaborés, cette valeur peut atteindre 1 700 m³. Dans les pays arides, il est souvent difficile de mobiliser de telles quantités d'eau, d'autant que la croissance démographique y est souvent importante. La dépendance à l'eau d'autres pays mieux pourvus est souvent la solution apportée, avec comme conséquence une vulnérabilité aux crises des marchés agricoles mondiaux.

V. UNE APPROCHE HOLISTIQUE DE NOS USAGES : L'EMPREINTE EAU

Nous avons précédemment mis en place un cadre de réflexion holistique de nos usages de l'eau qui dépasse le cadre traditionnel de l'eau bleue. Rappelons-en les différentes composantes. Il y a d'abord la différenciation entre prélèvements et consommation, puis celle entre eau verte et eau bleue, enfin l'identification de l'eau locale et des eaux échangées entre pays sous forme d'eau virtuelle. Un tel cadre, s'il compliquait beaucoup les choses quand l'eau paraissait inépuisable, est aujourd'hui essentiel pour à la fois comprendre les enjeux et y répondre. C'est ce cadre qui a permis de développer la notion d'empreinte eau.

LA NOTION D'EMPREINTE

Le concept d'empreinte s'est développé dans plusieurs domaines dans les dernières décennies. L'empreinte écologique nous informe de la date à laquelle nous avons « épuisé » les ressources renouvelables annuelles que la planète

nous offre¹. Celui d'empreinte carbone comptabilise l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre dont notre mode de vie est responsable, tant dans notre pays que dans ceux dont on importe des biens de consommation. Le premier intérêt de la notion d'empreinte est qu'elle synthétise un grand nombre de données au sein d'indicateurs qui facilitent les comparaisons. Combien d'émissions de CO₂ pour un trajet en voiture ou en train ? Combien de planètes Terre seraient nécessaires pour soutenir notre mode de vie et de consommation ? De combien puis-je réduire mon empreinte eau en gaspillant moins de nourriture ? Son second intérêt est de s'appliquer aussi bien à une région, un pays, une entreprise qu'à une personne.

Concernant l'eau, l'estimation de notre empreinte a démarré grâce aux travaux sur l'eau virtuelle. Par-delà les débats suscités par ce concept, un vif intérêt s'est vite manifesté pour une meilleure compréhension des volumes d'eau nécessaires à notre mode de vie. Car si l'on pouvait réfléchir à la dépendance à l'eau externe des pays importateurs de nourriture, pourquoi ne pas étendre la réflexion à l'ensemble de nos consommations ? À l'intérêt pour l'approche se sont rapidement ajoutées des demandes de meilleure compréhension de nos impacts sur la qualité de l'eau, la logique de la notion d'empreinte étant de quantifier les impacts tant quantitatifs que

1. Ce jour de dépassement arrive toujours plus tôt dans l'année, vers la fin du mois de juillet ou au tout début d'août au début des années 2020.

qualitatifs de nos usages. Cette question de la quantification des impacts – comment rendre compte de manière quantitative de la dégradation de l'eau? – s'est révélée particulièrement ardue.

L'EMPREINTE EAU VOLUMIQUE

La méthodologie d'estimation de l'empreinte eau doit beaucoup aux travaux fondateurs d'Arjen Hoekstra et du Water Footprint Network, démarrés en 2002². L'empreinte eau de cette première version tentait d'aider les consommateurs ou les décideurs à appréhender les volumes d'eau requis ou affectés par la production de biens de consommation, par différents types de régimes alimentaires ou par l'ensemble des usages de l'eau d'un territoire. Cette empreinte devait comprendre à la fois la consommation d'eau bleue et celle d'eau verte, et d'autre part le volume d'eau polluée relâché dans les cours d'eau ou les nappes sans avoir été retraité. Ainsi étaient à la fois obtenues une vision d'ensemble des quantités d'eau bleue et verte évaporées et une estimation des quantités d'eau impactant les ressources en eau de surface ou souterraines. Ces volumes pollués et polluants ont été nommés l'empreinte eau « grise ». Ils tentaient de quantifier les volumes d'eau propre nécessaires à la dilution des polluants dans les eaux bleues, afin de maintenir ces dernières dans un bon

2. Voir <https://www.waterfootprint.org/about-us/aims-history/>

état écologique permettant de préserver les capacités d'autoépuration des milieux aquatiques. Très vite, les partenaires du réseau ont abandonné cette idée, étant donné le manque de connaissances et de données disponibles pour estimer ces volumes. L'empreinte eau grise s'est donc restreinte à l'estimation des volumes d'eau usée rejetés sans traitement par une station d'épuration.

Les volumes totaux de l'empreinte eau sont en général proches des volumes d'eau évoqués au chapitre précédent. Un kilogramme de viande de bœuf a une empreinte de l'ordre de 13 000 litres d'eau, un kilo de blé de l'ordre de 1 000 litres, un T-shirt en coton 2 700 litres. Mais l'apport de l'approche est de fournir dans un contexte donné la répartition de l'eau consommée en eau verte, eau bleue et eau grise. Il est par exemple possible de distinguer un bœuf produit avec de l'herbe d'un autre produit avec un régime à base de maïs et de tourteau de soja puisque le premier va être exclusivement produit avec de l'eau verte alors que le second va aussi contenir de l'eau bleue d'irrigation. De même tous les produits pour lesquels l'eau rejetée n'est pas traitée se distinguent par une empreinte en eau grise. Il est à ce propos important de se rappeler que l'empreinte eau volumique est fondée sur la consommation d'eau (les volumes d'eau évaporés au cours du processus de production), complétée par les volumes d'eau polluée rejetés dans les milieux aquatiques. La production d'eau potable ou tout usage rejetant une grande partie de l'eau usée après traitement a une empreinte faible. Mais c'est à ce prix que les usages peuvent être additionnés sans

que leur somme soit plus grande que la totalité de l'eau disponible.

Au regard de son origine liée à la notion d'eau virtuelle, l'approche volumique a conservé aussi la différenciation entre eau utilisée localement et eau des biens de consommation importés. Comme pour le carbone, il est ainsi possible de différencier l'empreinte interne de l'externe et donc l'empreinte de la production des biens de celle de leur consommation au sein d'un territoire³. Cette différence permet d'estimer le degré de dépendance du territoire à l'eau d'autres territoires.

L'empreinte volumique s'applique d'abord aux biens de consommation. Par agrégation, elle permet d'analyser et de comparer les empreintes eau de régions ou de pays, celles de différentes compagnies ou institutions, celles de différents modes de vie ou de consommation.

Pour finir, ajoutons que la méthode volumique donne des ordres de grandeur qui restent compatibles avec le sens commun, ce qui n'est pas le cas des approches plus sophistiquées que nous aborderons plus loin.

3. La différence entre ces deux empreintes est due aux empreintes des biens importés et exportés.

L'EMPREINTE EAU VOLUMIQUE DE LA FRANCE

De nombreux pays ou régions ont entrepris d'estimer leurs empreintes eau. Illustrons ici le cas de la France.

L'empreinte eau volumique de l'ensemble des biens produits en France a été estimée à 90 km^3 par an⁴, pour la période 1996-2005⁵, une valeur bien plus élevée donc que les prélèvements de $26,7 \text{ km}^3$ mentionnés dans l'Annexe 2 ainsi que les volumes d'eau consommés puisque incluant une empreinte eau grise due aux eaux non traitées rejetées dans les milieux naturels. De ces 90 km^3 , l'eau verte accapare 76 %, l'eau bleue 6 % et l'eau grise 17 %. L'importance de l'eau verte traduit le fait que notre production agricole repose surtout sur l'eau de pluie. Toutefois certaines régions, la Nouvelle-Aquitaine et l'Occitanie notamment, sont responsables d'une grande partie de l'empreinte eau bleue du pays, en raison de l'irrigation des cultures d'été. Les cultures sont responsables de 86 % de l'empreinte totale, bleue, verte et grise, les céréales à elles seules de la moitié. L'empreinte eau grise se partage entre l'industrie et l'agriculture pour l'essentiel puisque la majorité des eaux usées domestiques passent par une station d'épuration.

4. Cyrille Deshayé (dir.), « L'empreinte eau de la France », rapport WWF France, 2012.

5. Les valeurs obtenues pour cette période n'ont pas changé depuis dans de grandes proportions.

Une surprise de l'analyse vient de l'empreinte externe. La France importe l'équivalent de 78,3 km³ d'eau par an, une valeur proche de son empreinte de production. Pour quelle raison ? En premier lieu pour le coton de nos vêtements qui s'adjuge 22 % (17 km³) de cette eau virtuelle, dont une part importante d'eau d'irrigation en provenance de pays arides. Mais aussi pour le soja et ses produits dérivés comme les tourteaux, ainsi que pour la viande et les produits animaux. Une part essentielle (12 %) revient également aux produits industriels provenant de pays d'Asie, où les eaux usées sont peu traitées. Les échanges européens (céréales, fruits et légumes, viande) pèsent également lourd, notamment avec nos proches voisins, Espagne, Italie, Belgique.

Revenons ici sur le cas des T-shirts et vêtements en coton que nous consommons et jetons en grandes quantités. Un T-shirt, on l'a vu, requiert 2 700 litres d'eau qui se partagent en 1 200 litres d'eau bleue d'irrigation, 1 100 litres d'eau verte et contribuent à l'eau grise pour 400 litres. Ce coton provient en grande partie de pays chauds et arides comme l'Ouzbékistan où il requiert de grandes quantités d'eau d'irrigation. C'est son développement à grande échelle, initié du temps de l'URSS, qui a conduit à l'assèchement de la mer d'Aral auquel nous avons indirectement contribué. Les estimations de notre empreinte eau nous ont sensibilisés à ces enjeux sur lesquels nous allons revenir, et ont conduit progressivement à un changement des pratiques – notamment de recyclage – du secteur du prêt-à-porter ainsi que de nos modes de consommation.

La France exporte aussi des volumes d'eau virtuelle colossaux s'élevant à 65,5 km³ par an en moyenne. Cette empreinte, faite à 70 % d'eau verte, est issue pour 69 % des cultures, de céréales principalement, pour 19 % des produits animaux et pour 12 % des produits industriels.

Le bilan d'eau virtuelle était donc déficitaire de 12,8 km³ sur la période étudiée. Cette situation de dépendance du pays aux échanges internationaux est le propre de la plupart des pays européens, et notamment de ceux du nord de l'Europe qui n'ont pas les moyens de produire l'ensemble de leurs denrées alimentaires. La zone de libre-échange européenne a permis une forte interdépendance des pays européens qui ne se retrouve nulle part ailleurs dans le monde.

L'empreinte eau de consommation de la France est donc, en toute logique, supérieure à son empreinte de production et estimée à 106 km³ par an⁶, toujours en moyenne pour la même période. Rapporté au nombre d'habitants, ce volume est de 1 780 m³ par an, soit 4 800 litres d'eau par personne et par jour. Ces valeurs sont supérieures à la moyenne mondiale (2 900 litres) et sont conformes à celles de pays industrialisés échangeant de nombreux produits industriels et consommant une grande quantité d'aliments élaborés, avec une part importante de viande.

6. Le bilan comptable fait apparaître une légère différence entre la somme des 90 km³ d'empreinte de production et du déficit de 12,8 km³ d'eau virtuelle et les 106 km³ d'empreinte de consommation car il existe aussi des produits qui sont importés et réexportés (ou le contraire).

Les produits agroalimentaires constituent 87 % de l'empreinte de consommation, les produits animaux à eux seuls s'en emparant à hauteur de 44 % (34 % pour la viande, 10 % pour le lait). Les boissons, café, thé, bière et vin, viennent ensuite avec 13 % du total. Les fruits et légumes, essentiels constituants d'une nourriture saine, sont à la traîne avec seulement 3 % de l'empreinte. L'eau urbaine pèse 3 % de l'empreinte et les produits industriels 10 %.

Que tirer de cette analyse de l'empreinte eau volumique de la France ? Elle donne tout d'abord une idée des énormes quantités d'eau impliquées par notre mode de vie et nous rend sensibles au fait que l'eau que nous utilisons va bien au-delà de l'eau potable ou même de l'eau bleue que nous prélevons dans nos cours d'eau et nappes souterraines. Cette dernière ne représente qu'une faible part de l'empreinte, ce qui cache le fait que ces prélèvements ont lieu pendant les périodes chaudes et sèches en créant donc des tensions. En comparant l'empreinte eau de production avec les données du tableau b de l'Annexe 2, on note que les consommations d'eau bleue et verte sont proches de leurs empreintes. Une légère différence vient de la consommation directe du bétail que l'empreinte eau estime à $0,6 \text{ km}^3$. La principale différence entre les deux analyses tient aux eaux grises dont l'empreinte totale est estimée à près de 16 km^3 liés aux rejets d'eaux usées non traitées, et particulièrement ceux des centrales thermiques.

L'analyse souligne ensuite la forte interdépendance internationale de la France. Les nombreux biens agricoles et industriels importés et exportés ont des empreintes d'un ordre de grandeur proche de l'empreinte totale! Cette interdépendance est aussi une vulnérabilité, car une part non négligeable des pays dont nous importons les biens sont situés dans des régions arides. 11 des 15 bassins-versants contribuant le plus à l'empreinte eau bleue du pays sont dans cette situation. Dans un contexte instable d'augmentation de population, de conflits internationaux et de changement climatique, la production et les échanges commerciaux risquent fort de subir des soubresauts importants dans les années à venir. Construire notre résilience suppose d'analyser ces risques avec attention. C'est d'ailleurs la façon dont les compagnies multinationales utilisent l'empreinte volumique en eau. Elles souhaitent se prémunir des risques d'instabilité de leurs chaînes d'approvisionnement et des risques de réputation associés à un minage des ressources en eau.

Enfin et surtout, l'empreinte volumique ne fournit pas d'information précise sur les impacts de la consommation d'eau et tout particulièrement sur ceux de l'eau bleue. La seule introduction du concept d'eau grise, qui se traduit par des volumes d'eau rejetés sans traitement, ne suffit ni à quantifier ni à qualifier ces impacts. Initialement, les volumes d'eau grise devaient traduire les quantités d'eau nécessaires à une dilution des polluants permettant leur dégradation sans que ces derniers altèrent les écosystèmes aquatiques en place. Les connaissances disponibles n'ont

pas permis de développer cette approche qui a depuis été élaborée par l'empreinte eau multicritère.

L'EMPREINTE EAU MULTICRITÈRE

L'autre estimation de l'empreinte eau se fonde sur l'analyse de cycle de vie (ACV). Elle examine en détail chacune des étapes de la production et de l'utilisation d'un produit jusqu'à sa fin de vie. Beaucoup de travaux ont été menés ces dernières années pour développer des outils et des bases de données décrivant toutes ces étapes, leurs consommations de ressources, leurs rejets de substances polluantes⁷.

La méthode multicritère vise à corriger la faiblesse de l'évaluation des impacts sur l'eau de l'empreinte volumique. Elle se focalise en revanche sur l'eau bleue et ne prend en compte ni l'eau verte, dont l'impact sur l'eau ou les écosystèmes est à la fois variable et limité, ni l'eau grise puisque les impacts vont cette fois être évalués de manière beaucoup plus précise. Comme pour l'approche volumique, elle distingue des impacts quantitatifs et qualitatifs.

7. Une excellente présentation des concepts est disponible sur le site de la chaire en ACV Elsa-Pact : « L'empreinte eau - Memento graphique ». <https://www.elsa-pact.fr/Ressources/Guides-et-ouvrages/L-empreinte-eau-Memento-graphique>

Pour les premiers, elle se focalise sur la consommation d'eau bleue définie cette fois, non comme la quantité totale d'eau évaporée – qui pourrait intégrer de l'eau verte –, mais par la différence entre prélèvements et rejets d'eau bleue tout au long de la vie d'un produit. Les impacts quantitatifs sont le produit de ces volumes d'eau bleue consommés par des indices de rareté de l'eau de la région et de la saison de production.

Un des indices de rareté les plus utilisés est celui de la méthode *Aware*⁸ qui a examiné les différences entre l'eau bleue disponible et le total des prélèvements des activités humaines et des besoins des écosystèmes aquatiques⁹ pour tous les bassins-versants de la planète. La valeur moyenne de ces différences a reçu un indice de 1. L'indice *Aware* d'un bassin décrit l'écart en proportion entre ce bassin et la valeur mondiale. Il varie entre 0,1 pour un bassin riche en eau – pour lequel les prélèvements sont faibles par rapport à l'eau disponible – et 100 pour un bassin où les prélèvements sont élevés par rapport à l'eau disponible.

Après multiplication de la consommation d'eau bleue par des indices pouvant être très élevés, l'empreinte eau quantitative n'a plus de signification volumique tangible. Un T-shirt produit avec beaucoup d'eau irriguée, comme

8. Pour « Available WAtER REmaining », voir <https://wulca-waterlca.org/aware/what-is-aware/>

9. Les flux environnementaux évoqués au chapitre III.

c'est généralement le cas, peut par exemple avoir une empreinte quantitative de 42 m³ ¹⁰. L'objectif est ici de comparer des produits entre eux ou d'analyser les impacts sur la rareté en eau des différentes phases de la vie du produit pour faire des choix industriels ou de consommation.

Dans cette nouvelle approche, les impacts qualitatifs ne s'expriment plus en volumes, mais par une série d'indicateurs décrivant comment la qualité de l'eau est détériorée, soit directement par un rejet de polluants dans l'eau, soit indirectement par la pollution de l'air ou des sols. Les quatre catégories d'indicateurs utilisés ont trait à l'eutrophisation de l'eau (voir chapitre VII), à l'enrichissement de l'eau en éléments nutritifs azotés ou phosphorés, à l'acidification de l'eau et à l'apport d'éléments toxiques pour les milieux aquatiques ou pour les humains. Les indicateurs quantitatifs et qualitatifs peuvent être ensuite recombinaés pour générer des évaluations plus globales d'impacts sur la santé humaine, la santé des écosystèmes aquatiques ou sur la disponibilité des ressources en eau.

L'ensemble de l'évaluation est codifié au sein d'une norme (ISO 14046) qui permet à une estimation d'empreinte eau d'obtenir une certification.

10. Exemple tiré du Memento graphique de la chaire Elsa-Pact. L'impact volumique du T-shirt, basé sur l'eau bleue consommée, est de 1,340 m³, une valeur logiquement plus faible que celle de l'empreinte volumique dont 96 % est pour la production du coton. L'indice Aware moyen du coton est lui de 31,5, en moyenne. D'où la valeur de 42 m³.

L'empreinte eau multicritère est plus riche et complexe que l'empreinte eau volumique. Son résultat final n'est toutefois pas facile à comprendre pour les consommateurs. En revanche, sa rigueur et sa richesse en font un concept précieux pour comparer des produits, des techniques ou des localisations de production. Elle constitue donc un outil pour les utilisateurs professionnels de l'eau ou pour des associations de consommateurs soucieux de réduire leurs impacts sur l'eau bleue et les milieux aquatiques. Elle ne se substitue pas à l'empreinte volumique qui reste surtout un outil de sensibilisation sur les quantités d'eau requises par notre style de vie. Observons également que, vu le nombre et la complexité des données requises, l'agrégation des empreintes eau multicritères de tout un territoire ou d'un style de vie (par exemple végétarien ou carnivore) serait quasi impossible et sans doute sans grand intérêt étant donné la diversité des produits à analyser. L'empreinte eau multicritère est avant tout un produit utile aux comparaisons, ce qui justifie l'énorme travail de codification de la norme ISO développée. Dès lors qu'un style de vie utilise des produits ayant des cycles de vie variés, l'addition d'une série d'empreintes aux impacts différents ne ferait pas grand sens. Pour un territoire en revanche, l'addition des empreintes de l'ensemble des productions qu'il abrite serait utile.

EMPREINTE DE PIED, EMPREINTE DE MAIN ?

Par-delà les débats d'école, il faut revenir à l'essentiel. La notion d'empreinte va plus loin qu'une simple quantification de nos usages de l'eau. L'empreinte volumique crée un cadre de quantification qui différencie les types et l'origine de l'eau. L'empreinte multicritère corrige le manque d'analyse des impacts de l'empreinte volumique. Les deux se complètent et visent à nous aider à évaluer et à corriger nos impacts. On pourrait d'ailleurs imaginer une empreinte de synthèse combinant une partie volumique excluant l'eau grise, et fournissant une métrique holistique de nos usages, et une partie descriptive des impacts fondée sur l'approche multicritère.

Encore faudrait-il mieux intégrer les impacts de l'utilisation d'eau verte dans la démarche. À ce propos, il est intéressant de noter que les impacts de nos usages d'eau verte et d'eau bleue sont totalement différents. Utiliser de l'eau bleue réduit sa disponibilité pour d'autres utilisateurs, crée potentiellement des pénuries, induit des pollutions de cette eau. Par contraste, utiliser de l'eau verte impacte peu l'eau, mais a des conséquences sur l'utilisation des terres. Notamment dans les pays où l'eau verte est associée à une faible productivité agricole, dont une des conséquences peut être la déforestation ou la dégradation d'écosystèmes naturels. Il est aujourd'hui essentiel pour de nombreux pays de résoudre ce dilemme cornélien : intensifier et réguler la production agricole en créant des risques de pénuries d'eau bleue ou rester dépendant

de pluies irrégulières, et dégrader davantage de terres et de milieux qui jouent souvent un rôle important dans la régulation de l'eau et du climat.

Observons aussi que l'angle d'attaque des analyses d'empreinte est généralement négatif : les impacts sont des dégradations de nos milieux et de nos ressources. Les anglophones ont deux termes différents pour désigner les empreintes : ils distinguent l'empreinte de pied (*footprint*) de l'empreinte de main (*handprint*). C'est le terme d'empreinte de pied qui est utilisé pour décrire les impacts négatifs de nos actions. Dès lors, pourquoi ne pas utiliser le terme d'empreinte de main (*handprint*) pour décrire les impacts positifs de nos actions visant à l'amélioration de la qualité de nos milieux et de nos ressources ?

Des chercheurs de l'université de Harvard¹¹ ont initié un mouvement global qui nous incite à dépasser l'estimation de nos empreintes en la complétant par une quantification des bénéfiques de nos « bonnes actions » sous forme d'une empreinte de main. Chaque personne, entreprise, territoire, pourrait ainsi obtenir une mesure plus motivante de ses différents usages de l'eau.

11. Voir Gregory A. Norris, "Introducing Handprints: A Net-Positive Approach to Sustainability", blog Harvard Extension School, 30 novembre 2017. <https://extension.harvard.edu/blog/introducing-handprints-a-net-positive-approach-to-sustainability/>

Grâce aux travaux en cours sur notre empreinte eau, nous commençons à avoir des outils pour mieux comprendre les multiples dimensions et impacts souvent variables de nos usages. Ces outils permettent de prendre conscience des volumes en jeu, des types d'eau utilisés, des conséquences de nos productions et de nos consommations, des interdépendances entre régions ou pays. De nombreuses surprises sont au rendez-vous qui nous permettront de progresser si nous nous donnons les moyens d'agir ou de réagir.

L'état des lieux des ressources et des approches de cette première partie permet de mieux comprendre comment l'eau circule sur la planète et comment nous l'utilisons. Le panorama dressé est forcément incomplet et mériterait d'autres développements, notamment sur les services d'eau potable et d'assainissement, la gestion intégrée et transfrontalière des ressources, le dessalement d'eau de mer ou la réutilisation des eaux usées.

Globalement, la planète ne manque pas d'eau, mais cette eau est essentiellement salée. La faible proportion d'eau douce que le cycle de l'eau génère est mal répartie et, comme nous le verrons, risque de l'être de plus en plus mal. Pourtant, nous découvrons que la vision d'un cycle de l'eau réduit aux échanges d'eau entre océans et continents est réductrice. Un recyclage important se produit sur ces derniers, qui démultiplie l'eau douce disponible.

Ce recyclage dépend du fonctionnement de la biosphère, de son évaporation, de sa capacité à générer de la pluie et même à créer une aspiration d'eau en provenance des océans.

Le contexte étant posé, nous examinerons dans la partie suivante les grands défis planétaires associés à l'eau qui, souvent, se combinent en créant de la confusion. Sécheresses, pénuries, dérèglement climatique et événements extrêmes : nous nous attacherons davantage aux aspects physiques de ces phénomènes, non sans évoquer les conséquences économiques et sociales qui en découlent.

DEUXIÈME PARTIE
LES CAUCHEMARS
DE L'EAU

VI. SÉCHERESSES ET PÉNURIES D'EAU

Le développement de l'agriculture au néolithique a été à la fois synonyme d'abondance accrue de nourriture et d'accroissement des risques pour l'humanité. La démographie s'est emballée et les activités humaines se sont diversifiées. Mais l'amélioration de l'efficacité agricole s'est aussi accompagnée d'une plus grande vulnérabilité aux sécheresses et aux pénuries alimentaires.

LES FAMINES, MENACES EXISTENTIELLES POUR L'HUMANITÉ

Une analyse des catastrophes de la première moitié du xx^e siècle¹ montre que le temps des famines n'est pas si lointain. Ces dernières ne sont pas les catastrophes les plus fréquentes, mais elles sont les plus meurtrières avec les grandes épidémies. Au cours de cette période, seules

1. Les données sur lesquelles s'appuie ce chapitre proviennent de la base de données mondiales des catastrophes naturelles et technologiques Emergency Events Database EM-DAT, https://climate-adapt.eea.europa.eu/fr/metadata/portals/em-dat-the-international-disaster-database-year-of-launch?set_language=fr, pour la période 1900-1960.

2 % des catastrophes répertoriées étaient des famines, mais elles ont représenté plus d'un tiers des décès².

Cette dangerosité des sécheresses et des famines associées a fortement marqué l'humanité. Elle a été au cœur de la réflexion des économistes, et de Malthus en particulier, dès le XVIII^e siècle. Pour ce dernier, le rythme de croissance de la population en conditions de vaches grasses est plus rapide que celui de la production alimentaire. Dans les périodes de vaches maigres, les personnes les plus fragiles sont inéluctablement exposées à la faim. Il préconise donc de réguler les naissances et de mettre en place des mécanismes de soutien aux plus vulnérables. Depuis le XVIII^e siècle, les économistes ont évolué dans leurs analyses, mais il est intéressant de noter les relations étroites entre la disponibilité en eau et en nourriture et la densité et la croissance de la population. Les famines et les grandes épidémies ont longtemps joué un rôle important dans les équilibres entre capacité de production et démographie et ont, d'une certaine manière, conforté l'approche malthusienne. Depuis la Seconde Guerre mondiale, il semble que nous soyons sortis du piège malthusien. Le risque de famine a diminué grâce à l'augmentation régulière de la production et des rendements permise par l'amélioration des plantes et l'utilisation des engrais de synthèse (qui ne sont pas sans effets pervers). Et ce malgré une augmentation exponentielle de la population mondiale.

2. L'Asie est de loin le continent le plus touché alors que l'Europe, Russie incluse, est largement épargnée.

LE PHÉNOMÈNE EL NIÑO, UN AMPLIFICATEUR DE RISQUE

Ce n'est que récemment, grâce aux progrès de la recherche sur le climat, que l'on a compris qu'un des facteurs clés des catastrophes climatiques était l'oscillation australe couramment nommée «phénomène El Niño». Cette oscillation passe par deux phases contrastées. Une première pendant laquelle des quantités d'énergies colossales se stockent dans l'océan Pacifique à proximité des Philippines. La température de l'eau peut alors devenir supérieure à 20 °C sur 200 mètres d'épaisseur. Cette phase est appelée La Niña. Des processus complexes d'interactions entre l'océan et l'atmosphère conduisent à la seconde phase, un transfert brutal de cette eau chaude vers les côtes de la Bolivie et du Pérou autour de Noël, d'où le nom donné au phénomène, El Niño, qui fait référence à Jésus. L'arrivée de cette eau chaude est une véritable catastrophe pour les écosystèmes côtiers d'Amérique du Sud habitués à une eau beaucoup plus fraîche. Elle réduit les remontées d'eaux riches en nutriments qui, dans cette région, permettent aux populations de poissons et notamment d'anchois de prospérer. Leur production chute drastiquement avec des conséquences en cascade jusque dans nos assiettes. Les côtes péruviennes et boliviennes, sèches pendant La Niña, sont alors soumises à des pluies torrentielles et à des inondations souvent catastrophiques.

L'oscillation australe est une caractéristique importante du climat de la planète, identifiée sur des fossiles de coquillages de 130 000 ans d'âge, qui semble s'être intensifiée depuis le début de l'holocène. La quantité

d'énergie libérée lors des années El Niño est telle que l'ensemble du climat de la planète est affecté. Des sécheresses graves peuvent se produire en Inde, en Chine, en Afrique australe ou au Brésil. A contrario les côtes ouest du continent américain sont anormalement humides. El Niño se produit plus fréquemment aujourd'hui, tous les 4 ans environ, que par le passé où on l'observait plutôt tous les 10 ou 12 ans. Il dure une ou deux années et est rapidement suivi par La Niña. La température moyenne de la planète est plus élevée lors des épisodes intenses d'El Niño.

El Niño a commencé à intriguer les géographes à la fin du XIX^e siècle, lorsqu'ils ont réalisé la concomitance de différents phénomènes météorologiques avec cet afflux d'eau chaude vers les côtes du Pérou. Mais il a encore fallu plusieurs décennies, jusqu'à la fin des années 1960, pour qu'une description d'ensemble d'El Niño soit formulée³. Depuis lors, une batterie d'instruments scrute l'évolution des anomalies de températures de l'océan Pacifique austral afin de prédire l'apparition du phénomène qui se montre souvent capricieux et d'intensité variable. Aujourd'hui encore, il reste impossible à prévoir plus de six mois à l'avance.

Les historiens ont aussi recherché ses traces et ont trouvé des résultats étonnants. Au cours des derniers siècles, 55 El Niño forts ont été enregistrés entre 1525

3. Voir Brian Fagan, *Floods, Famines and Emperors: El Niño and the fate of Civilizations*, New York, Basic Books, 1999.

et 2000 avec des conséquences souvent dramatiques. Les mieux documentés sont ceux de la dernière décennie du XIX^e siècle que Mike Davis décrit dans *Génocides tropicaux*⁴. Ces événements ont dérégulé la mousson en Inde au point de provoquer autour de 30 millions de morts. Ils ont également provoqué une famine en Chine avec un nombre de victimes très élevé, ainsi qu'au Brésil. Mike Davis analyse dans le détail la géographie et la chronologie de ces événements. Il décortique aussi le rôle aggravateur des exportations de nourriture en provenance des pays colonisés, tout particulièrement en Inde.

El Niño semble aussi avoir été à l'origine de cataclysmes ayant provoqué l'effondrement de dynasties de pharaons en Égypte, la destruction de civilisations entières au Pérou, la chute de l'empire Maya ou encore ayant changé le cours de l'histoire européenne⁵.

Même dans une ère aussi stable que celle de l'holocène, la variabilité du climat a été suffisamment importante pour déstabiliser des sociétés, et ce, malgré une population planétaire réduite. Plus les sociétés se sont sédentarisées et développées économiquement, plus elles sont devenues vulnérables aux événements extrêmes et en particulier aux sécheresses qui peuvent toucher des continents entiers. L'adaptation aux péripéties du climat s'est faite par des migrations facilitées par la faible densité

4. Mike Davis, *Génocides tropicaux. Catastrophes naturelles et famines coloniales. Aux origines du sous-développement*, La Découverte, 2003.

5. Brian Fagan, *op. cit.*

de population. C'est ainsi que l'humanité et les écosystèmes ont réagi face au récent assèchement du Sahara, passé d'un climat relativement humide il y a encore 8 000 ans au désert qu'il est devenu il y a 5 000 ans⁶. Une bonne partie des humains d'alors se sont repliés sur la vallée du Nil dont l'importante population aurait suscité l'émergence d'une société organisée.

SÉCHERESSES OU PÉNURIES ?

Depuis la seconde moitié du xx^e siècle, la variabilité du climat engendre des difficultés d'adaptation fortes pour l'humanité en raison de l'augmentation vertigineuse de la population humaine, passée de 2,5 milliards en 1950 à 6 milliards d'individus en 2000. Plus question, dans ces conditions, de migrer dans des régions plus propices, même si, nous l'observons tous les jours, la tentation est grande de choisir cette approche.

Cette croissance a aussi été permise par l'augmentation des prélèvements d'eau bleue de 1 250 km³ à 5 000 km³ par an, l'agriculture passant à elle seule de 1 000 à 2 500 km³ de prélèvements comme nous l'avons vu au chapitre III. Ces ponctions ont été facilitées par la construction de plus de 800 000 retenues, dont 5 000 grands barrages, sur les

6. La région du Sahara a oscillé lors des derniers millions d'années entre périodes humides et périodes sèches en relation avec les alternances de glaciation et de réchauffement de la planète. Voir Wikipédia, l'encyclopédie libre : « Dernière période pluviale du Sahara », 11 mai 2023. https://fr.wikipedia.org/wiki/Dernière_période_pluviale_du_Sahara

fleuves, afin de produire de l'électricité et de permettre l'irrigation, ce qui s'est souvent fait dans la douleur pour les populations déplacées ou affectées. Les impacts de ces ouvrages sont nombreux sur les écosystèmes aquatiques adaptés à la succession de hautes et basses eaux, sur les poissons d'eau douce habitués à frayer dans les parties amont des bassins-versants, sur les deltas et les zones côtières recevant moins d'eau et moins de sédiments. Ils touchent en cascade des pans entiers de l'économie traditionnelle des régions situées en aval. Ces barrages ont pourtant joué un rôle important pour le développement économique et la sécurité alimentaire ainsi que pour la production d'énergie peu carbonée.

Mais prélever davantage d'eau bleue a pour conséquences de générer des pénuries d'eau qui sont à distinguer des sécheresses, car elles ne résultent pas d'insuffisants apports d'eau, même si l'aridité les exacerbe, mais d'un développement non contrôlé des prélèvements d'irrigation et d'une mauvaise gestion de l'eau agricole. Lorsque les barrages sont utilisés comme infrastructure d'irrigation, les débits des fleuves diminuent de l'amont vers l'aval – à l'inverse du schéma classique – au fur et à mesure des prélèvements qui, contrairement à ceux des barrages hydroélectriques ou des centrales thermiques, finissent en grande partie évaporés. Des pénuries d'eau ont alors tendance à se manifester, en partant de l'aval. De nombreux bassins tendent d'ailleurs à *se fermer*, terme consacré pour les fleuves ne déversant plus aucune eau

douce à la mer⁷. C'est le cas de ceux du Nil ou du Colorado. De nombreux autres bassins sont menacés et ne déversent plus d'eau pendant plusieurs mois de l'année, notamment au Mexique, en Inde, en Iran et en Afrique du Nord⁸.

LE CAS DU FLEUVE JAUNE

L'histoire du fleuve Jaune (le *Huang He* en chinois) est à ce propos particulièrement éclairante. Le nord de la Chine est bien plus sec que le sud, avec des précipitations ne dépassant pas 400 mm par an et une irrégularité du climat qui fait du fleuve Jaune un des plus capricieux qui soient. Il peut tout aussi bien être affecté par des pénuries dramatiques que générer des inondations meurtrières. L'une d'elles en 1887 submergea des centaines de villes et villages et causa la mort de 900 000 personnes⁹. Pour les éviter, des digues ont été élevées depuis plus de mille ans, de plus en plus hautes, pour tenir compte du dépôt incessant de limons arrachés au grand plateau de loess que le fleuve traverse et qui lui donnent sa couleur et son nom.

7. On trouvera une analyse des processus et des impacts de la fermeture des bassins fluviaux dans François Molle et al., "River basin closure: Processes, implications and responses", *Agricultural Water Management*, vol. 97, avril 2010. https://www.researchgate.net/publication/223450647_River_basin_closure_Processes_implications_and_responses

8. Pour plus de détails : Comprehensive assessment of water management in agriculture, "Opening up options in closing river basins", *Water for food, Water for life*, n° 4. https://www.iwmi.cgiar.org/assessment/files_new/publications/Discussion_Paper/CA_Issue_Brief-4.pdf

9. Voir John H. Lienhard, "The Yellow River", *The Engines of Our Ingenuity*, Houston Public Media. <https://www.uh.edu/engines/epi1626.htm>

Les digues constituent une protection, mais aussi une faiblesse, car le lit du fleuve s'élève et finit par se retrouver au-dessus de la plaine qu'il traverse¹⁰. Malheur aux habitants qui y vivent si la crue est trop forte ou si les digues se rompent ! L'histoire se souvient qu'en 1938, pour stopper l'avancée de ses ennemis japonais, l'armée de Tchang Kaï-chek décida de sacrifier quelques digues. L'inondation qui s'ensuivit ralentit quelque peu la progression japonaise, mais au prix de la vie de centaines de milliers de victimes.

Dans la seconde moitié du xx^e siècle, les grands barrages, une bonne vingtaine, et les réservoirs, 10 000 environ, ont bourgeonné tout au long du fleuve pour stocker une bonne année d'écoulements, quelques 60 km³, afin de produire de l'énergie et de bénéficier à l'agriculture¹¹. Au fur et à mesure de leur mise en eau, les débits à l'aval ont baissé, obligeant les paysans de la province la plus en aval, le Shandong, à des trésors d'ingéniosité pour capter la moindre goutte d'eau. Ainsi les systèmes de drainage et d'irrigation se sont interconnectés au moyen d'une multitude de canaux hybrides permettant le stockage, la collecte et la redistribution de toute l'eau disponible. Le principe de la gestion de l'eau du fleuve aménagé a d'abord été assez simple : où que l'on se trouve, il s'agissait d'acaparier toute eau disponible et, par voie de conséquence,

10. C'est le cas de bien d'autres fleuves et notamment du Mississippi. Voir à ce sujet les descriptions d'Erik Orsenna dans *La Terre a soif*, Fayard, 2022.

11. Voir la description complète du fleuve Jaune dans sur le site de l'Association Initiatives pour l'avenir des grands fleuves. <https://www.initiativesfleuves.org/fleuves/fleuve-jaune/>

d'en laisser le moins possible aux utilisateurs situés en aval, soit le terrain idéal pour être source de problèmes à l'avenir. Et ce fut le cas dans les années 1990. Le bassin du fleuve commença à se fermer progressivement, le lit du fleuve étant à sec pendant des périodes de plus en plus longues et sur une distance par rapport à la mer de Bohai, où il se jette, de plus en plus grande. Le summum fut atteint en 1997 : le fleuve resta à sec pendant trois cents jours et sur 600 km à partir de son embouchure.

La Commission de conservation du fleuve Jaune (Yellow River Conservancy Commission) s'est emparée du problème et a rapidement imposé une régulation des prélèvements afin de rétablir un partage de l'eau équitable entre les utilisateurs de l'amont et de l'aval et d'assurer qu'un minimum de 5 km³ d'eau parvienne chaque année à l'embouchure du fleuve. Ce volume ne représente qu'un dixième du débit moyen attendu du fleuve en l'absence de prélèvements, mais il est essentiel pour réduire la multitude de problèmes que les pénuries d'eau ont générées en aval : réduction de la production piscicole et conchylicole issue du delta et de la zone côtière, qui fournit habituellement une bonne part des consommateurs de l'Est de la Chine; insuffisance de l'exportation des limons vers l'océan, augmentant les dépôts dans le lit du fleuve et les risques de défaillance des digues; et pénuries d'eau pour l'ensemble de ses utilisateurs.

Les actions de la Commission ont été couronnées de succès et les pénuries ont cessé. Il était sans doute temps, car, en utilisant trop d'eau, les utilisateurs de l'amont du bassin avaient déclenché d'autres problèmes. Ils avaient

rechargé les nappes phréatiques des périmètres irrigués au point de les faire affleurer. Erreur impardonnable pour les sols : l'évaporation qui se limite normalement à puiser dans le stock d'eau verte du sol se met à pomper dans la nappe en déposant tous les sels de cette dernière en surface. Des centaines de milliers d'hectares ont alors été recouverts d'une couche de sel qui empêchait toute culture ! La réparation des sols salinisés prend au moins dix ans, car il faut faire baisser le niveau des nappes tout en lessivant les sels progressivement grâce à... des apports d'eau.

Ce phénomène de salinisation des zones irriguées a été un véritable fléau au cours des dernières décennies du xx^e siècle. Des apports d'eau d'irrigation excessifs ont généré un peu partout dans le monde les mêmes problèmes : remontée des nappes conduisant à leur affleurement à la surface des sols dans les zones moins élevées des périmètres irrigués et à la salinisation empêchant toute agriculture. Heureusement, les agriculteurs ont appris à se débarrasser des sels par des amendements des sols, des cultures tolérantes et des apports d'eau de lessivage. Très vite, ils ont compris que ces nappes étaient aussi une opportunité. On a alors vu fleurir un peu partout des milliers de petites pompes qui ont redonné de la souplesse aux pratiques d'irrigation, ont abaissé le niveau des nappes et réduit les risques de salinité. Le pompage d'eau dans les nappes souterraines s'est tellement développé qu'il constitue désormais une menace invisible pour l'irrigation et la sécurité alimentaire mondiale. On estime que l'excès de pompage diminuait dans les années 2010 de 256 km³ d'eau par an les volumes d'eau contenus dans les nappes

souterraines de la planète¹². Cette diminution, bien documentée par des mesures satellitaires, a des conséquences dévastatrices pour de nombreux petits agriculteurs obligés d'approfondir régulièrement la profondeur de leurs pompes. Elle fait peser une grave menace sur la durabilité de la gestion des ressources en eau et sur la sécurité alimentaire mondiale. L'Inde, le Pakistan et les États-Unis sont parmi les pays les plus touchés. Dans certaines régions de l'Inde, cette tension a provoqué de nombreux suicides.

ESTIMATION DU STRESS ET DES RISQUES

Fleuve Jaune, mer d'Aral, Colorado et bien d'autres : les exemples de pénuries d'eau bleue provoquées par des prélèvements excédentaires d'eau d'irrigation ne manquent pas. Ils illustrent le fait que la crise de la disponibilité en eau oscille aujourd'hui entre deux situations contrastées : d'un côté le manque de précipitations, qui génère des sécheresses, de l'autre l'excès de prélèvements et de consommation d'eau bleue qui crée des pénuries. Dans la plupart des cas, c'est un mélange de ces deux phénomènes qui se produit. De nombreux pays, de nombreux bassins-versants puisent dans leurs cours d'eau ou nappes souterraines la majeure partie de l'eau bleue disponible. La part consommée est d'autant plus importante que le climat est aride, car cette eau sert alors surtout à irriguer.

12. Yoshihide Wada *et al.*, "Nonsustainable groundwater sustaining irrigation: A global assessment", *Water Resources Research*, janvier 2012. <https://doi.org/10.1029/2011WR010562>

Plus il fait chaud, plus il fait sec et moins l'eau bleue abonde, mais plus il en faut pour les cultures.

Les cartes mondiales les plus courantes prennent en compte classiquement trois classes de stress sur les ressources en eau bleue, en examinant le rapport entre l'offre et la demande moyennes. Lorsque les prélèvements sont inférieurs à 20 % des quantités d'eau disponibles, le stress et donc le risque de pénurie sont faibles ; lorsqu'ils sont compris entre 20 % et 40 %, le stress est modéré ; entre 40 % et 80 %, le stress est fort et des pénuries sont fort probables ; au-delà de 80 %, la pression est très forte et l'eau ne suffit plus à couvrir les besoins. Ces classes sont des indicateurs de risque qui n'intègrent toutefois pas la proportion d'eau rejetée vers les nappes ou les cours d'eau après usage. Les cartes de stress obtenues pour les différents bassins-versants du monde¹³ révèlent que le risque est élevé non seulement dans les pays arides, mais aussi dans des régions plus tempérées où les prélèvements sont supérieurs à 40 % des quantités disponibles. En France, la Loire et le Rhin appartiennent ainsi aux bassins à risque élevé. Tout le sud de l'Italie et de l'Espagne émerge à la catégorie de stress absolu.

Récemment, grâce aux progrès des travaux sur l'empreinte eau, l'importance de la proportion d'eau consommée par rapport à l'eau totale prélevée a pu être prise en compte et une batterie de nouveaux indicateurs de stress

13. Voir par exemple le *Aqueduct Water Risk Atlas* élaboré par le World Resources Institute (WRI). <https://www.wri.org/aqueduct>

est apparue. Citons en deux qui nous paraissent les plus novateurs.

La méthode Aware¹⁴ (voir chapitre V) compare l'eau résiduelle disponible d'un bassin-versant avec la moyenne mondiale, en tenant compte de la taille de ce bassin. Son indicateur varie de 0,1 pour un bassin riche en eau, à 100 pour un bassin souffrant d'un déficit important.

La méthode Wave¹⁵ part de la même logique, mais introduit en plus le recyclage de l'eau verte au sein du bassin dans son indicateur de réduction de la disponibilité en eau. L'eau verte évaporée peut être recyclée au sein d'un bassin-versant comme évoqué au chapitre II. Le pourcentage de l'eau évaporée recyclée au sein du même bassin-versant varie entre 0 % dans les régions du Sahel et 32 % dans le bassin du Congo. Il est aussi élevé en Amazonie et dans les bassins la jouxtant, ainsi que dans le sud de l'Himalaya et en Asie du Sud-Est. Dans les régions dépourvues de forêts ou de montagnes, il ne dépasse pas 1 %.

Ces indicateurs donnent une idée des risques de pénurie qu'il faudrait pondérer par la probabilité d'apparition de sécheresses et par la capacité de résilience des sociétés

14. Anne-Marie Boulay *et al.*, "The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE)", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, février 2018. <https://wulca-waterlca.org/aware/what-is-aware/>

15. Markus Berger *et al.*, "Water Accounting and Vulnerability Evaluation (WAVE): Considering Atmospheric Evaporation Recycling and the Risk of Freshwater Depletion in Water Footprinting", *op. cit.*

humaines¹⁶. Les activités humaines s'adaptent en effet aux conditions locales avec beaucoup d'ingéniosité comme le démontrent les agriculteurs du delta du fleuve Jaune. Que survienne une sécheresse et les conséquences seront d'autant plus sérieuses que la pression sur les ressources moyennes était forte. Pour avoir une idée de la probabilité des sécheresses, on peut s'appuyer sur la variabilité interannuelle des quantités d'eau bleue¹⁷. On examine les séries de précipitations annuelles, leur moyenne et la manière dont les données s'écartent de cette moyenne. Lorsque l'écart-type ne dépasse pas un quart de la moyenne, la variabilité est faible. Lorsque, au contraire, il est du même ordre de grandeur que la moyenne, la variabilité est forte. À cette aune, les régions arides sont encore à la peine puisque la variabilité y est aussi la plus grande. Mais d'autres régions comme le nord de l'Europe, l'Himalaya ou les régions côtières du Pérou et de la Bolivie directement impactées par El Niño font face également à des variabilités élevées. Les régions tempérées sont, quant à elles, relativement épargnées.

16. Le risque est en général défini par le produit d'un aléa (la probabilité d'apparition d'une sécheresse) et d'une vulnérabilité (le niveau de pression sur les ressources) pondéré par la faculté de réponse de la société à cet aléa. Aucun indicateur utilisant cette approche ne semble avoir été développé à ce jour.

17. L'application Aqueduct du World Resources Institute (*op. cit.*) fournit cette information: https://www.wri.org/applications/aqueduct/water-risk-atlas/#/?advanced=false&basemap=hydro&indicator=iav_cat&lat=0.17578097424708533&lng=27.949218750000004&mapMode=view&month=1&opacity=0.5&ponderation=DEF&predefined=false&projection=absolute&scenario=optimistic&scope=baseline&timeScale=annual&year=baseline&zoom=2

LE BILAN HYDRIQUE DES SOLS, UN RÉGULATEUR ESSENTIEL

Les ressources en eau bleue de la France sont relativement confortables (voir chapitre III) et leur variabilité interannuelle est faible, légèrement supérieure dans la partie ouest de la France par rapport à l'est¹⁸. Le stress occasionné par les prélèvements, effectués principalement par le secteur de l'énergie, est élevé (seuil supérieur à 40 %) dans le bassin de la Loire, dans la région Poitou-Charentes et dans le nord de la France. En revanche, comme on pouvait s'y attendre, les indicateurs de réduction de disponibilité s'appuyant sur les consommations – et donc associés à l'agriculture – restent à des niveaux moyens ou bas. La situation française se situe également dans la norme européenne si l'on exclut le sud de l'Espagne et la majeure partie de l'Italie, où le stress est plus marqué.

Le risque de sécheresse dépend lui du bilan pluie-évaporation qui mérite un examen sérieux. Nous avons une perception intuitive de la pluie, mais beaucoup moins de l'évaporation, qui est un phénomène multifactoriel, sensible à la température, à l'humidité de l'air, ainsi qu'à la quantité d'eau disponible en un endroit donné. On peut facilement mesurer ce qu'on appelle la demande d'évaporation ou l'évaporation potentielle, mais plus difficilement l'évaporation réelle, qui est inférieure à la première car l'eau n'est pas toujours disponible, à part dans les piscines,

18. Cf. *Aqueduct*, *op. cit.*

les lacs ou les cours d'eau. L'évaporation potentielle d'un sol cultivé peut atteindre 5 à 6 mm par jour¹⁹ par une journée ensoleillée. Pour un mois ensoleillé et chaud, le total peut donc monter à 100-150 mm, ce qui est généralement plus que les précipitations qui, en dehors d'événements extrêmes, s'élèvent à quelques dizaines de millimètres – souvent moins en été. Face à cette différence entre les deux termes du bilan, le stock d'eau accessible dans le sol joue un rôle de régulateur. Tant qu'il permet de répondre à la demande évaporative, le sol se dessèche et ce d'autant plus que les racines des plantes explorent bien le sol et atteignent de grandes profondeurs. Ainsi, une culture courante comme une céréale d'hiver épuise-t-elle en général la majeure partie de l'eau du sol dès la fin du printemps. Les forêts peuvent en revanche puiser plus profondément que la plupart des cultures, à l'exception de la vigne, et passent ainsi l'été sans problème. On comprend que les cultures d'été comme le maïs ou le tournesol, dont les racines n'ont pas le temps de s'implanter profondément, aient besoin d'irrigation !

Mais que se passe-t-il quand le stock d'eau s'épuise ? Il ne peut alors plus fournir l'évaporation potentielle : l'évaporation réelle diminue et, si le sol se dessèche trop, les plantes flétrissent et ne parviennent plus à pomper l'eau. À partir de ce moment, l'énergie du soleil arrivant au sol n'est plus utilisée par l'évaporation et se met à réchauffer

19. Soit 5 à 6 litres d'eau par mètre carré.

l'air et le sol. Voilà pourquoi, lors des sécheresses, il fait plus chaud à ensoleillement égal, sauf là où la végétation parvient à continuer à évaporer de l'eau !

Le stock d'eau verte du sol est essentiel au bon fonctionnement des écosystèmes et de la planète. Il varie entre 100 et 200 mm²⁰ d'eau, l'équivalent de 2 à 4 mois de pluie dans de nombreuses régions françaises. Son état de remplissage suit un cycle régulier : à l'automne, il se reconstitue progressivement en 3 à 4 mois. Pendant l'hiver et jusqu'à la mi-mars, il reste plein. Puis le déstockage démarre avec la reprise de la croissance des plantes et continue tant que de l'eau peut être puisée par des racines. La demande d'évaporation étant en tendance supérieure aux apports de pluie dès le printemps, le stock d'eau du sol ne se reconstitue pas avant la fin de l'automne. Ce n'est que lorsqu'il est plein que les apports de pluie peuvent réalimenter les nappes souterraines, et ce, donc, uniquement pendant les deux à trois mois d'hiver. Ces mois sont essentiels à la reconstitution des stocks souterrains qui vont soutenir les écoulements des cours d'eau en été ou être disponibles dans les aquifères. Sans pluie pendant que le réservoir est plein, le manque d'eau bleue risque d'apparaître dès le printemps, alors même que les sols n'ont pas encore été vidés de leurs stocks. Les pénuries d'eau bleue sont possibles même sans sécheresse importante. Mais toutes deux ont l'art de s'articuler

20. Soit 100 à 200 litres d'eau par mètre carré.

et de générer de véritables cercles vicieux qui peuvent se prolonger sur plusieurs années, car la sécheresse des sols les rend peu perméables, particulièrement s'ils restent dénudés après les récoltes. Les pluies d'automne risquent alors de ne pas s'infiltrer facilement et de ruisseler en érodant les sols, ce qui retarde le remplissage du stock. D'où une réduction possible de la recharge des nappes qui se répercute sur l'année suivante. Il faut parfois plusieurs années avant qu'un régime normal se remette en place.

EAU VIRTUELLE ET PÉNURIES

Retournons maintenant en Chine et essayons de mieux comprendre l'origine des pénuries du fleuve Jaune alors que le pays est riche en eau dans toute sa partie sud. Cette apparente aberration trouve pour partie son explication dans... l'abondance de l'eau justement. Le sud de la Chine est au cœur de la production du riz et les fermes peuvent y produire jusqu'à trois récoltes par an alors que le nord a depuis longtemps adapté sa production à la plus grande rareté de l'eau. Il produit plutôt du millet, du blé et du maïs. Dans le bassin du fleuve Jaune, on ne produit qu'une seule récolte par an, parfois une et demie en mélangeant maïs et blé. Pour nourrir une famille, les fermes du bassin du fleuve Jaune sont donc plus grandes que celles du sud. Elles couvrent souvent entre 5 et 7 hectares, contre 1,5 à 2 hectares pour celles du sud. La conséquence est double : la densité de population au sud-est bien plus forte qu'au nord et la capacité d'intensifier et d'augmenter la production agricole au sud-est faible.

Au moment où la transition démographique²¹ a touché la Chine et a augmenté sa population, dans la seconde moitié du xx^e siècle, il a été difficile aux exploitations du sud d'augmenter leur production. La forte densité de population initiale a produit un exode rural important qui a alimenté la croissance de la population des villes du sud de la Chine, population qu'il a fallu nourrir. Or le nord du pays, et le bassin du fleuve Jaune en particulier, avait de la marge pour intensifier sa production. Mais il fallait pour cela mobiliser plus d'eau et c'est ce que le fleuve Jaune a permis. C'est donc pour une bonne part le nord plus aride qui a nourri le sud, au prix de transferts d'eau virtuelle internes estimés par certains auteurs à plusieurs dizaines de milliers de kilomètres cubes. L'ironie est que pour réduire la pénurie d'eau du nord, l'État chinois a commencé à construire trois canaux destinés à transférer au nord plus de 100 km³ d'eau du sud²².

Cette situation paradoxale peut sembler totalement anormale. Elle ne l'est pas. Elle a été observée également en Inde où les états du nord-ouest (Pendjab, Rajasthan) puisent dans leurs ressources en eau bleue pour nourrir les états de l'est (Orissa notamment) beaucoup plus humides et beaucoup plus peuplés. Les fortes densités démographiques

21. La transition démographique est la période pendant laquelle on réduit dans une première phase la mortalité, puis, souvent 40 ou 50 ans après, la natalité. Pendant cette transition, la croissance démographique est forte.

22. Voir à ce sujet Jean-Paul Bravard, « Un enjeu hydropolitique et environnemental majeur pour la Chine : le transfert Sud-Nord », *Hérodote*, n° 102, 2001. <https://doi.org/10.3917/her.102.0057>

permises par la disponibilité constante d'eau qui elle-même autorise des régimes alimentaires principalement végétariens conduisent à une demande alimentaire difficilement gérable en cas de forte croissance démographique. Des régions plus arides ayant accès à l'eau bleue de fleuves ou de nappes souterraines peuvent répondre à une demande de nourriture croissante, car la densité de population y est plus faible et les fermes plus grandes.

Plus généralement, il est frappant d'observer que parmi les principales importations d'eau virtuelle françaises figure le coton d'Ouzbékistan qui a, on le sait, contribué au dessèchement de la mer d'Aral. La logique reste peu ou prou identique : une mobilisation accrue d'eau à des fins de cultures d'exportation permet d'initier le développement économique, même si la durabilité de ce développement est loin d'être garantie.

Il faut faire la distinction entre deux causes complémentaires des crises de disponibilité de l'eau : les sécheresses dues à des conditions climatiques extrêmes et les pénuries dues à une surutilisation des ressources en eau bleue disponibles²³. Pour en estimer les risques, il est essentiel d'examiner à la fois les prélèvements, qui créent

23. L'International Water Management Institute (IWMI) a aussi introduit la notion de pénurie socio-économique pour tenir compte du manque d'infrastructures de gestion de l'eau dans certaines régions du monde.

des tensions sur la disponibilité en eau bleue, et la consommation réelle, l'eau évaporée et soustraite aux ressources en eau bleue. Et, le cas échéant, de tenir compte d'un recyclage local de l'évaporation. Enfin, élément essentiel, pondérer le niveau de stress par la probabilité de survenue d'une sécheresse.

Les situations de crise sont la plupart du temps générées par la combinaison d'une demande croissante tirée par la croissance démographique avec le développement économique accompagné d'une empreinte eau plus forte, demande qui finit par se heurter à une offre insuffisante dans des conditions météorologiques anormalement sèches. Cette combinaison peut être complexe, car l'offre elle-même peut être réduite par les activités humaines. La dégradation des sols, leur moindre teneur en matière organique, leur maintien à nu pendant plusieurs mois de l'année favorisant l'érosion et augmentant la température, la réduction des zones de stockage par des aménagements ou par l'imperméabilisation croissante : toutes ces actions humaines peuvent augmenter la gravité des sécheresses, en dehors même de tout dérèglement climatique, sur lequel nous allons revenir.

VII. EUTROPHISATION ET POLLUTIONS

Un autre enjeu critique est celui de la dégradation de la qualité de l'eau due aux nombreuses substances rejetées soit directement dans l'eau, soit dans les sols ou dans l'air. Celle-ci affecte les milieux et les écosystèmes aquatiques de multiples manières et à différentes échelles. Ses répercussions sont multiples, du niveau local jusqu'à celui de la planète tout entière.

L'Océan, TÉMOIN ULTIME DE LA QUALITÉ DE L'EAU DOUCE

La pollution nous paraît de mieux en mieux contrôlée dans nos villes et territoires européens. Ne devrait-on pas pouvoir se baigner à nouveau dans la Seine dès 2024, après près d'un siècle d'interdiction ? La gestion des stations d'épuration et des réseaux d'assainissement n'est-elle pas de plus en plus performante ? Comment faire la part de nos exigences croissantes et de la réalité des améliorations ?

Osons une proposition : pour mesurer l'état de notre eau douce, rien de mieux que d'examiner celui de la mer ou de l'océan, particulièrement là où l'eau douce amérít ! C'est là qu'on peut mesurer les impacts de notre style de vie et de l'amélioration des conditions d'épuration des

eaux douces. Et le moins que l'on puisse dire est que la situation n'est pas brillante.

La Méditerranée en fournit une illustration cinglante. Elle reçoit de nombreuses eaux non dépolluées¹ de la plupart de ses rivages, qui en font une des mers les plus dégradées de la planète. Le rapport sur l'état de l'environnement et du développement en Méditerranée du Plan Bleu² révèle la présence de nombreux « contaminants émergents » – produits pharmaceutiques (antidépresseurs, hormones, analgésiques, antibiotiques), produits cosmétiques, produits ignifuges, additifs plastiques, pesticides et herbicides, bisphénol A – dont les cycles de vie et les impacts sont mal compris. Les apports de plastiques dans cette *Mare Nostrum* sont estimés à 260 000 tonnes par an et donnent naissance à des microparticules dont la densité moyenne est en surface de 100 000 par km² et peut atteindre par endroits 64 millions par km²!

MAIS QUE FONT LES STATIONS D'ÉPURATION ?

Pourquoi de telles pollutions? D'abord parce que nous utilisons de plus en plus de molécules dans nos vies quotidiennes. L'humanité a conçu et produit plus de

1. « Les eaux usées, fléau de la Méditerranée », *l'Humanité*, 6 septembre 2016. <https://www.humanite.fr/planete/environnement/les-eaux-usees-fleau-de-la-mediterranee-615116>

2. Programme des Nations unies pour l'environnement/Plan d'action pour la Méditerranée et Plan Bleu, rapport « État de l'environnement et du développement en Méditerranée », Nairobi, 2020. <https://planbleu.org/soed/>

350 000 molécules et continue d'en produire au moins 2 000 nouvelles chaque année³. Ces molécules se retrouvent dans les sols, dans l'air et bien sûr dans l'eau. Difficile de toutes les surveiller d'autant qu'elles se dégradent et que leurs métabolites peuvent eux-mêmes être nombreux et toxiques. On a ainsi découvert en 2022 qu'après de nombreuses années d'utilisation, un pesticide, le chlorothalonil⁴, avait donné naissance à un métabolite présent dans un tiers des eaux potables en France. Le problème avec les métabolites est que, contrairement à leurs parents, ils n'ont pas été l'objet d'autant d'études de toxicité et qu'il est difficile d'estimer leurs risques pour la santé publique.

Les pesticides utilisés pour l'agriculture et le jardinage figurent au premier rang des accusés parce qu'ils sont « lâchés dans la nature » et qu'ils sont conçus pour s'attaquer à des organismes vivants. Mais qu'on ne se trompe pas, les nombreuses autres molécules trouvées dans la Méditerranée ne sont ni moins présentes ni nécessairement moins dangereuses.

3. Stockholm Resilience Centre, "Safe planetary boundary for pollutants, including plastics, exceeded, say researchers", janvier 2022. <https://www.stockholmresilience.org/research/research-news/2022-01-18-safe-planetary-boundary-for-pollutants-including-plastics-exceeded-say-researchers.html>

4. Stéphane Foucart, « L'eau potable en France contaminée à vaste échelle par les métabolites du chlorothalonil, un pesticide interdit depuis 2019 », *Le Monde*, 5 avril 2023. https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/04/05/l-eau-potable-en-france-contaminee-a-vaste-echelle-par-les-metabolites-du-chlorothalonil-un-pesticide-interdit-depuis-2019_616-8450_3244.html

Nous vivons souvent dans une grande illusion, nous pensons qu'avec toutes les stations d'épuration installées, les eaux usées sont rejetées dans un état «épuré». Grave erreur, car d'une part ces stations d'épuration ne sont pas présentes partout et d'autre part, lorsqu'elles le sont, elles ne sont pas toujours fonctionnelles ou ne fournissent que des traitements de base. Ainsi sur le pourtour méditerranéen, 20 à 25 % d'entre elles ne fournissent qu'un traitement rudimentaire (simple précipitation de la matière organique), et seules 8 % (1 % dans les pays du sud) bénéficient d'un traitement élaboré permettant de réduire la charge en azote et en phosphore. Une station d'épuration est en effet une sorte de système digestif géant qui filtre et sépare les déchets volumineux ou gras, s'empare des molécules organiques qui lui sont fournies et les dégrade en produisant du gaz carbonique et de l'azote ainsi que des boues riches en phosphore. Comme les nôtres, ces systèmes digestifs dépendent d'écosystèmes microbiens qui peuvent facilement être perturbés lorsque les conditions changent. Ils peuvent aussi être débordés lors de précipitations abondantes qui ajoutent aux eaux usées des eaux de pluie bien chargées. Gérer ces surverses est un véritable casse-tête. Les habitants de villes côtières comme Marseille savent qu'après une grosse pluie il vaut mieux attendre quelques jours avant d'aller se baigner.

Les stations d'épuration ne sont par ailleurs pas capables d'éliminer toutes les substances polluantes. Nombreuses sont celles qui les traversent et continuent leur chemin jusqu'au cours d'eau dans lequel l'eau traitée est rejetée. C'est le cas de nombreuses molécules,

parmi lesquelles les résidus de médicaments et de multiples autres produits de synthèse. C'est aussi le cas des plastiques et microplastiques qui finissent souvent dans les océans où ils constituent de véritables continents flottants, lesquels ne sont pourtant que la partie émergée d'un « plastic-berg » beaucoup plus important amassé par les courants marins en profondeur⁵. Les plastiques ne sont que les témoins d'une pollution plus insidieuse. Dégradés en microparticules, ils pénètrent dans les microalgues, à la base des chaînes trophiques⁶, et se transfèrent progressivement à tous les échelons de ces chaînes jusqu'à finir dans nos assiettes et dans nos organismes. Les deux types les plus fréquemment retrouvés dans nos aliments sont le polypropylène, utilisé dans les bouchons de bouteille, et le PET, présent dans les bouteilles en plastique⁷. Les conséquences de cette omniprésence dans les chaînes alimentaires restent pour l'instant mal comprises.

Les substances médicamenteuses et leurs résidus n'ont pas besoin d'aller jusqu'à la mer pour avoir des effets

5. « Des millions de microplastiques découverts au fond de la Méditerranée », *Reporterre*, 5 mai 2020. <https://reporterre.net/Des-millions-de-microplastiques-decouverts-au-fond-de-la-Mediterranee>

6. Inrae, « Un nouveau mécanisme d'entrée des microplastiques dans la chaîne alimentaire », 27 juin 2022. <https://www.inrae.fr/actualites/nouveau-mecanisme-dentree-microplastiques-chaîne-alimentaire>

7. La production plastique a explosé au cours de la dernière décennie et s'élève actuellement à 348 millions de tonnes par an. De 2 à 5 % de ces volumes finiraient dans les océans. AFP, « Des micro-plastiques présents dans la chaîne alimentaire humaine », *Sciences et Avenir*, 23 octobre 2018. https://www.sciencesetavenir.fr/sante/des-micro-plastiques-presents-dans-la-chaîne-alimentaire-humaine_128850

délétères sur les écosystèmes aquatiques. Les rejets des établissements hospitaliers seraient responsables de 20 % de la charge en produits pharmaceutiques présents dans les eaux usées, et mériteraient à ce titre de subir un traitement à la source⁸. Depuis les années 1990, on sait aussi que parmi toutes les molécules relâchées dans les milieux aquatiques, au moins 600 sont des perturbateurs endocriniens, qui miment, modifient ou bloquent l'action des hormones des organismes vivants, avec des conséquences diverses sur la reproduction et l'embryogenèse. Les résidus des pilules contraceptives en sont un bon exemple : on leur attribue les changements de sexe de certains poissons et de certains escargots marins, et les altérations d'organes sexuels ou d'œufs chez des reptiles ou des oiseaux. On a aussi démontré que les cocktails de substances pouvaient avoir un impact même lorsque chacune des substances prise isolément n'avait pas d'effet notable⁹. Mais surtout, on a aujourd'hui de fortes raisons de penser que ces perturbateurs endocriniens sont responsables du syndrome de dysgénésie testiculaire qui associe des malformations des organes génitaux chez l'homme à une diminution de la quantité et de la qualité des spermatozoïdes.

8. Ghislain de Marsily (dir.), *Les Eaux continentales, op. cit.*

9. Vivien Lecomte, « Les effets des perturbateurs endocriniens sur l'environnement », *Écotoxicologie.fr*, 3 janvier 2012. <https://ecotoxicologie.fr/perturbateurs-endocriniens>

LA LIMITE PLANÉTAIRE DES « NOUVELLES ENTITÉS CHIMIQUES »

Au vu des effets en cascade des milliers de molécules de synthèse, il est clair que nous jouons aux apprentis sorciers. Nous menaçons le fonctionnement de multiples écosystèmes comme l'a montré la Resilience Alliance¹⁰ qui a accumulé ces dernières décennies plus de 200 études de cas montrant que les altérations progressives des écosystèmes peuvent aller jusqu'à changer de manière abrupte le mode de fonctionnement de ceux-ci. Vingt-cinq grandes modalités de telles transformations ont été identifiées¹¹. L'invasion d'un champignon a par exemple fait basculer les forêts d'Amérique du Nord de la domination des châtaigniers à celle des érables. Plusieurs effondrements d'espèces sont également mentionnés, comme celui de mollusques bivalves dû à une détérioration de la qualité de l'eau. Ce qui frappe dans les exemples présentés est la mise en œuvre de boucles de rétroaction amplificatrices ayant des conséquences en cascade difficilement prévisibles.

Cette analyse et l'examen de plusieurs situations à risque comme celle du développement de groupes de bactéries résistantes à tout antibiotique ont conduit en 2022

10. La Resilience Alliance est liée au Stockholm Resilience Centre, mais rassemble des chercheurs du monde entier. Voir <https://www.resalliance.org>

11. Voir à la fois la publication du Stockholm Resilience Centre, "Untangling ecological collapse" du 13 août 2015, <https://www.stockholmresilience.org/research/research-news/2015-08-13-untangling-ecological-collapse.html>, et celle de la base de données des transformations Regime Shifts, <https://www.regimeshifts.org/>

à une nouvelle synthèse relative aux impacts de la multitude de nouvelles entités chimiques et à un affinement de la limite planétaire correspondante. Une publication¹² a estimé que la prolifération anarchique de nouvelles molécules aux propriétés inconnues faisait courir un risque vital à l'humanité. Ses auteurs concluent que, d'ores et déjà, le nombre et les interactions entre les milliers de molécules relâchées dans la nature sans analyse de leur écotoxicité font que la stabilité du fonctionnement planétaire de l'holocène est menacée. Les auteurs insistent notamment sur les multiples risques posés par les plastiques dont 2,4 % de la production annuelle sont relâchés dans la nature. La relative bonne nouvelle est qu'une analyse de la toxicité de 12 000 molécules dans 22 000 cours d'eau européens a révélé que 15 d'entre elles étaient responsables de 99,5 % de la toxicité générée¹³.

EUTROPHISATION ET PROLIFÉRATION D'ALGUES

Le second type de pollution de l'eau nous est plus familier. C'est celui dû aux nitrates – une forme oxydée de l'azote – et aux phosphates conjointement responsables du phénomène d'eutrophisation qui affecte les cours d'eau, les lacs et les zones côtières. Il ne s'agit pas ici

12. Linn Persson et al., "Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities", *Environmental Science and Technology*, vol. 56, février 2022. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.1c04158>

13. *Ibid.*

véritablement de toxicité, encore que les nitrates puissent se transformer pour partie en nitrites, potentiellement dangereux pour les bébés. Il s'agit d'un surplus de substances nutritives dont les végétaux sont gourmands et qui dérèglent les écosystèmes en provoquant la prolifération d'algues. Les algues, organismes végétaux uni ou pluricellulaires dépourvus de fleurs qui vivent dans l'eau, sont capables de photosynthèse, donc de capter du dioxyde de carbone pour se développer grâce à l'énergie de la lumière. Elles forment la base des chaînes trophiques. La présence d'azote et de phosphore dans l'eau démultiplie leur croissance, ce qui peut poser doublement problème. Certaines algues synthétisent des toxines qui peuvent causer la mort de poissons, de crustacés et déclencher des gastrites, des allergies, voire favoriser des cancers du foie chez les humains. Leur abondance stimule la croissance en cascade des organismes situés plus haut dans les chaînes alimentaires, des crustacés, gastéropodes, ou poissons qui ont tous besoin d'oxygène pour les digérer. Si le renouvellement de l'oxygène dans l'eau ne se produit pas assez rapidement, sa diminution, voire sa disparition, peut bloquer l'ensemble de la chaîne trophique : tous les organismes consommant de l'oxygène peuvent alors dépérir.

Les apports en nitrates et en phosphates aux cultures ont augmenté depuis la fin des années 1950 lorsque les engrais de synthèse ont commencé à être utilisés massivement. L'intensification de l'agriculture a aussi incité à une conduite plus intensive des élevages. Progressivement ces molécules se sont retrouvées dans les eaux des rivières, des nappes souterraines, des lacs et des zones côtières.

Le cas du bassin de la Seine, et particulièrement de la qualité des eaux à son embouchure, est instructif à cet égard. L'azote et le phosphore y ont augmenté lentement depuis le Moyen Âge, après les défrichements et le développement de l'agriculture. À partir des années 1960¹⁴, leurs niveaux de concentration dans l'eau ont littéralement explosé de manière concomitante, les nitrates étant multipliés par deux, les phosphates par quatre. Le risque d'eutrophisation, qui dépend de la présence des deux substances, a lui aussi explosé, notamment en période estivale, et s'est maintenu à un niveau élevé jusqu'au début des années 2000. Les phosphates ont alors chuté à leur niveau d'après-guerre sous l'effet d'une amélioration des pratiques agricoles et de l'utilisation de lessives sans phosphates. En revanche, les nitrates se sont maintenus à un niveau élevé malgré une légère décrue au début des années 2000 sous l'effet de la directive « Nitrates » de l'Union européenne. L'eutrophisation de l'eau en aval de la Seine s'est accompagnée de la prolifération d'algues potentiellement toxiques sans toutefois pour autant provoquer de dégradation majeure.

La Bretagne s'est aussi distinguée par l'eutrophisation de ses côtes en raison de l'intensification de l'élevage, notamment porcin. Ce phénomène est difficile à contrôler

14. Le programme Seine-Aval a particulièrement bien analysé les évolutions dans le fascicule « Qualité de l'eau et contaminations : apports en nutriments et potentiel d'eutrophisation », 2008. <https://www.seine-aval.fr/wp-content/uploads/2017/01/Nutriments-et-eutrophisation.pdf>

dans le cas de l'élevage, car les urines du bétail (et particulièrement celles des porcs dans ce cas précis) contiennent à la fois des nitrates et des phosphates. Le risque de prolifération des algues vertes dans des baies où l'oxygénation est difficile en période estivale est alors très grand. Depuis 2002, on recense 143 sites du linéaire côtier breton sur lesquels des algues vertes se sont échouées. Et la tendance n'est pas encore à l'amélioration. Les observations montrent une augmentation de 166 % de la prolifération d'algues vertes depuis 2002 sur les sites sableux et de 35 % depuis 2008 sur les sites de vasières où la tendance était pourtant à l'amélioration jusqu'en 2013¹⁵.

N'imaginons pas que ces questions d'eutrophisation soient spécifiques à la France. L'ensemble de la planète est touché comme le montre *L'Atlas bleu* du CNRS¹⁶. L'hémisphère nord et ses façades atlantiques américaine et européenne le sont particulièrement.

Le cas des sargasses, ces algues brunes vivant en haute mer qui ont donné leur nom à la mer éponyme, est également préoccupant¹⁷. Elles sont connues depuis plusieurs siècles,

15. Voir l'Observatoire de l'environnement en Bretagne, « L'évolution des échouages d'algues vertes sur le littoral breton », 3 avril 2023. <https://bretagne-environnement.fr/echouages-algues-vertes-littoral-breton-analyse-evolution-annuelle-depuis-2002-datavisualisation>

16. Voir « L'Atlas bleu, Revue cartographique des mers et des littoraux » sous la direction du CNRS. <https://atlas-bleu.cnrs.fr>

17. Voir par exemple Lorène Lavocat, « Les sargasses, ces algues qui pourrissent la vie des Antillais », *Reporterre*, 4 août 2022. <https://reporterre.net/Les-sargasses-pourrissent-la-vie-des-Antillais>

depuis que Christophe Colomb en 1492 a décrit les difficultés rencontrées pendant trois semaines pour en extirper son bateau, la *Santa Maria*. Leur prolifération a démarré au début des années 2010 dans les Antilles où elles s'échouent et viennent se décomposer en grandes quantités. Outre le désagrément causé par leur présence, les sargasses émettent des vapeurs désagréables et toxiques d'ammoniac et d'hydrogène sulfuré qui provoquent une corrosion accélérée des métaux. La raison de leur prolifération n'est pas entièrement comprise, mais les travaux les plus récents évoquent à la fois le développement agricole de l'Amazonie et le réchauffement de l'eau de mer.

La prolifération d'algues n'est pas toujours liée à l'eutrophisation. Elle peut aussi résulter d'autres perturbations, souvent d'origine anthropique¹⁸, des chaînes alimentaires. Ainsi les marées vertes en mer Baltique semblent avoir été provoquées par la surpêche de la morue qui a conduit à la prolifération des sprats, eux-mêmes se nourrissant d'espèces plus petites et de zooplancton. La réduction du zooplancton a à son tour favorisé le développement du phytoplancton et des algues en particulier. Ces phénomènes en cascade sont typiques des désordres écologiques et révèlent que la déstabilisation d'un petit

18. Lorsque l'atmosphère de la planète était riche en CO₂, la prolifération de végétaux était naturellement possible. À l'Éocène, il y a 49 millions d'années, la prolifération de fougères aquatiques du type *Azolla* a fait chuter la concentration de CO₂ de l'atmosphère de 3500 ppm à 650 ppm, occasionnant une diminution de 10°C de la température terrestre. Ce sont les plantes aquatiques qui ont conduit à l'apparition des calottes glaciaires et à la situation instable de la température observée dans le dernier million d'années précédant l'holocène.

nombre d'espèces peut avoir des répercussions en chaîne sur tout un écosystème.

LES ZONES MORTES MARINES

L'eutrophisation ne conduit pas uniquement à la production d'algues. Les cocktails de molécules carbonées présentes dans l'eau à l'aval des fleuves stimulent aussi l'appétit de nombreuses bactéries et autres microorganismes. Ces molécules peuvent provenir des stations d'épuration, de rejets d'eau non épurée ou des sols. Une étude récente a montré que les fleuves emportent chaque année 4,2 milliards de tonnes de carbone vers les océans, dont un quart sous forme de molécules organiques¹⁹. Ces exportations de carbone soulignent l'ampleur des perturbations des grands cycles biogéochimiques par les activités humaines ainsi que celle de l'érosion des sols.

Toute dégradation de matière organique produit du gaz carbonique et consomme de l'oxygène. Cela vaut pour notre digestion comme pour le fonctionnement des moteurs thermiques. On n'est donc pas surpris d'observer qu'à l'embouchure de nombreux fleuves, l'eau s'appauvrit en oxygène, particulièrement pendant la saison chaude. Dans de nombreux cas, on assiste au développement de zones anoxiques, totalement dépourvues d'oxygène.

19. Tom J. Battin *et al.*, "River ecosystem metabolism and carbon biogeochemistry in a changing world", *Nature*, vol. 613, 28 janvier 2023. <https://www.nature.com/articles/s41586-022-05500-8>

Les chaînes trophiques régressent voire disparaissent. Que la situation perdure pendant toute une saison ou plus, ces zones deviennent des zones mortes.

Les zones mortes ne sont pas toujours dues aux activités humaines. Les apports de matière organique dans des zones côtières ou lors des inondations de zones lacustres dues à la montée de la mer en ont souvent créé dans les derniers millions d'années, au cours des alternances de périodes glaciaires et interglaciaires. L'une d'entre elles est remarquable : il s'agit de la mer Noire qui est restée anoxique en dessous de 200 mètres de profondeur lorsque la mer Méditerranée a réinvesti la zone lacustre qu'elle occupait après la dernière glaciation.

Ce qui est nouveau, c'est la prolifération de ces zones mortes dont le nombre a été multiplié par 10 depuis les années 1950, période à laquelle on a commencé à les étudier²⁰. Elles ponctuent les côtes de nombreux pays, y compris la France, aux embouchures des fleuves principalement. Elles provoquent une mortalité sans précédent dans les barrières de corail, un phénomène qui était jusqu'à récemment resté totalement inaperçu²¹. La nouveauté est aussi qu'avec le réchauffement de l'océan, de nouvelles zones mortes apparaissent en haute mer, notamment dans

20. John McKenna, "Dead zones in our oceans have increased dramatically since 1950", World Economic Forum, 18 janvier 2018. <https://www.weforum.org/agenda/2018/01/dead-zones-in-our-oceans-have-increased-dramatically-since-1950-and-we-re-to-blame/>

21. Andrew Altieri *et al.*, "Tropical dead zones and mass mortalities on coral reefs", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, mars 2017. https://www.researchgate.net/publication/315464204_Tropical_dead_zones_and_mass_mortalities_on_coral_reefs

l'océan Pacifique à l'ouest des côtes d'Amérique du Sud ou dans l'océan Indien le long des côtes de l'Inde, menaçant la reproduction de nombreux poissons.

LA LIMITE PLANÉTAIRE DES CYCLES DE L'AZOTE ET DU PHOSPHORE

L'histoire montre que la perturbation des cycles de l'azote et du phosphore, qui interagissent avec celui du carbone, est l'une des plus périlleuses pour la stabilité de la planète. Cette perturbation a logiquement été incluse dans l'approche initiale des limites planétaires²².

Chaque année, 190 millions de tonnes d'azote sont extraites de l'atmosphère pour l'agriculture et la chimie, davantage que par tous les processus naturels réunis. 54 de ces millions de tonnes finissent chaque année dans l'océan. Les molécules produites jouent un rôle de polluant important pour l'eutrophisation notamment, mais aussi pour le dérèglement climatique puisqu'une grande part est convertie en oxyde nitreux ou protoxyde d'azote (N_2O), le troisième plus important gaz à effet de serre.

Chaque année, 22 millions de tonnes de phosphore sont extraites des roches de la croûte terrestre pour l'agriculture, la chimie et la pharmacie. Sur ce total, entre 8,5 et 9,5 millions finissent dans l'océan, soit 8 fois plus que les valeurs observées pendant l'holocène. L'étude des

22. On se réfère ici encore à l'article fondateur de 2009 de Johan Rockström et al., "A safe operating space for humanity". <https://www.nature.com/articles/461472a>

sédiments océaniques a montré qu'une augmentation bien plus faible, de 20 % seulement, de ces apports naturels suffisait à générer des conditions anoxiques dans les océans et à induire des extinctions d'espèces²³. Nous sommes bien au-delà et la combinaison de ces apports avec ceux de l'azote et avec le réchauffement de l'océan conduit déjà au développement à grande échelle des nouvelles zones mortes mentionnées plus haut.

Les travaux de recherche (voir Annexe 2) suggèrent que les prélèvements d'azote dans l'atmosphère devraient revenir au tiers de leur valeur actuelle (62 millions de tonnes), ce qui demande une approche d'économie circulaire pour la valorisation des déchets. L'entrée dans une zone à haut risque est quant à elle fixée à 82 millions de tonnes, une valeur d'ores et déjà largement dépassée. Les phosphates rejoignant chaque année l'océan ne devraient eux pas dépasser 11 millions de tonnes pour éviter une anoxie générale des océans dans les décennies ou les siècles à venir. La zone à haut risque du phosphore est quant à elle estimée à 100 millions de tonnes de rejets dans les océans. Les auteurs soulignent aussi que ces valeurs moyennes globales rendent mal compte des risques régionaux qui pourraient avoir un rôle déstabilisant. Pour les cycles d'azote et de phosphore, les risques de déstabilisation sont donc élevés.

23. Itsuki C. Handoh, Timothy M. Lenton, "Periodic mid-Cretaceous oceanic anoxic events linked by oscillations of the phosphorus and oxygen biogeochemical cycles", *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 17, décembre 2003. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2003GB002039>

FLUX ENVIRONNEMENTAUX DES COURS D'EAU

Si les pollutions s'accumulent à l'aval, elles n'en sont pas moins présentes à l'amont, souvent de manière moins visible, malgré les efforts de dépollution. La prise de conscience avance, comme en témoignent ces villes éloignées des côtes, telle Dijon²⁴, qui installent près des avaloirs d'eau de pluie des plaques portant cette mention poétique : « Ici commence la mer, ne rien jeter ». Cette prise de conscience doit se transformer en changement de comportements et en amélioration des procédés de détection et de traitement.

Au-delà de ces actions, maintenir le bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques et la capacité autoépuration des cours d'eau est aussi essentiel. Ce bon fonctionnement fait partie de notre « assurance-vie », car il permet la dégradation et l'assimilation dans les chaînes alimentaires des substances polluantes. Pour cela, une combinaison de processus microbiens (consommation, transformation), chimiques (précipitations, conversions, absorption) et physiques (dilution, sédimentation, rétention) est nécessaire. Leur mise en œuvre est d'autant plus efficace que la biodiversité de l'écosystème est grande, car il y a de nombreuses substances à digérer ! Au niveau local, les différents groupes d'espèces vivantes doivent être représentés ; à l'échelle d'un territoire, une diversité

24. « "Ici commence la mer" : que signifie cette plaque dévoilée ce matin à Dijon ? », *Le Bien public*, 13 septembre 2020. <https://www.bienpublic.com/environnement/2020/09/13/ici-commence-la-mer-que-signifient-ces-plaques-devoilees-ce-matin-a-dijon>

de milieux augmente le nombre de mécanismes de dégradation possibles. Les zones humides et les ripisylves, ces arbres qui bordent les cours d'eau, doivent en particulier être préservées, car elles peuvent filtrer ou détourner des polluants et les dégrader.

Maintenir la capacité autoépuratoire des cours d'eau requiert aussi de ne pas trop s'écarter de ce que les hydrologues appellent le *régime* du cours d'eau, la manière dont les débits varient entre et pendant les saisons. L'écosystème de toute une rivière s'adapte en effet progressivement à ce régime en sélectionnant les espèces qui survivent le mieux dans les conditions générées par la succession de débits forts et de débits faibles. Maintenir le régime dans des conditions quasi naturelles est donc le défi d'une bonne gestion qui doit s'accommoder des prélèvements et d'éventuelles lâchures de barrages.

Dans ce régime, les débits et la qualité de l'eau en période d'étiage jouent un rôle critique. Il faut un débit minimal pour maintenir les écosystèmes aquatiques en bon état de fonctionnement. De nombreuses recherches²⁵

25. Amandine Pastor et ses coauteurs en ont dénombré plus de 200. Voir "Accounting for environmental flow requirements in global water assessments", *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, vol. 10, 2013. https://www.researchgate.net/publication/260724522_Accounting_for_environmental_flow_requirements_in_global_water_assessments

ont tenté de quantifier les flux environnementaux minimaux (voir chapitre III) afin de sélectionner des indicateurs hydrologiques et hydrauliques aptes à les déterminer en différentes saisons, pour préserver les espèces ou pour se rapprocher de la variabilité hydrologique et hydraulique naturelle des cours d'eau. Les débits environnementaux s'expriment sous forme d'une proportion du débit moyen. Cette proportion se situe entre 20 et 50 % du débit moyen annuel suivant les cours d'eau, avec une moyenne mondiale proche de 37 %. À l'échelle saisonnière, elle est plus élevée, entre 40 et 70 %, au cours de la saison d'étiage, et plus basse, entre 17 et 45 %, pendant les périodes de hautes eaux. Déterminer ces débits environnementaux est utile à la fois pour autoriser et réguler les prélèvements d'eau bleue et pour la gestion des barrages et retenues d'eau. De nombreux acteurs économiques, ainsi que nos villes, dépendent de leur bonne détermination !

Les nouvelles méthodes d'estimation de l'empreinte eau (voir chapitre V) font également référence à ces débits : c'est la différence entre débit total et débit environnemental qui est recommandée comme référence pour évaluer la pression sur la ressource.

Les dégradations de l'eau bleue constituent une bombe à retardement. Nous pensons que les pollutions diminuent ou qu'elles sont traitées par nos stations d'épuration. C'est sans compter sur la multitude de molécules que nous produisons, que ces stations ne captent pas

et dont beaucoup ont des effets délétères sur les écosystèmes. Ceux-ci n'apparaissent que longtemps après leur accumulation dans les chaînes trophiques ou resurgissent à travers des métabolites aux propriétés peu connues. Beaucoup de ces pollutions, dont celles par les nitrates et les phosphates, dérèglent les grands cycles planétaires et finissent par perturber l'océan où l'on observe la multiplication de zones mortes anoxiques. Le plastique et ses microparticules constituent une autre menace à long terme, car on finit par les retrouver dans tous les organismes vivants.

Il y a urgence à connecter la gestion de l'eau douce à celle de l'océan.

VIII. DÉRÈGLEMENT CLIMATIQUE, CYCLE DE L'EAU ET ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES

Les risques de déstabilisation de la planète sont déjà élevés en raison des pressions croissantes exercées par la densité de population et par l'évolution de nos modes de consommation. Et le dérèglement du climat agit comme un amplificateur des menaces. L'eau douce, déjà fortement sous pression, est encore aux premières loges des perturbations additionnelles, tout autant, voire davantage, que l'atmosphère.

L'EAU ET SES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Les propriétés de la molécule d'eau (voir chapitre III) expliquent sa grande capacité à stocker de la chaleur. Cette capacité permet à l'océan d'emmagasiner 94 % de l'énergie que l'augmentation de l'effet de serre produit, ce qui bien sûr contribue à le réchauffer. L'évaporation de l'eau, elle aussi, consomme beaucoup d'énergie : pour évaporer un litre d'eau, il faut 5,4 fois plus d'énergie que pour le porter de 0 à 100 °C! Tout endroit duquel de l'eau s'évapore, y compris notre propre corps, se refroidit. La vapeur

d'eau a également la capacité de filtrer le rayonnement infrarouge, ce qui fait d'elle le premier gaz à effet de serre, responsable de 60 % de ce dernier. Cette contribution est peu influencée par la gestion de l'eau douce, mais pour chaque degré Celsius de température supplémentaire, le contenu en vapeur d'eau de notre atmosphère augmente de 7 %, ce qui augmente l'effet de serre.

Une autre propriété importante de l'eau est sa capacité de réflexion de la lumière. La proportion d'énergie lumineuse reflétée est nommée albédo par les climatologues. L'albédo moyen de la planète est de 30 %, mais celui de la glace est d'environ 60 % et celui de la neige récente d'environ 90 %. Les quantités d'énergie en jeu sont donc là aussi colossales. Lorsque la neige ou la glace fondent, l'albédo diminue et l'énergie absorbée par la surface du sol augmente, créant ainsi ce qu'on appelle une boucle de rétroaction positive qui peut produire un emballement du dérèglement climatique.

PRINCIPALES CONSÉQUENCES DU DÉRÈGLEMENT CLIMATIQUE

Le dérèglement climatique n'est pas un simple réchauffement. Nous nous en rendons compte au quotidien. L'excès d'énergie retenue dans l'océan et l'atmosphère réchauffe de manière distincte les différentes surfaces de la planète, bouleverse l'évaporation, le vent, les précipitations, les circulations atmosphériques. Même si la tendance moyenne d'ensemble est au réchauffement, la variabilité spatiale et temporelle augmente et les extrêmes

peuvent se succéder plus rapidement qu'auparavant. Cette tendance va aller en augmentant.

Les prédictions des scientifiques sont de plus en plus précises et l'expérience montre qu'elles ont tendance à sous-estimer la gravité des évolutions en cours. Le dernier rapport du GIEC présente différentes évolutions possibles du climat en fonction de notre capacité à réduire nos émissions de gaz à effet de serre¹. Ces évolutions ne font que prolonger les tendances actuelles avec plus ou moins d'acuité, car les outils de simulation utilisés ne sont pas encore capables de prédire de possibles basculements du fonctionnement planétaire avec précision. C'est une des raisons pour lesquelles la limite de 1,5 à 2 °C de réchauffement moyen a été retenue dans l'accord de Paris. Au-delà, nous entrerions dans une zone dangereuse où des effets d'emballement pourraient survenir. Les principales tendances présentées dans le rapport du GIEC sont les suivantes.

Les températures des jours les plus chauds vont continuer d'augmenter pratiquement deux fois plus rapidement que l'augmentation de la température moyenne, et ce sur toute la planète. Les endroits où l'augmentation est la plus nette sont ceux déjà secs, qui comprennent notamment les régions situées au-delà des cercles polaires, la péninsule arabique, la région méditerranéenne. L'océan, la forêt tropicale africaine et la partie est de l'Inde (y compris le sud de l'Himalaya) sont les moins affectés.

1. Voir la synthèse du rapport AR6 du GIEC "Climate Change 2023", mars 2023. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>

Les précipitations annuelles moyennes diminuent dans les régions déjà arides, le bassin méditerranéen, la partie sud de l'Afrique, l'Australie, le nord de la Chine et sur la plus grande partie des Amériques, Amazonie comprise. Elles augmentent sur toute la zone intertropicale africaine et jusqu'aux régions sahéliennes, dans le nord de l'Europe et dans une large région allant du centre sud de la Russie à l'Asie centrale et jusqu'au sud de l'Inde. Les précipitations intenses vont augmenter sur tous les continents et tout particulièrement dans la zone sahélienne africaine. Elles ne diminueront que sur les océans, ainsi qu'à l'ouest de l'Afrique, de l'Amérique du Sud et de l'Australie.

Ces prévisions n'ont pas beaucoup évolué depuis les premiers rapports du GIEC. Elles sont devenues plus précises et plus fiables, même s'il reste possible que la planète atteigne certains points de bascule que les outils de simulation ne peuvent pas encore prédire. Elles confirment que le dérèglement climatique renforce les contrastes : les régions sèches deviennent plus sèches, les régions humides le deviennent davantage. La température augmente moins dans les endroits où l'eau abonde, car l'énergie incidente sert davantage à l'évaporation de l'eau qu'au réchauffement de l'air. Ces règles d'ensemble s'infléchissent toutefois pour la zone sahélienne qui deviendrait plus humide, et pour le nord de l'Amérique latine – et l'Amazonie en particulier – qui aurait tendance à s'aridifier.

LA FRANCE SOUS UNE DOUBLE INFLUENCE

La France se situe dans une zone de transition pour l'humidité et les précipitations, entre la partie nord-européenne où les précipitations tendent à augmenter et la partie méditerranéenne où elles diminuent. Les prévisions la concernant doivent donc distinguer sa partie nord de sa partie sud. Plus le réchauffement moyen sera fort, plus la tendance méditerranéenne prendra le dessus et la ligne de partage entre les deux tendances remontera vers le nord. Au-delà de 2 °C de réchauffement moyen, l'ensemble du territoire passera sous une dominante méditerranéenne.

L'augmentation des températures moyennes s'accompagnera logiquement d'une diminution de l'intensité des périodes de froid ou de gel. La diminution des précipitations annuelles augmentera l'aridité de la moitié sud, ce qui réduira la production d'eau bleue. Leur augmentation dans le nord pourra avoir l'effet inverse. À l'échelle saisonnière, les étés seront en tendance plus chauds et plus secs et les étiages des fleuves plus faibles. La fréquence d'épisodes pluvieux intenses s'accroîtra sur l'ensemble du territoire. Il y aura plus de vent dans le sud et des risques accrus de tempêtes partout. Les principales conséquences seront : une fréquence plus grande des conditions favorables à la propagation des feux, une fonte des glaciers et une réduction du manteau neigeux généralisée, des dégradations des milieux côtiers dues à la remontée du niveau marin et à l'érosion, des mers plus acides et chaudes avec des canicules marines plus fréquentes.

Nous savons aussi que même si nous mettons en œuvre les contributions annoncées par les différents pays depuis l'accord de Paris, la température moyenne en 2100 sera de 2,6 à 3 °C plus forte qu'avant la période industrielle. Nous risquons donc un emballement dont on peut souligner plusieurs causes. L'augmentation de l'humidité de l'atmosphère avec la température moyenne augmente l'effet de serre. La fonte du pergélisol des régions arctiques libère de grandes quantités de méthane stockées dans les sols, la moindre couverture neigeuse réduit la réflexion de la lumière et augmente la quantité d'énergie lumineuse absorbée, la prolifération des mégafeux de forêt augmente les émissions de carbone et réduit le puits de carbone continental, l'acidification de l'océan diminue également le puits de carbone océanique. Il existe aussi quelques rétroactions négatives comme celle de l'extension de la couverture nuageuse qui permet de réfléchir davantage d'énergie lumineuse vers l'espace. Mais dans l'ensemble, ce qu'il faut surtout retenir, c'est que nous jouons aux apprentis sorciers avec notre planète qui, jusqu'à nouvel ordre, est la seule où nous pouvons vivre !

ANTICIPER LES IMPACTS LOCAUX

Pour anticiper les conséquences locales concrètes du dérèglement climatique sur l'eau, il faut revenir aux trois piliers du bilan de l'eau que sont les précipitations, l'évaporation et le stockage dans les sols. C'est l'évaporation qui sera la plus impactée, du fait de l'augmentation de la température moyenne. Les stocks d'eau des sols risquent

donc d'être épuisés plus rapidement et les plantes de souffrir plus tôt dans l'année d'un déficit. La température de l'air se réchauffera davantage si les plantes évaporent moins d'eau. L'évaporation ne pose pas de problème intrinsèque tant qu'elle sert à faire pousser les plantes. Elle est alors de l'eau verte utile puisqu'elle contribue au bon fonctionnement des écosystèmes. La situation est différente si l'évaporation prélève l'eau directement dans un sol nu, soit que l'aridité empêche les plantes de pousser, soit que le sol soit laissé nu entre deux cultures². Dans ce cas, l'évaporation risque vite d'être réduite, car il n'y a pas de racines pour chercher l'eau en profondeur : l'énergie disponible va alors réchauffer l'air ambiant au lieu d'évaporer de l'eau.

Quelles sont les conséquences selon les différents usages des terres ? En forêt, les arbres peuvent continuer à puiser de l'eau en profondeur et à en évaporer pendant l'été grâce à leurs racines profondes et à leurs associations avec des mycorhizes. Les champignons sont pour eux des alliés précieux, car leur mycélium est beaucoup plus fin que les racines. Cela leur permet d'explorer le sol de manière efficace ! Dans l'avenir, certains arbres risquent toutefois de ne plus pouvoir trouver suffisamment d'eau en fin d'été, ils vont donc réduire leur rythme de croissance, voire dépérir. C'est d'ailleurs ce qu'on observe déjà aujourd'hui : de nombreuses espèces ont réduit leur

2. Rendons justice aux agriculteurs : le pourcentage de sols laissés nus entre deux cultures est en rapide diminution en France.

productivité, car elles ont grandi et adapté leur fonctionnement à des conditions plus clémentes. Elles seraient plus adaptées à des températures que l'on trouve quelques centaines de kilomètres plus au nord. Le carbone et l'eau étant frères et sœurs, il en est déjà résulté une diminution par deux du puits de carbone des forêts françaises et d'un tiers de celui des forêts européennes depuis le début des années 2010³.

Pour les cultures annuelles, l'enracinement est bien moindre et seuls un ou deux trimestres de l'année comptent : le printemps pour beaucoup de cultures, l'été pour d'autres comme le maïs ou le tournesol. Le stock d'eau utile du sol, moindre que pour une culture pérenne, se videra plus rapidement, créant des conditions difficiles avant la fin du printemps et risquant de réduire la croissance et les rendements. Des besoins supplémentaires d'irrigation ou des chutes de rendement sont fort probables. Les sols des champs de céréales mis à nu par la récolte en début d'été augmenteront la température de l'air, accentuant encore les conditions de sécheresse des milieux environnants.

3. Le puits de carbone net tient compte des prélèvements de bois qui au début de ce siècle représentaient un peu plus de la moitié de l'accroissement annuel de la forêt. Si l'accroissement diminue et que la récolte reste stable, le puits de carbone net diminue au moins deux fois plus vite en proportion.

Dans les villes, l'absence de végétaux et l'imperméabilisation des sols réduisent l'évaporation : toute l'énergie du soleil absorbée augmente la température de l'air et provoque les îlots de chaleur. L'albédo joue ici un rôle critique : des revêtements clairs peuvent réduire l'absorption du rayonnement⁴. La proportion d'énergie reflétée par les différentes surfaces varie de quelques pour cent (7 % pour le goudron sombre) à 40 % pour les tuiles. Clarifier les surfaces fait donc partie des solutions. Faciliter l'infiltration de l'eau et la rendre ensuite disponible à l'évaporation sera également essentiel. Sinon la chaleur risquera de faire proliférer les climatiseurs et d'aggraver encore la situation.

Retenons donc de ces quelques exemples que le risque de sécheresses et de canicules estivales – sans même parler de la réduction des pluies – va augmenter partout en France. Le stock d'eau accessible aux plantes joue dans ce contexte un important rôle tampon. Favoriser l'infiltration partout où cela est possible, augmenter la quantité de matière organique stockée dans les sols⁵ et planter des arbres ou des plantes à enracinement profond peuvent atténuer les dégâts.

4. Voir à ce sujet : Emmanuelle Valette et Erwan Cordeau, « Les îlots de chaleur urbains, répertoire de fiches connaissance », IAU Île-de-France, novembre 2010. https://www.institutparisregion.fr/fileadmin/NewEtudes/Etude_774/Les_ilots_de_chaleur_urbains_REPERTOIRE.pdf

5. La matière organique, souvent appelée humus, permet de retenir l'eau et les éléments nutritifs, de prévenir le compactage du sol. Elle est riche en carbone.

CONSÉQUENCES SUR LES PROPORTIONS D'EAU BLEUE ET D'EAU VERTE

La réflexion doit toutefois s'élever d'un cran. Car une gestion holistique de l'eau demande d'examiner l'articulation entre eau bleue et eau verte, qu'on ne comprend pas encore de manière très fine. Les données de la base Aquastat⁶ de la FAO, qui sert de référence pour les ressources en eau mondiales, apportent quelques éléments intéressants à ce propos. Elles permettent d'examiner les proportions d'eau bleue et d'eau verte internes – non influencées par les échanges transfrontaliers – des pays. La proportion de pluie transformée en eau bleue alimentant les nappes souterraines ou les rivières varie entre 0 et 80 % des précipitations selon les pays, le complément étant l'eau verte. Trois caractéristiques interdépendantes influencent ces proportions : la hauteur annuelle des précipitations, le caractère montagneux du pays – car l'eau y ruisselle plus facilement – et son caractère insulaire qui permet une évacuation de l'eau plus rapide vers la mer. En toute logique, plus il pleut et plus la part d'eau bleue augmente. Lorsqu'il pleut davantage que 800 mm par an, au moins 40 % de cette pluie se transforment en eau bleue⁷. C'est le cas en Europe où l'Italie, la Suisse, la Slovénie, l'Albanie et la Norvège convertissent même plus

6. *Op. cit.* En toute rigueur, l'analyse de la répartition de la pluie en eau bleue et eau verte devrait plutôt se faire pour chaque bassin-versant du fait de la taille variable des pays. Pour certains comme la Fédération de Russie une valeur moyenne ne signifie pas grand-chose.

7. À l'exception de plusieurs pays africains enclavés.

de 60 % de la pluie reçue en eau bleue. En dessous de 200 mm de pluie par an, la quantité d'eau bleue générée est quasiment nulle.

Dans les pays du bassin méditerranéen, la proportion d'eau bleue diminue nettement lorsqu'il pleut moins. Là où les précipitations sont faibles, sur la rive sud (en Afrique du Nord et en Méditerranée orientale), la part de la pluie générant de l'eau bleue est inférieure à 5-6 % avec quelques valeurs supérieures au Maroc (19 %) et en Tunisie (12 %). Sur la rive nord, les proportions sont supérieures à 34 %, valeur la plus faible atteinte par l'Espagne, et supérieures à 48 % plus à l'est de l'Italie jusqu'au Liban. La relation entre hauteur annuelle des précipitations et proportion d'eau bleue générée est quasi linéaire et révèle que lorsqu'on perd 100 mm de pluie, la proportion de cette dernière se transformant en eau bleue diminue de 7 %. Imaginons un pays où 600 mm de pluie généreraient 72 mm d'eau bleue⁸, soit un « rendement » de 12 %. Cela signifie que si la pluie chutait à 500 mm, l'eau bleue produite ne représenterait plus que 5 % (12 % moins 7 %) du total, soit 25 mm. La pluie non transformée en eau bleue contribue à davantage d'évaporation et donc d'eau verte. Il est remarquable que cette diminution soit moins forte, voire non perceptible, dans les autres régions du monde. Elle n'est par exemple que de l'ordre de 5 % en Europe dans son ensemble, de 3 % en Afrique

8. Un millimètre d'eau correspond à 10 m³ d'eau par hectare ou 1 000 m³ par kilomètre carré.

subsaharienne et quasiment imperceptible dans les pays d'Amérique et d'Asie.

La manière dont l'eau de pluie génère de l'eau bleue est un indicateur intéressant de la vulnérabilité d'une région au dérèglement climatique. On sait en effet la région méditerranéenne particulièrement affectée par le dérèglement climatique. Le fait que la proportion d'eau bleue produite soit fortement sensible aux hauteurs des précipitations atteste de cette vulnérabilité.

Le même raisonnement peut s'appliquer à un pays et à la variabilité interannuelle de son climat. Dans le cas de la France⁹, sur la période 1990-2018, les précipitations annuelles ont été en moyenne de 929 mm et ont fluctué entre un minimum de 735 mm en 2005 et un maximum de 1 228 mm en 2001. Les quantités d'eau bleue interne – corrigées des échanges avec les autres pays – générées sur la période ont, elles, varié entre 190 mm en 2005 et 623 mm en 2001 pour une moyenne de 360 mm. L'eau bleue générée a représenté en moyenne 38 % de la pluie totale, une valeur proche de la valeur mondiale (voir chapitre III et Annexe 2) et également cohérente avec celles de la rive nord du bassin méditerranéen (voir ci-dessus). Dans le détail, cette proportion a varié de manière linéaire

9. Les données utilisées proviennent des données et études statistiques du ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires « Évolutions de la ressource en eau renouvelable en France métropolitaine de 1990 à 2018 » publiées le 23 juin 2022. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/evolutions-de-la-ressource-en-eau-renouvelable-en-france-metropolitaine-de-1990-2018>

selon les hauteurs de précipitations. Elle ne valait que 26 % en 2005, mais atteignait 51 % en 2001. Plus il pleut, plus la proportion de pluie se transformant en eau bleue augmente et vice versa.

Corrélativement, la proportion d'eau verte, l'eau qui s'infiltré et se stocke dans les sols, augmente lorsque la pluie diminue, quoi que plus légèrement, même si, en valeur absolue, l'évaporation diminue dans le même temps. Il est essentiel que cette eau verte soit ensuite évaporée par la végétation et entretienne les écosystèmes. Toute eau verte qui s'évapore à partir de sols nus ou insuffisamment couverts de végétation est mal utilisée. D'autant que la part de cette eau verte qui se recycle localement ou dans les territoires proches est faible dans les régions arides¹⁰. Pour rendre l'eau verte utile, il faut réapprendre des techniques ancestrales de récolte d'eau de pluie comme on peut encore les observer dans certaines régions de la rive sud de la Méditerranée. Le principe en est simple : créer des zones de captage et de dérivation des eaux de ruissellement vers des zones où l'on force l'eau à s'infiltrer, que l'on végétalise ou qu'on cultive. Si une plante ou une culture demande 400 mm d'eau pour se développer et que les pluies, lors de sa période de croissance, sont de 100 mm, il faut dériver les ruissellements et les concentrer sur un quart au plus de la surface cultivée. Nous reviendrons sur ces questions dans la troisième partie.

10. Voir les résultats de la méthode Wave mentionnée au chapitre VI.

FONTE DES GLACIERS ET RÉDUCTION DU MANTEAU NEIGEUX

La disponibilité d'eau bleue est également fortement influencée par le stockage de neige et de glace. Les régions montagneuses¹¹ sont d'ores et déjà parmi les plus affectées par le dérèglement, comme l'illustrent les faits suivants observés en Suisse depuis les années 1960.

Le manteau neigeux diminue en surface et en épaisseur. Le nombre de jours de neige a diminué de 50 % en dessous de 800 mètres d'altitude et de 20 % vers 2 000 mètres. La durée de l'enneigement s'est réduite de 5 % par décennie. Les glaciers suisses ont perdu 60 % de leur volume depuis 1850 et les pertes s'accroissent : la seule année 2022 leur a fait perdre 6 % de leur glace résiduelle. Corrélativement, il pleut davantage, l'ensoleillement augmente, le nombre de jours de gel a diminué de 60 %. En moyenne, l'augmentation de la température moyenne de la Suisse depuis le début de l'ère industrielle était en 2022 de 2,5 °C, deux fois plus que la moyenne planétaire.

Tous ces changements abrupts, représentatifs des zones montagneuses de la planète, bouleversent les écosystèmes, l'hospitalité et l'attractivité des territoires, l'économie et les sociétés. Ils modifient le cycle de l'eau et la disponibilité

11. Les données utilisées sont celles du GIEC, fort bien résumées par Valérie Masson-Delmotte dans une présentation de synthèse. https://www.linkedin.com/posts/val%C3%AGrie-masson-delmotte-b03926206_changement-climatique-en-suisse-et-en-montagne-activity-7041501419073343488-QPv1?utm_source=share&utm_medium=member_desktop

des ressources en eau bleue dans les régions situées à l'aval. Ils contribuent à des rétroactions aggravantes puisqu'une moindre part de l'énergie lumineuse est réfléchiée par la surface quand neiges et glaces ont fondu.

Le régime des fleuves est particulièrement affecté. Les écoulements hivernaux augmentent, ceux du printemps, liés à la fonte des neiges, diminuent et le soutien d'étiage estival par les glaciers également. Tant qu'il restera de la glace à fondre, la production totale d'eau bleue sera stimulée, mais à plus long terme, lorsque tout aura fondu, les apports estivaux ne pourront que diminuer. Les économies bénéficiant du stockage de neige en hiver et du déstockage d'eau estival sont donc menacées. À l'échelle mondiale, 2 milliards de personnes et deux tiers de l'agriculture irriguée seront affectés par ces changements.

En France, la Garonne, le Rhin et le Rhône sont déjà touchés et le seront de plus en plus. C'est le Rhône qui provoque les plus fortes inquiétudes, les régions du sud-est de la France étant fortement dépendantes de son eau. À son entrée en France, à la sortie du lac Léman, la diminution de son débit estival par rapport à 1960 était de 7 % en 2023. À l'aval, en Camargue, elle était de 13 %¹². Mais ce n'est qu'un début : elle devrait atteindre 20 % dans les trente prochaines années en raison notamment de baisses

12. Richard Schittly, « Réchauffement climatique : un rapport alerte sur la baisse du débit du Rhône », *Le Monde*, 3 mars 2023. https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/03/03/rechauffement-climatique-un-rapport-alerte-sur-la-baisse-du-debit-du-rhone_6164025_3244.html

de débit encore plus marquées (de 30 à 40 %) des affluents alpins du Rhône comme l'Isère ou la Durance.

SAISONNALITÉ ET DÉCALAGE DES CYCLES

Les dérèglements du climat n'affectent pas que les valeurs moyennes¹³, ils modifient la saisonnalité du cycle de l'eau de différentes façons.

Il y a d'abord des décalages de saisons. Dans les pays tempérés, le réchauffement moyen accélère le développement des cultures dont les dates de plantation et de récolte sont de plus en plus précoces. En France, la date des vendanges a avancé de 18 jours depuis les années 1980¹⁴. Pour les céréales d'hiver, la moisson se déroule aussi deux semaines plus tôt en tendance avec une variabilité interannuelle importante. Ces décalages ont des répercussions sur l'eau verte et l'eau bleue. Les stocks d'eau des sols se vident plus rapidement, car l'évaporation des plantes est forte plus tôt dans l'année, ce qui augmente les risques de sécheresse. Les besoins d'irrigation, notamment des cultures d'été comme le maïs et le tournesol, se font sentir aussi plus tôt et ils augmentent.

13. Les moyennes sont paresseuses ! Elles lissent les aspérités, nous empêchent de voir les détails, où se cache souvent l'essentiel. Que nous importe au quotidien que la température augmente de 1 ou 2 °C ?

14. Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, ministère de la Transition énergétique, « Impacts du changement climatique : Agriculture et Forêt », 4 octobre 2022. <https://www.ecologie.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-agriculture-et-foret>

Dans certains cas, c'est la pluviométrie qui se décale. Au Maroc, alors que les hauteurs de pluie moyennes évoluaient peu à la fin du xx^e siècle, les pluies hivernales ont diminué au profit des pluies d'automne et de printemps. Rien de bien sérieux. Et pourtant, ce petit creux hivernal a suffi pour rendre plus compliqué le développement des grains de céréales qui, dans ce pays, a lieu en plein hiver. La sanction a été immédiate, les rendements ont baissé.

Ces questions de décalages de cycles importent parce que les écosystèmes sont formés d'espèces étroitement imbriquées qui mettent longtemps à trouver leur place. Tout est tellement ajusté que, quand on change un petit élément, on produit des effets en cascade sur tous les composants du système. Que les oiseaux migrateurs restent sur leur rythme de migration habituel et ils risquent de ne plus retrouver leur petit-déjeuner à leur retour !

Voilà aussi pourquoi l'adaptation de l'agriculture est lente et difficile. Les agriculteurs doivent ajuster leurs pratiques au rythme des saisons et composer avec toutes ces interactions entre espèces. Il leur faut de plus tester ces pratiques sur une durée suffisante pour comprendre la variabilité habituelle du climat local. La méthode « essais-erreurs » est malheureusement la seule possible, car il n'y a pas seulement les caprices de la météo à gérer, il y a aussi les multiples choix techniques et les impondérables des systèmes vivants, liés à l'entrée en lice de ce qu'on appelle couramment les ennemis des cultures. En conditions assez stables, l'apprentissage prend entre

5 et 10 ans¹⁵, mais, lorsque le climat évolue, l'ajustement est compliqué, surtout si les amortisseurs naturels de la biodiversité ont été fragilisés. Une plante sélectionnée pour produire beaucoup est un peu comme une formule 1, elle a besoin de soins intensifs et la moindre erreur de conduite peut mener à la sortie de route. Les soins nécessaires se mesurent ici en quantités d'engrais et d'eau, qui doivent être ajustés et apportés au bon moment, ainsi qu'en produits de traitement qui, en s'attaquant de manière brutale à de nombreux organismes, réduisent les capacités d'autorégulation des écosystèmes. Un cercle vicieux s'enclenche : le milieu voit sa résilience diminuer, ce qui oblige à intensifier la lutte et donc à augmenter encore les traitements. L'adaptation devient d'autant plus difficile. Le défi atteint son paroxysme pour les cultures pérennes comme la vigne ou les arbres fruitiers car, dans ce cas, les choix d'aujourd'hui auront des répercussions sur plusieurs décennies.

Enfin, l'autre conséquence de l'augmentation de l'évaporation est la réduction de la période de recharge des réserves en eaux souterraines, déjà évoquée au chapitre VI à propos des sécheresses, cette période étant tronquée à la fois à l'automne et au printemps. Cette réduction est un des facteurs explicatifs de la plus grande proportion de pluie transformée en eau verte lorsqu'il fait plus sec.

15. C'est ce qu'on observe quand les agriculteurs transitionnent vers un nouveau modèle. C'est à la fois l'agriculteur, les espèces et le milieu – le sol en particulier – qui évoluent progressivement pendant tout ce temps.

SALINISATION DES EAUX DOUCES CÔTIÈRES

La fonte progressive des glaciers et des calottes de glace du Groenland et de l'Antarctique contribue pour moitié à l'élévation du niveau des océans, dont le rythme actuel moyen est de 3,3 mm par an, avec une tendance à l'augmentation selon le GIEC. Son effet le plus visible est l'érosion du trait de côte, voire la reconquête par l'eau salée de territoires auparavant émergés. Mais on ignore bien souvent un autre impact, celui de l'intrusion du biseau salin dans les eaux douces des nappes côtières souterraines. L'eau salée est plus lourde que l'eau douce et ne se mélange pas facilement avec cette dernière, qui reste au-dessus. L'interface entre l'eau douce et l'eau salée de ces nappes forme un biseau qui s'étend dans les terres sur plusieurs centaines de mètres, voire kilomètres, en fonction du découpage de la côte et de la perméabilité des terrains.

Les zones côtières sont occupées par des habitations de plus en plus nombreuses qui demandent à être alimentées en eau potable. Or, pomper dans les nappes peut faire remonter l'eau salée même lorsqu'on prend garde de placer la pompe dans la couche d'eau douce. Ce risque s'accroît lorsque le niveau de la mer monte, car l'interface eau douce eau salée se rapproche de la surface et le biseau se propage vers l'intérieur des terres. L'eau salée peut alors se retrouver dans la zone d'influence des pompes et l'eau pompée se saliniser progressivement, jusqu'à devenir impropre à l'utilisation. En Bretagne, par exemple,

une centaine de captages d'eau potable sont considérés comme vulnérables à ce phénomène¹⁶.

Dans les atolls du Pacifique, dont l'altitude la plus élevée est souvent de moins d'une dizaine de mètres, la salinisation de l'eau douce souterraine va rendre ces îlots difficilement habitables avant même que la mer ne les submerge.

UNE NOUVELLE SCIENCE ET DES PHÉNOMÈNES INÉDITS

L'autre conséquence du dérèglement climatique est de rendre les événements extrêmes plus fréquents ou plus dangereux. Chaque année apporte son lot de catastrophes et de nouveaux records. La nature a mis un point d'honneur à donner des apparences diverses aux catastrophes hydriques qui peuvent prendre la forme de sécheresses, d'orages violents, d'inondations, de cyclones, de tempêtes, d'épisodes neigeux ou de gel extrêmes ou hors-saison, voire de ruptures de lacs glaciaires produites par la fonte des glaces¹⁷.

16. SIGES Bretagne, « Sensibilité des aquifères côtiers bretons aux intrusions salines », 2019. <https://sigesbre.brgm.fr/Sensibilite-des-aquiferes-cotiers-bretons-aux-intrusions>

17. Nathalie Mayer, « Les crues de lacs glaciaires menacent des millions de personnes dans le monde », Futura, 7 février 2023. <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/inondation-crues-lacs-glaciaires-menacent-millions-personnes-monde-103302/>

L'année 2022 n'a pas été en reste. La France et l'Europe ont subi une sécheresse qui a souligné notre vulnérabilité¹⁸ et mis à l'épreuve tous les utilisateurs d'eau, des plantes aux villes et villages en passant par les énergéticiens. À l'autre extrême, le Pakistan a subi des inondations catastrophiques qui ont placé 10 % du pays sous les eaux, affecté 30 millions de personnes et en ont tué 1 700¹⁹.

Pendant longtemps, les climatologues ont été incapables d'établir une relation de causalité entre ces épisodes et le dérèglement climatique. Le climat est en effet le résultat d'une succession d'événements météorologiques variables sur une longue durée. Il faut donc s'armer de patience pour montrer qu'il évolue. C'était sans compter sur les progrès de l'observation, de la mesure et des simulations sur ordinateur qui permettent de comparer précisément des scénarios, tenant compte par exemple de niveaux différents d'effet de serre. Dans ces scénarios, on sait tenir compte de l'augmentation de l'humidité de l'air et de l'évaporation d'eau de mer pendant les périodes chaudes ou encore des méandres de plus en plus marqués du jet-stream polaire en altitude qui rendent les changements de météo de plus en plus brutaux. Le besoin de préciser la manière dont le

18. À l'heure où j'écris, on apprend que la sécheresse a accéléré la mort de plus de 60 000 personnes en Europe.

19. Gary Dagorn, « Avant-après : les immenses inondations au Pakistan vues de l'espace », *Le Monde*, 8 septembre 2022. https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2022/09/07/avant-apres-les-inondations-catastrophiques-au-pakistan-vues-de-l-espace_6140573_4355770.html

dérèglement agit a donné naissance à une discipline de recherche spécifique, la science de l'attribution, portée par l'initiative World Weather Attribution²⁰. De nombreux événements extrêmes sont passés à la loupe et les ordinateurs permettent de comparer précisément ce qui se serait produit il y a quelques décennies. Cette science de l'attribution a clairement démontré que de nombreux événements, notamment des vagues de chaleur et des précipitations extrêmes, n'auraient pas pu se produire ou n'auraient pas eu la même intensité si nous n'avions pas enrichi notre atmosphère en gaz à effet de serre.

Certains phénomènes jusqu'ici peu observés trouvent aussi écho dans les médias. C'est le cas des « rivières atmosphériques ». Ces rivières se forment par évaporation d'une eau de mer chaude, généralement sous les tropiques, qui produit un courant remontant vers le nord en captant de plus en plus de vapeur d'eau. Elles peuvent atteindre 3 000 kilomètres de long et 800 kilomètres de large. Elles apportent des pluies en quantité bien supérieure à la normale et frappent surtout les États-Unis ou l'Australie. En Californie, elles apportent 30 à 50 % des précipitations annuelles en quelques jours et sont responsables de 80 % des inondations²¹. La France peut quant à elle être touchée par des rivières provenant des Antilles. En décembre 2022, une rivière de ce type, nommée « Rhum Express »,

20. Voir la présentation du WWA sur le site : <https://www.worldweatherattribution.org/>

21. Martin Ralph, « Les rivières atmosphériques ont leur vigie », *Pour la science*, n° 543, janvier 2023.

a déversé l'équivalent d'un mois de pluie en deux à trois jours sur la côte Atlantique²².

Sans atteindre de telles proportions, les fameux épisodes de pluie dits « cévenols » du sud de la France ont eux aussi tendance à devenir plus violents. En cause le réchauffement de l'eau de surface de la mer Méditerranée en fin d'été qui accroît son évaporation²³.

Ce n'est pas tant la fréquence des événements extrêmes qui change que l'intensité avec laquelle ils frappent ou la période à laquelle ils surviennent. L'analyse de la base de données mondiale Emergency Events Database (EM-DAT) des catastrophes naturelles est instructive à cet égard. La fréquence de l'ensemble de ces catastrophes, y compris les tremblements de terre et les éruptions volcaniques, augmente régulièrement depuis les années 1960 jusqu'aux décennies 1980 et 1990. Cette augmentation est plus marquée pour les tempêtes, cyclones et inondations et se poursuit jusqu'à la fin des années 2000. Elle a généré des débats et des conclusions peut-être un peu hâtives,²⁴ car depuis les années 2010, il est difficile de diagnostiquer

22. Karine Durand, « Phénomène météo extraordinaire : la rivière atmosphérique dans le ciel », Futura, 6 janvier 2023. <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/meteorologie-phenomene-meteo-extraordinaire-riviere-atmospherique-ciel-102647/>

23. Karine Durand, « Vers des épisodes cévenols amplifiés par les températures élevées de la mer Méditerranée ? », Futura, 14 août 2022. <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/meteorologie-vers-episodes-cevenols-amplifies-temperatures-elevees-mer-mediterranee-100199/>

24. Vinod Thomas, Ramón López, "Global Increase in Climate-Related Disasters", *ADB Economics Working Paper Series*, n° 466, novembre 2015. <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/176899/ewp-466.pdf>

une augmentation de la fréquence de ces catastrophes naturelles, à l'exception toutefois des épisodes de sécheresse les plus intenses qui ont provoqué des morts ou des déplacements de plus d'un million de personnes.

Concernant l'intensité de ces événements extrêmes, l'augmentation est en revanche régulière. Les températures en période chaude battent des records chaque année. La force des orages et l'intensité des pluies augmentent et génèrent des crues dévastatrices. Des inondations catastrophiques, comme celle au Pakistan en 2022, n'avaient pas été observées de mémoire d'homme. Ces augmentations d'intensité résultent de l'énergie supplémentaire disponible via l'effet de serre, énergie qui, nous l'avons vu, se stocke presque entièrement dans l'océan dont le réchauffement favorise l'évaporation. Plus d'énergie disponible, plus d'humidité dans l'atmosphère : les conditions sont réunies pour que l'eau déploie un pouvoir dévastateur.

UNE VARIABILITÉ SURPRENANTE

Une autre tendance est la variabilité grandissante des conditions météorologiques qu'illustre bien la Californie dans la dernière décennie, frappée d'abord par une terrible sécheresse jusqu'en 2022, puis par la pluie et des inondations catastrophiques de fin 2022 à début 2023. Le premier acte a asséché les barrages, provoqué des incendies géants, réduit la production agricole et provoqué des épisodes de dômes de chaleur extrême marqués avec des températures supérieures à 47 °C. Le second acte a été tout

aussi brutal : une quinzaine de rivières atmosphériques²⁵ ont été recensées entre fin décembre 2022 et fin mars 2023, apportant des quantités de pluie et de neige impressionnantes – plus du double des quantités moyennes à Los Angeles par exemple. De telles pluies ne s'infiltrent pas facilement dans des sols fortement desséchés et provoquent inmanquablement des inondations ou en période froide des chutes de neige monumentales.

La vallée de San Joaquin, bordée à l'est par la Sierra Nevada, a été particulièrement touchée. Elle est une des régions agricoles les plus intensives des États-Unis, connue pour sa production de fruits et légumes de toutes sortes (raisins, amandes, agrumes, asperges...), production faisant appel à de grandes quantités d'eau d'irrigation. Une rivière atmosphérique accompagnée d'un temps doux y a provoqué à la fois des pluies exceptionnelles et la fonte de l'épais manteau neigeux des montagnes la bordant. Les inondations ont été telles qu'elles ont fait réapparaître au sud de la vallée un lac immense de 260 km² qui avait totalement disparu depuis de nombreuses décennies. Ce lac, le lac Tulare, est emblématique de la manière dont la mauvaise gestion de l'eau par les humains peut aggraver la situation. Il était auparavant le plus grand lac à l'ouest du Mississippi et contenait jusqu'à 8 km³ d'eau ! Comme dans la mer d'Aral, mais sans que son cas ne provoque d'émotion, les apports d'eau s'y sont réduits dès le

25. Le nombre varie selon les sources entre 9 et 30 !

début du xx^e siècle, au fur et à mesure qu'on mobilisait de l'eau pour l'agriculture et qu'on drainait des marais. Le lac finit par disparaître totalement et fut investi par l'agriculture, profitant de la fertilité accumulée. C'est tout particulièrement l'élevage laitier qui s'y est développé, transformant la région en l'une des plus grandes laiteries au monde. Ce fameux lac fantôme, aussi incroyable que cela puisse paraître, est réapparu en quelques jours seulement, obligeant les éleveurs à évacuer en urgence quelques 100 000 vaches menacées de noyade!

Une telle variabilité est signe de désordres profonds dans le fonctionnement atmosphérique. Un élément clé est celui des modifications du jet-stream mentionné plus haut, ce vent de haute altitude qui circule d'ouest en est. Avec le dérèglement climatique, le jet-stream²⁶ s'est mis à produire des oscillations nord-sud de plus en plus grandes, ce qui déplace de grandes quantités d'air chaud ou froid qui peuvent faire brutalement basculer les conditions atmosphériques²⁷.

26. Il existe en fait un jet-stream polaire et un jet-stream tropical. Tous deux circulent d'ouest en est.

27. Pour plus de détails à ce sujet, voir Karine Durand, « Le réchauffement climatique est en train d'affaiblir le jet stream », Futura, 25 septembre 2022. <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/rechauffement-climatique-rechauffement-climatique-train-affaiblir-jet-stream-93577/>

L'EAU À LA FOIS ACTRICE ET VICTIME

L'eau est au cœur des événements extrêmes, mais elle en subit aussi les conséquences qui se propagent en cascade de multiples façons dans nos sociétés, nos économies et dans nos vies. Les secteurs impactés sont d'abord ceux en prise directe avec la météo comme l'agriculture, le tourisme ou l'énergie. Les conséquences se propagent ensuite soit immédiatement à l'économie d'un territoire, soit à plus long terme à la santé, via la propagation de maladies contagieuses, ou au fonctionnement des écosystèmes.

À moyen terme, les outils de gestion des risques naturels sont menacés par l'amplification des événements extrêmes. Le secteur de l'assurance en particulier redoute l'apparition d'une série de catastrophes qui pourrait affecter sa viabilité.

Les événements extrêmes ont aussi un impact considérable sur nos perceptions et notre état d'esprit vis-à-vis du dérèglement climatique. Qu'on en juge par la prise de conscience brutale qu'a générée la sécheresse de 2022. Jamais les questions d'eau n'avaient autant été sur le devant de l'actualité. Jamais le besoin de nous adapter, de consommer plus sobrement afin d'augmenter notre résilience, n'avait été aussi prégnant.

LA LIMITE PLANÉTAIRE DU DÉRÈGLEMENT CLIMATIQUE

Le climat est au cœur des réflexions sur les risques de sortie de la stabilité de l'holocène, comme nous l'avons vu au chapitre II. Le risque sera grand lorsque la température

moyenne de notre atmosphère sera de 2 °C supérieure à ce qu'elle était avant l'ère industrielle. En effet, au-delà, les nombreuses rétroactions positives possibles pourraient provoquer un emballement du réchauffement qui nous entraînerait dans un monde post-holocène inhospitalier.

Deux variables complémentaires ont été retenues pour apprécier le risque. La teneur en CO₂ de l'atmosphère est utilisée comme indicateur de l'effet de serre, car ce gaz est le principal filtre des rayons infrarouges ; son taux est influencé par notre consommation d'énergies fossiles. Avant l'holocène, sa concentration dans l'atmosphère était de 280 ppm²⁸. En 2022, elle était de 417 ppm. Le seuil retenu pour l'entrée dans une zone dangereuse est de 450 ppm ; nous nous en rapprochons dangereusement.

Mais l'effet de serre n'est pas le seul déterminant du bilan d'énergie de notre planète. La réflexion de l'énergie lumineuse incidente est également à prendre en compte. Si la planète se couvrait de glace ou de neige, son albédo augmenterait beaucoup : l'énergie lumineuse disponible serait réduite, ce qui refroidirait encore le climat. A contrario, plus la neige et la glace fondent, plus la planète conserve cette énergie lumineuse. Les effets globaux de l'albédo, de la présence d'aérosols dans l'atmosphère et du filtrage des rayons infrarouges sont combinés dans ce que les climatologues nomment le forçage radiatif, soit la variation nette d'énergie lumineuse reçue à la surface de la planète

28. Partie par million : 1 ppm correspond à une quantité de 1 gramme par tonne ou de 1 microgramme par kilo.

en raison des perturbations anthropiques. Cette variation nette est en augmentation et s'exprime en watts par mètre carré. Elle était de $2,91 \text{ W/m}^2$ en 2022 par rapport à sa valeur de 1750. Le seuil critique d'entrée dans une zone à haut risque retenu pour cette variable a été estimé à $1,5 \text{ W/m}^2$, une valeur aujourd'hui largement dépassée.

Les deux variables indicatrices du risque de déstabilisation du climat sont donc pour l'une proche du dépassement, et pour l'autre d'ores et déjà dépassée. La probabilité de sortie du climat confortable de l'holocène est donc grande pour notre planète.

Pour cette limite planétaire, l'eau n'est pas le moteur direct, mais constitue une courroie de transmission essentielle.

L'eau joue un rôle de vecteur des transformations du climat induites par l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre. C'est d'abord son cycle local qui est perturbé par l'augmentation de la demande évaporative liée à l'élévation des températures. Les stocks d'eau des sols sont plus vite épuisés, la période de recharge des nappes souterraines se réduit à l'automne et au printemps, l'absence d'eau à évaporer conduit à un réchauffement accru de la température de l'air qui aggrave encore la situation. Le résultat de ces changements est une diminution de la proportion d'eau bleue générée par la pluie, diminution particulièrement nette dans les pays du pourtour méditerranéen.

L'accroissement de la variabilité du climat ajoute à la difficulté d'agir. Elle touche toutes les échelles de temps et d'espace. Le réchauffement climatique est bien un dérèglement d'ensemble du fonctionnement de la planète. Des phénomènes rarement, voire jamais observés auparavant, n'arrêtent pas de se produire, augmentant notre perplexité. Les outils que nous avons développés pour gérer les risques se révèlent de moins en moins adaptés, car les risques eux-mêmes deviennent difficilement prévisibles et quantifiables.

IX. BIODIVERSITÉ ET INTÉGRITÉ DE LA BIOSPHÈRE

La prise de conscience de la dégradation de la biosphère est apparue plus récemment que celle du dérèglement climatique. L'accord de Paris sur le climat n'y est pas pour rien. En introduisant le concept de neutralité carbone, il a tout à coup mis sur le devant de la scène le rôle critique des écosystèmes continentaux et océaniques dans l'absorption du gaz carbonique que nous émettons. Ces puits de carbone, bienfaits de la photosynthèse des algues et de tous les végétaux, dépendent du bon fonctionnement de ces assemblages d'espèces et de chaînes trophiques que sont les écosystèmes. Avant l'holocène, du temps des cycles de glaciation-réchauffement, ils étaient moins efficaces, car l'étendue des glaces était bien plus grande. Pendant la dernière glaciation, l'ensemble du Canada et de l'Europe du Nord était recouvert de calottes de glace de 3 à 4 kilomètres d'épaisseur, qui occupaient 25 % des continents. Cette proportion a été réduite à 10 % depuis. Les écosystèmes ont dû se reconstituer à la fonte des glaces. Toute la végétation et la biodiversité des régions des hautes latitudes est encore en train de se développer.

PENSER LA NATURE ET SA DIVERSITÉ

Biodiversité, un terme que l'actualité ressasse, un véritable fourre-tout pour parler de « la nature » et qui, osons le dire, a tendance à être l'arbre qui cache la forêt tant on l'aborde surtout sous l'angle des espèces emblématiques en danger¹. La biodiversité c'est la diversité des organismes vivants dans un milieu donné, essentielle à son bon fonctionnement². Quand un écosystème est riche en espèces, les chaînes trophiques, la dégradation des déchets et le recyclage des nutriments fonctionnent. Il peut alors mieux répondre aux stress auxquels il peut être soumis par le climat ou d'autres perturbations. Ce bon fonctionnement est renforcé par la redondance : pour assurer les fonctions de production, de recyclage, de mobilisation d'énergie et de ressources, il vaut mieux multiplier les espèces, car les milieux évoluent en permanence. Certaines espèces vont devenir obsolètes et être remplacées par d'autres mieux adaptées. La biodiversité évolue donc sans arrêt. Elle est maximale dans les milieux chauds et humides.

La disparition d'insectes, d'oiseaux, de batraciens et autres mammifères est préoccupante dans les territoires artificialisés de la planète. D'autant que ce que nous

1. Rappelons toutefois que la disparition d'une seule espèce peut suffire à déstabiliser tout un écosystème.

2. Voir à ce sujet Georgina M. Mace *et al.*, "Approaches to defining a planetary boundary for biodiversity", *Global Environmental Change*, vol. 28, septembre 2014. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378014001368>

observons n'est que le sommet émergé d'un iceberg que nous connaissons encore peu. Chaque poignée de sol contient par exemple 10 000 espèces de microorganismes. Sur ce total, on n'a identifié que 1 % des bactéries et virus et 4 % des champignons³! La pyramide du vivant est sans doute solide, mais comme nous n'en connaissons que le sommet, nous n'avons qu'une vague idée de l'étendue des dégradations que nous lui faisons subir. La manière dont les sols, qui abritent 25 % de la biodiversité de la planète, sont abîmés par l'artificialisation et l'agriculture intensive en donne néanmoins une idée. Selon la mission *A soil Deal for Europe* de l'Union européenne⁴, entre 60 et 70 % des sols européens sont en mauvais état. Leur fertilité ne tient que grâce aux apports en grandes quantités de fertilisants et de produits de traitement qui accentuent encore leur dégradation.

La perte de biodiversité actuelle est telle qu'elle a pris le nom de sixième extinction⁵, en référence aux grandes disparitions d'espèces que la planète a connues précédemment, la cinquième d'entre elles étant celle de la disparition des dinosaures.

3. Manuelle Rovillé, « Le petit peuple du sol », CNRS/sagascience, décembre 2008. https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbiodiv/index.php?pid=decouv_chapC_p5_c1&zoom_id=zoom_c1_1

4. "EU Mission: A Soil Deal for Europe". https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe/eu-missions-horizon-europe/soil-health-and-food_fr

5. Voir Elizabeth Kolbert, *La 6^e Extinction. Comment l'homme détruit la vie*, Vuibert, 2015.

Par extrapolation, le terme de biodiversité invoque souvent l'état de santé des écosystèmes et de la biosphère et leur capacité à fournir des services tels que la pollinisation des plantes, le recyclage des déchets, la purification de l'eau ou la protection contre l'érosion. Ces services constituent le socle sur lequel nos sociétés peuvent vivre et prospérer. Ils contribuent à notre résilience et à notre qualité de vie.

La biodiversité continentale et les services qu'elle nous rend dépendent de l'eau et de son cycle de nombreuses manières. Les microorganismes et les végétaux qui captent le gaz carbonique de l'air ont besoin d'eau pour vivre et prospérer. Comme nous l'avons vu, l'eau verte est au cœur de l'intégrité de la biosphère en redistribuant l'eau sur les continents, en se stockant dans les sols pour être à la disposition de ces organismes. L'eau joue d'ailleurs un rôle essentiel dans le développement de la fine peau des continents, le sol, qui résulte de processus biogéochimiques lents qui génèrent un milieu fertile, même sans apports d'engrais ou de pesticides. Elle transporte aussi des substances nutritives via les sédiments des rivières et permet la migration d'espèces.

BIODIVERSITÉ ET MILIEUX AQUATIQUES

Les écosystèmes d'eau douce et des zones côtières sont les plus sensibles à la quantité et à la qualité de l'eau. Ils sont menacés par les pollutions, l'augmentation des prélèvements d'eau et les aménagements. Ces menaces sont de mieux en mieux comprises et prises en compte dans les pays industrialisés. Le contrôle et l'épuration des eaux usées s'améliorent. Les mesures permettant aux cours d'eau de retrouver leur écoulement naturel se multiplient. On favorise les méandres et les débordements en cas de crue. On efface les seuils, les barrages et dérivations inutiles afin de restaurer la continuité écologique qui facilite le déplacement des espèces, notamment de poissons⁶. Mais tous ces efforts sont contrebalancés par l'évolution du climat qui influe sur de nombreux paramètres, à commencer par la quantité et la température de l'eau. Ce dernier paramètre est particulièrement important pour le développement des cyanophycées, ces algues responsables de la couleur verte de l'eau des étangs, qui prolifèrent au-delà de 25 °C.

En France, quelque 15 espèces de poissons d'eau douce sur les 69 natives de nos cours d'eau figurent sur la liste rouge des espèces fortement menacées établie par l'UICN⁷.

6. En France, on ne recense pas moins de 60 000 obstacles à l'écoulement des cours d'eau. Onema (Office national de l'eau et des milieux aquatiques), *Pourquoi rétablir la continuité écologique des cours d'eau ?*, septembre 2010. https://www.genieecologique.fr/sites/default/files/documents/biblio/pourquoi_retablir_la_continuite_des_cours-deau.pdf

7. Union internationale pour la conservation de la nature.

La situation est également inquiétante pour les crustacés d'eau douce et les amphibiens⁸. Concernant les milieux côtiers, la principale menace est celle, vue au chapitre VII, de l'eutrophisation qui génère proliférations d'algues et diminution de l'oxygène dissous. La prolifération d'une seule espèce peut perturber l'ensemble de l'écosystème côtier. Lorsque les algues s'accumulent sur un fond marin riche en espèces variées, de nombreuses d'entre elles sont purement et simplement asphyxiées⁹.

LE CAS DES ZONES HUMIDES

Les zones humides pâtiennent particulièrement de leur assainissement et de leur transformation en terres productives. 80 à 90 % d'entre elles ont disparu depuis le début du xx^e siècle¹⁰. Dans leur état originel, elles produisent de nombreux services tels que la purification de l'eau, la régulation des débits ou le stockage de carbone¹¹.

8. Michelet, Paul, « La biodiversité des milieux aquatiques continentaux en France métropolitaine : état des lieux et menaces », *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, vol. 86, n° 2, 2017. <https://www.cairn.info/revue-responsabilite-et-environnement-2017-2-page-36.htm>

9. Julia Toussaint, « Algues vertes : en rade de Brest, un fléau moins visible mais tout aussi destructeur », *Ouest-France*, 21 novembre 2022. <https://www.ouest-france.fr/environnement/algues-vertes/algues-vertes-en-rade-de-brest-un-fleau-moins-visible-mais-tout-aussi-destructeur-976d2a9c-4ee2-11ed-b832-30b1043f3243>

10. Présentation « Zones humides et biodiversité » sur le site zones-humides, 24 mai 2023. <http://www.zones-humides.org/zones-humides-et-biodiversite-2>

11. Dans leur état de fonctionnement actuel, elles neutralisent entre 1 et 4 % des émissions de gaz à effet de serre en Europe selon l'Agence européenne pour l'environnement.

Elles abritent aussi des écosystèmes spécifiques et fragiles inféodés à la présence continue d'eau. On estime que 50 % des espèces d'oiseaux et 30 % des espèces végétales menacées dépendent des zones humides.

Le drainage et l'assainissement de ces milieux humides ont été réalisés avec de bonnes intentions. Le paludisme, on l'oublie souvent, a été un véritable fléau, même en France, pendant des siècles. Il était responsable d'une forte mortalité dans toutes les régions. Au début du xx^e siècle, des épidémies survenaient encore et il fallut attendre les années 1960 pour le voir éradiqué dans ses derniers retranchements en Camargue et en Corse¹². Partout au cours des siècles, les travaux d'assainissement se sont accompagnés d'une diminution de la mortalité. Et comme de nombreuses terres drainées avaient auparavant accumulé beaucoup de matière organique et une bonne fertilité, l'agriculture et l'économie de ces régions souvent pauvres ont prospéré.

Les marais de l'ouest en France sont emblématiques à cet égard. Pendant des siècles, ils ont été aménagés, transformés par les activités humaines qui y ont créé une biodiversité particulière tout en cherchant à les rendre habitables en évacuant l'eau plus rapidement afin d'éviter les crues. La situation a paru se stabiliser quand un parc

12. Patrice Bourée, « La lutte contre le paludisme en France au cours des siècles », *Histoire des sciences médicales*, 1982, vol. 17 (n° spécial 1). <https://www.biusante.parisdescartes.fr/sfhtm/hsm/HSMx1982x017xspecl1/HSMx1982x017xspecl1x0136.pdf>

naturel régional du Marais poitevin a été créé à la fin des années 1970. Mais la victoire de la nature a été brève et la richesse du Marais a rapidement décliné sous les coups de boutoir des subventions de la politique agricole commune européenne qui ont favorisé la production intensive de céréales, elle-même dépendante d'une évacuation de l'eau des sols par un drainage lui aussi intensif.

Le cas des tourbières est problématique, car ces zones humides ont accumulé des stocks colossaux de matière organique – et donc de carbone – dont la dégradation a été empêchée par la présence permanente d'eau réduisant l'oxygène disponible. Ces stocks se dégradent après drainage, car l'eau évacuée est remplacée par de l'oxygène que des bactéries utilisent pour digérer la matière organique accumulée. Et ceci à un rythme 20 ou 30 fois plus rapide que celui nécessaire à sa constitution. Sur les 260 000 km² de tourbières des pays de l'Union européenne¹³, l'équivalent d'une demi-France métropolitaine, la moitié est dégradée et 43 000 km² sont drainés pour l'agriculture. Les tourbières ont été exploitées pendant longtemps pour la tourbe qui sert de combustible ou de substrat en horticulture. La dégradation des tourbières génère environ 15 % de la totalité des émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture européenne sur les 3 % de la superficie agricole qu'elles occupent.

13. Chiffres du Greifswald Mire Centre, incluant encore le Royaume-Uni.

On observe ici encore l'interdépendance entre l'eau, le carbone et la biodiversité. L'eau permet aux végétaux de coloniser et de créer des sols et des écosystèmes en y stockant du carbone et d'autres éléments nécessaires à la vie. Elle contribue largement, des sols aux paysages, à la diversité des organismes et des milieux. L'homme peut favoriser la biodiversité s'il intervient de manière modérée sur ces milieux, en évitant de les transformer par des pratiques exagérément extractives. Dès qu'un milieu a été dégradé, sa réparation prend en général beaucoup de temps et est souvent hasardeuse¹⁴.

EAU ET INTÉGRITÉ DE LA BIOSPHERE

Dans son acception élargie, la biodiversité inclut la capacité des écosystèmes à fournir à notre planète son socle d'habitabilité. Dans cette perspective, elle doit être appréhendée en fonction de plusieurs échelons emboîtés, des sols jusqu'aux grands biomes tels que les forêts tropicales ou les savanes en passant par des niveaux intermédiaires comme les prairies ou les paysages.

L'eau joue un rôle critique sur tous les écosystèmes. Au niveau local, l'eau verte alimente les sols et permet la croissance d'une diversité de plantes. À l'échelle des paysages, le stockage et la redistribution des eaux verte et bleue créent des conditions variées et des mosaïques de milieux.

14. Voir à ce sujet *Des poissons dans le désert, quand l'homme répare la nature*, d'Elizabeth Kolbert (Buchet-Chastel, 2022).

À l'échelle de pays ou de continents, le recyclage continental d'eau verte permet de mobiliser plusieurs fois de suite, au bénéfice de régions et d'écosystèmes divers. À l'échelle de la planète, les grands biomes, et en particulier les forêts tropicales, influencent la circulation atmosphérique et celle de la vapeur d'eau. La disparition de ces forêts réduirait les flux de vapeur d'eau en provenance de l'océan notamment durant les périodes sèches, quand la forêt continue son travail d'extraction d'eau. Dans le cas de la forêt amazonienne, l'extinction de ces flux entraînerait une réduction en cascade du recyclage d'eau en direction du sud-ouest et un assèchement progressif du climat d'une grande partie de l'Amérique du Sud¹⁵.

L'eau et l'atmosphère sont dans un jeu permanent d'interactions et de rétroactions que la végétation soutient ou amplifie. Dans ce jeu, les forêts jouent un rôle essentiel grâce à leurs racines qui puisent l'eau en profondeur et contribuent à la formation et à la protection des sols comme nous l'avons vu au chapitre VI. Les racines de chaque arbre peuvent être associées avec 10 à 20 champignons. Les hyphes mycéliens, ces longs filaments dix fois plus fins que les racines, en forment la partie immergée. Ils ont la capacité d'explorer le sol de manière plus efficace que les racines ; ils peuvent également « excréter » des vésicules riches en enzymes qui « digèrent » des substances

15. Delphine C. Zemp *et al.*, "Self-amplified Amazon Forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks", *Nature communications*, vol. 8, 13 mars 2017. DOI 10.1038/ncomms14681

du sol et contribuent à la nutrition des arbres qui en retour leur fournissent aussi l'énergie et le carbone dont ils ont besoin.

Le sol est donc un intermédiaire essentiel du cycle et de la gestion de l'eau verte. Au cours des millénaires, cette «peau planétaire» s'est développée et joue aujourd'hui un rôle tampon fondamental grâce au stockage de 100 à 200 litres d'eau par mètre carré d'eau verte. Ces relations vertueuses entre climat, eau, sol et végétation ne sont pas éternelles comme le montrent le cas du Sahara qui était encore vert il y a 6 000 ans ou la forte dégradation des sols soumis à l'agriculture intensive. La dégradation de la végétation, sous l'influence de sécheresses prolongées, peut contribuer à un cercle vicieux de désertification. Moins de plantes, cela signifie un sol plus sensible à l'érosion, une moindre capacité d'infiltration, une température du sol et de l'air plus élevée et donc une dégradation générale de l'habitabilité du milieu. Ces processus sont lents et s'étalent sur plusieurs centaines ou milliers d'années. Le Sahara, par exemple, a vu sa dégradation s'étaler sur 3 000 à 4 000 ans, alors que la production d'eau bleue diminuait et que les précipitations annuelles chutaient d'environ 300 millimètres annuels jusqu'aux 25 millimètres actuels. Comme pour l'Amazonie, l'océan – ici l'Atlantique dans le golfe de Guinée – joue un rôle clé. Des températures plus chaudes de sa surface sont associées à des précipitations de saison chaude plus importantes dans les régions sahé-liennes et vice versa.

LES LIMITES PLANÉTAIRES DE LA BIODIVERSITÉ ET DE LA DÉFORESTATION

La stabilité de notre planète pendant l'holocène est forcément liée au fonctionnement de la biosphère. Mais comment ? Quelles variables de contrôle et quels seuils retenir pour prédire cette stabilité puisque, même pendant cette période, des changements importants sont intervenus comme nous l'avons vu pour le Sahara ?

Dans l'article fondateur sur les limites planétaires, la variable retenue était le rythme d'extinction des espèces qui s'est maintenu sous la barre de 1 extinction par million d'espèces et par an pendant l'holocène. La limite proposée est une valeur dix fois plus élevée, soit 10 extinctions par million d'espèces et par an. Or nous sommes aujourd'hui à un rythme largement supérieur à une centaine d'extinctions par million d'espèces et par an. Un million d'espèces sont menacées d'extinction et plus de 10 % de la diversité génétique des plantes et animaux a sans doute été perdue au cours des 150 dernières années¹⁶.

Mais de nombreuses raisons poussent à compléter cette approche¹⁷ qui ne distingue ni les rôles écologiques ni l'abondance relative des différentes espèces éteintes. De plus, les extinctions sont locales et on ne sait pas

16. Katherine Richardson *et al.*, "Earth beyond...", *op. cit.*

17. Georgina M. Mace *et al.*, "Approaches to defining a planetary boundary for biodiversity", *op. cit.*

comment relier la dégradation d'écosystèmes locaux au fonctionnement global de la planète. Enfin, la connaissance des extinctions est surtout fiable pour les vertébrés qui représentent moins de 2 % des espèces. La variable retenue est donc à la fois imprécise et son rôle prédictif difficile à établir.

Il a donc été proposé de compléter cette limite. L'approche devrait idéalement combiner trois aspects. Celui de la diversité phylogénétique tout d'abord, qui tient compte, non seulement de la diversité, mais aussi des positions des espèces présentes dans l'arbre de l'évolution. Celui du maintien de la diversité et des équilibres entre les grandes fonctions écologiques au sein des écosystèmes : l'organisation des chaînes trophiques, la circularité des flux de matière, les relations de compétition et de coopération entre espèces doivent être résilientes. Celui enfin de la stabilité des grands biomes qui aurait l'avantage d'être à l'échelle de la planète et fournirait sans doute une bonne garantie de stabilité, mais requerrait la définition de seuils différents pour chaque biome.

Étant donné la complexité de cette combinaison, une variable de contrôle plus simple a été retenue : la production primaire nette de matière organique des biomes de la planète et plus précisément la part de cette production que se sont appropriée les humains. Pendant l'holocène, les écosystèmes mobilisaient l'équivalent de 56 Gt (gigatonnes ou milliards de tonnes) de carbone chaque année de manière régulière, une valeur qu'on retrouve à l'aube

de la période préindustrielle en 1700. Depuis lors, le développement de l'agriculture et l'enrichissement en carbone de l'atmosphère ont accru cette production à hauteur de 66 Gt de carbone par an en 2020¹⁸. Toutefois, les activités humaines détournent de ce total et réduisent le potentiel planétaire d'environ 30 % en 2020 au travers de l'agriculture, de la foresterie et de la déforestation, tandis que la valeur seuil à ne pas dépasser a été estimée à 20 %.

Considérant les deux facettes de la biodiversité ci-dessus, les chercheurs concluent que la dégradation atteinte nous fait également entrer dans une zone à fort risque de sortie de la zone de confort et de stabilité de l'holocène.

Outre la biodiversité, un autre risque a été inclus dans l'approche des limites planétaires, celui engendré par la déforestation qui influe sur la biodiversité et sur le climat, notamment via le recyclage continental (voir chapitre II). Cette limite planétaire est quelque peu redondante avec celle de l'intégrité de la biosphère évoquée ci-dessus, mais elle souligne l'importance des grandes forêts pour la stabilité de la planète. La variable retenue est la proportion relictuelle des grandes forêts tropicales, tempérées et boréales par rapport à l'holocène. L'entrée dans une zone à fort risque de déstabilisation est, pour cette variable, estimée à 54 % des superficies initiales. La valeur atteinte

18. Pour un potentiel total estimé à 71 Gt de carbone par an.

en 2023 était de 60 %, un peu au-dessus de ce seuil (voir Annexe 1).

Même si ces considérations nous ont apparemment éloignés de l'eau, nous en sommes restés proches, car, à tous les échelons, du sol à la planète, l'eau, tant verte que bleue, à travers sa circulation, son stockage ou les substances qu'elle redistribue, joue des rôles essentiels pour la biodiversité et pour la productivité des écosystèmes. Comme nous l'avons vu au chapitre IV, les cycles du carbone et de l'eau sont tous deux dépendants du bon fonctionnement des algues et des plantes et sont interdépendants.

L'eau douce est essentielle au fonctionnement de tous les écosystèmes continentaux et à la biodiversité. Elle intervient à toutes les échelles, de la cellule jusqu'à la planète tout entière. Il est de plus en plus évident que les enjeux du climat, de la désertification, de la biodiversité dépendent tous de l'eau et sont étroitement liés. Leurs conventions internationales placées sous les auspices des Nations unies devraient coopérer davantage pour que les négociations internationales les intègrent le plus possible.

Dans cette deuxième partie, nous avons éclairé la dimension planétaire des enjeux de l'eau. Ceux-ci sont étroitement liés à ceux du dérèglement climatique, à ceux des cycles des principaux atomes de la vie et de la biodiversité. Rien d'étonnant à cela dans une planète qui tient sa couleur à l'abondance de l'eau. L'eau, à la fois actrice et victime des dérèglements, joue un rôle essentiel dans le transport et la distribution planétaire de l'énergie et des principaux atomes du vivant, carbone, azote et phosphore notamment. Dans le contexte de l'anthropocène, son rôle est amplifié par l'accroissement de l'effet de serre et l'altération des grands cycles biogéochimiques provoquée par l'activité humaine. Dans le même temps, les flux qu'elle génère finissent par se retourner contre elle puisqu'elle accumule une bonne part de l'énergie et des atomes excédentaires. En retour, cette accumulation perturbe singulièrement les mécanismes de la vie terrestre que ces flux avaient générés et entretenus depuis des millions d'années.

En 2023, six des neuf limites planétaires identifiées étaient considérées comme risquant de faire sortir le fonctionnement de la planète de la période stable et confortable de l'holocène. L'approche des limites planétaires souligne la multiplication des dangers et des menaces. Elle cherche avant tout à nous faire percevoir la dimension systémique et multifactorielle des risques auxquels nous exposons nos enfants. Les limites planétaires sont toutes étroitement corrélées, ce qui montre que les solutions à mettre en place pour stabiliser la planète doivent être pensées d'une manière aussi holistique que possible.

Si l'eau est une actrice planétaire majeure, elle peut aussi contribuer aux solutions. Comme elle est avant tout une ressource locale, elle est à notre portée. Nous pouvons non seulement mieux la gérer dans nos territoires, mais, par la même occasion, contribuer à la stabilité de la planète et à notre résilience.

TROISIÈME PARTIE

MISER SUR L'OPTIMISME
DE LA VOLONTÉ

X. AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE NOS USAGES

Dans cette troisième partie, nous insistons sur l'importance d'une pensée holistique pour la recherche et la mise en place de solutions. Si l'eau douce n'est pas une ressource infinie bien qu'étant renouvelable, il importe de la penser à la fois au niveau local et à l'échelle de la planète, de prendre en compte l'eau bleue aussi bien que l'eau verte, mais aussi les eaux usées ou l'eau de mer. Il faut également apprivoiser la complexité de sa circulation aussi bien dans l'atmosphère que dans les tuyaux et infrastructures de nos sociétés et intégrer les subtilités de nos usages. Se restreindre aux prélèvements d'eau bleue pouvait suffire dans un contexte d'abondance et en l'absence de dérèglement planétaire. Ce n'est plus le cas aujourd'hui. Le cadre fourni par l'approche de l'empreinte eau volumique (eau bleue, verte, grise et virtuelle) fournit des premières pistes.

Les solutions aux enjeux que nous devons affronter doivent être analysées à l'aune de quatre prismes complémentaires : l'efficacité, la sobriété, la résilience et la régénération. Il nous faut aussi accepter le fait que dans les systèmes complexes et autoadaptatifs que sont les sociétés humaines, la mise en place d'une solution, d'une nouvelle technologie, d'une mesure réglementaire, d'un

changement de gouvernance, a des conséquences difficilement prévisibles, car nous avons de fortes capacités à réagir, à nous adapter, à changer nos comportements. Il nous faut donc expérimenter et prendre le temps d'examiner comment « le système » réagit.

L'EFFICACITÉ, PARADIGME MAJEUR DU XX^e SIÈCLE

Le premier prisme, l'amélioration de l'efficacité ou de l'efficience des usages de l'eau, est la base de tout plan d'action et aussi ce que nous avons pris l'habitude de faire. Faire plus avec la même quantité : plus de production, plus de personnes desservies, réduire les fuites ou les gaspillages sont quelques exemples de ce qui nous vient immédiatement à l'esprit. L'économie étant une des bases de nos sociétés, cette amélioration est souvent pensée en termes de rapport coût-efficacité.

L'augmentation de l'efficacité¹ a été un des paradigmes majeurs du xx^e siècle. C'est avec Taylor et ses propositions sur l'organisation scientifique du travail qu'il prend son essor. N'est-il pas logique d'essayer de se débarrasser des grains de sable qui grippent les rouages, de chercher à éliminer

1. On distingue généralement l'efficience, qui s'attache essentiellement au processus, par exemple le taux de fuites dans un réseau, de l'efficacité qui vise à maximiser des résultats, par exemple la quantité produite pour un apport d'eau donné. Nous ne parlons ici que d'efficacité pour simplifier le propos.

les frottements indésirables dans les machines, les procédés, l'économie? Et puis, ne sommes-nous pas dans un monde où la compétition nous pousse à toujours faire mieux, et donc à progresser? Les gains d'efficacité sont au fil du temps devenus la mesure et l'étalon de notre progrès.

S'il faut reconnaître que le développement économique depuis la révolution industrielle a énormément bénéficié de cette recherche d'efficacité, on doit aussi prendre davantage conscience des conséquences de cette priorité sur nos comportements et sur notre capacité à imaginer de nouvelles solutions lorsqu'on se rapproche des limites de disponibilité des ressources de notre planète.

UN CAS CLINIQUE : L'EAU POTABLE

Depuis la première décennie onusienne de l'eau potable dans les années 1980 et surtout depuis le troisième sommet de la Terre à Rio en 1992, une prise de conscience de la valeur de l'eau s'est fait jour. Elle s'est traduite notamment par la création en 1996 de deux organisations mondiales, le Conseil mondial de l'eau (World Water Council-WWC) et le Partenariat mondial de l'eau (Global Water Partnership – GWP)², chargées de sensibiliser l'humanité à l'importance de la gestion des services et des ressources en eau. C'est dans ces années qu'est apparue

2. Voir les sites du WWC : <https://www.worldwatercouncil.org/en> et du GWP : <https://www.gwp.org>

l'idée d'une crise mondiale de l'eau présentée surtout comme une crise de gouvernance. Deux rapports emblématiques, présentés au Forum mondial de l'eau de La Haye en 2000 par les deux organisations ci-dessus, marquent cette période, celui de la *Vision mondiale pour l'eau* et celui du *Cadre d'action mondial pour l'eau*. Le point de vue exprimé dans la *Vision mondiale pour l'eau*, « Faire de l'eau l'affaire de tous³ », est que « tous les usages pourraient être assurés dans le futur, sans épuiser le capital naturel de la planète, si tout le monde s'engageait à améliorer la gestion de l'eau⁴ ».

De cette prise de conscience sont nés des messages ancrés dans notre inconscient collectif : pour préserver l'eau, fermons le robinet en nous brossant les dents ; prenons plutôt des douches que des bains ; réutilisons, dans les hôtels, nos serviettes de toilette ; réutilisons les eaux usées de différentes manières. L'utilisation d'eau potable et notre conscience de ses impacts ont incontestablement bénéficié de ces messages pratiques. Selon l'Observatoire national des services d'eau et d'assainissement⁵, la consommation d'eau potable par habitant est passée en France

3. William Cosgrove, Frank Rijsberman, *World Water Vision: Making Water Everybody's business*, Londres, Earthscan, 2000.

4. Traduction du livre op. cit. en français : William Cosgrove, Frank Rijsberman, *World Water Vision*. « Faire de l'eau l'affaire de tous », Londres, Earthscan, 2000. https://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/world_water_council/documents/WWA_CHAP-2.pdf

5. Observatoire national des services d'eau et d'assainissement : <https://www.services.eaufrance.fr/>

de 165 litres par an en 2004 à 148⁶ litres en 2020. Une diminution à comparer toutefois avec l'augmentation qui l'a précédée : une vingtaine de litres à la fin du XVIII^e siècle, 106 litres en 1975. Nos « besoins » ont évolué drastiquement : davantage de douches, usages plus fréquents des lave-linge ou lave-vaisselle, augmentation du nombre de piscines. Avec plus de 3,2 millions de piscines⁷, la France bat tous les records⁸. Et la construction ne faiblit pas puisqu'on en construisait environ 200 000 par an au début des années 2020. Les régions sud comptent souvent de 30 à 40 piscines enterrées pour 100 logements contre une dizaine dans de nombreuses régions plus au nord⁹.

Une évolution typique s'observe. On consomme d'abord davantage en réponse à une élévation du niveau de vie qui s'accompagne de nouveaux besoins. Puis on cherche à améliorer l'efficacité. Le débat sur les piscines lors de la sécheresse de 2022 illustre cette tendance. Il a vite déplacé la question de l'opportunité de construire une piscine vers celle de la manière la plus efficace pour la gérer. Et les arguments avancés sont convaincants :

6. Les usages collectifs des hôpitaux, écoles, parcs et nettoyage des rues se rajoutent à cette consommation domestique et conduisent à des *prélèvements* totaux de 216 litres par habitant et par an.

7. On comptait, en 2022, 1,55 million de piscines enterrées et 1,64 million de piscines hors sol d'après la Fédération des professionnels de la piscine et du spa (FPP).

8. À l'exception des États-Unis.

9. Voir Jérôme Fourquet et Jean-Laurent Cassely, *La France sous nos yeux*, *op. cit.*

le remplacement de l'eau des piscines ne se fait maintenant plus qu'en moyenne tous les quatre ans, ce qui a considérablement réduit le besoin en eau. La querelle des chiffres bat son plein. La fédération des piscinistes français évalue à 15 m³ par an en moyenne l'utilisation d'eau d'une piscine et la réduction de consommation de 45 % en 25 ans¹⁰. D'autres évaluent l'utilisation moyenne à 27 m³, avec une réduction par 5 depuis 40 ans¹¹. Le débat achoppe sur l'utilité des moyennes annuelles qui ne rendent pas compte de la diversité des situations ni dans le temps ni dans l'espace. Pour les tenants des valeurs élevées, c'est pendant les périodes chaudes qu'il faut analyser les conséquences des prélèvements sur l'équité de l'allocation de l'eau. Le débat souligne qu'avec notre culture et notre vision du progrès, il est plus facile de débattre d'efficacité que d'opportunité ou de sobriété, point sur lequel nous allons revenir.

En toute logique, les changements de comportement visant à plus d'efficacité rencontrent rapidement des réponses technologiques. Des dizaines d'accessoires, aérateurs, mousseurs, économiseurs de débit en tous genres ont été développés pour rendre notre consommation plus

10. Emma Donada, « Checknews. Sécheresse: combien les piscines privées consomment-elles d'eau? », *Libération*, 26 août 2022. https://www.liberation.fr/checknews/secheresse-combien-les-piscines-privees-consomment-elles-deau-20220826_GOYIKE2XFZDNPCVUV3PZZIKHYY/

11. Fédération des professionnels de la piscine et du spa. <https://www.propiscines.fr/search/consommation-d'eau>

efficace, plus « verte », mais finalement éviter de trop réfléchir à nos impacts et répondre à un besoin de réduction de consommation par une autre consommation.

L'augmentation d'efficacité passe aussi par la réduction des fuites dans les réseaux, souvent remise à plus tard par manque de suivi. Lors de la sécheresse de 2022, de nombreuses communes ont découvert l'ampleur du problème. Les fuites des réseaux d'eau potable sont estimées en France à 20 % de l'eau prélevée, soit environ 1 milliard de m³. Elles sont stables depuis le début des années 2010¹² et varient notamment en fonction du rapport entre le nombre de personnes desservies et la taille du réseau : plus étalée est l'agglomération, plus ce rapport est faible et plus les fuites sont proportionnellement importantes. D'autres critères, comme la topographie ou la stabilité des sols, jouent également. L'autre critère fondamental est celui de la qualité de l'entretien du réseau, souvent délaissé notamment dans les communes rurales dépourvues de moyens techniques ou budgétaires ou parce qu'il est plus facile de mobiliser de l'argent pour de nouveaux investissements bien visibles que pour les coûts de fonctionnement liés à la maintenance. Des fuites de la moitié des quantités d'eau potable produites ne sont pas étonnantes lorsqu'un réseau a été peu entretenu.

12. D'après les chiffres du Sispea (Système d'information des services publics d'eau et d'assainissement), cité par l'Office international de l'eau. <https://chiffrecl.eoieau.fr/1817>

La recherche de fuites et l'entretien régulier sont donc essentiels pour l'amélioration de l'efficacité. Un rendement de 80 % est un objectif réaliste pour la plupart des communes, selon l'Insee¹³. Observons cependant que l'eau qui fuit d'un réseau n'est pas complètement perdue. Elle s'infiltre et peut rejoindre les nappes souterraines ou les cours d'eau ou devenir de l'eau verte en contribuant à la consommation des plantes et des écosystèmes. Ce n'est pas tant l'eau qui est en jeu ici que toutes les ressources requises pour la produire, l'énergie du pompage et du transport, les traitements pour sa potabilisation ou son épuration ou encore les contrôles effectués le long de son parcours. L'eau potable est un produit à haute valeur ajoutée!

L'EAU AGRICOLE, BLEUE, VERTE OU VIRTUELLE

S'il est un domaine où les gains d'efficacité peuvent avoir un fort impact, c'est celui de l'agriculture. Nous avons vu qu'en moyenne sur la planète (voir chapitre III), 30 % de l'eau bleue prélevée pour l'irrigation n'est pas utilisée par les plantes. Comme pour l'eau potable, cette eau n'est pas vraiment perdue : elle réalimente les nappes souterraines ou les cours d'eau des régions irriguées. Dans les régions arides, apporter un peu plus d'eau que

13. Voir l'indicateur 06.i4 de l'INSEE ainsi que : <https://www.amf.asso.fr/documents-eau-assainissement-les-donnees-du-dernier-rapport-observatoire/40214#:~:text=Toujours%2020%20%25%20de%20fuites&text=Le%20chiffre%20reste%20quasi%20constant,dans%20passer%20par%20le%20consommateur%20>».

le strict besoin des plantes est nécessaire pour lessiver les sels apportés au sol par l'irrigation. À raison de plusieurs milliers de mètres cubes d'eau par hectare et par an, une eau contenant 1 ou 2 grammes de sel par litre, une salinité courante même dans nos eaux de boisson, apporte plusieurs tonnes de sel chaque année. On ajoute donc aux besoins des plantes ce qu'on appelle une « fraction de lessivage » pour éviter l'accumulation de ces sels. Si les apports d'eau excèdent les besoins, les nappes profondes risquent de remonter vers la surface et d'augmenter l'évaporation (voir chapitre VI). Dans ce cas, les sels lessivés se redéposent à la surface du sol. Ce phénomène de salinisation s'est développé à grande échelle dans les dernières décennies du xx^e siècle. La réponse des agriculteurs a été un peu partout de pomper cette eau, ce qui a augmenté l'efficacité de l'eau d'irrigation et diminué les risques de salinisation¹⁴. Pour peu que la salinisation des sols soit sous contrôle, comme pour l'eau potable, ce n'est pas tant l'eau que les coûts d'infrastructures et d'énergie qui sont en jeu. Des marges importantes d'efficacité sont donc possibles et hautement souhaitables grâce à des techniques d'irrigation localisée. Plus généralement, l'ingénierie de l'irrigation requiert un changement de paradigme : passer d'une gestion dite par l'offre – la mise en place d'infrastructures et d'équipements peu calibrés sur la pratique et sur la demande des agriculteurs, qui a longtemps

14. Voir Daniel Zimmer, *L'Empreinte eau*, *op. cit.*

prévalu –, à une gestion par la demande, plus complexe, car anticipant sur l'évolution des cultures et du comportement des irrigants, mais potentiellement plus efficace¹⁵.

Les marges d'efficacité sont encore plus importantes pour l'eau verte de l'agriculture pluviale qui reste celle dont dépend le plus notre alimentation. Pour les céréales, quand le rendement est inférieur à 2 tonnes par hectare, une partie de l'eau s'évapore par le sol et non par les plantes et l'efficacité diminue. Comme nous l'avons vu au chapitre III, le gisement total d'économies d'eau verte a été estimé à environ 1 500 km³ d'eau chaque année, un sixième de notre empreinte eau totale. Ce qui importe ici est à la fois l'eau et la biodiversité, sur laquelle notre prise pourrait être significativement réduite.

La recherche et l'innovation relatives à l'utilisation de l'eau verte sont à la traîne. Dans la course à l'efficacité, nos préférences quasi inconscientes vont aux *high-tech* plutôt qu'aux *low-tech*. Pourtant l'humanité a longtemps vécu sans l'irrigation telle que nous la connaissons aujourd'hui et les techniques de « récolte » d'eau de pluie ont permis aux hommes de s'installer et de cultiver dans des régions peu pluvieuses. Ces techniques favorisent l'infiltration de l'eau de pluie ou de crue dans les sols en dérivant et

15. Voir par exemple ce guide du Plan Bleu qui développe une aide à la décision des acteurs : « Gestion de la demande en eau : choisir les mesures à mettre en œuvre sur son territoire. Guide d'aide à la décision à l'attention des collectivités locales », avril 2014. <https://planbleu.org/publications/gestion-de-la-demande-en-eau-choisir-les-mesures-a-mettre-en-oeuvre-sur-son-territoire-guide-daide-a-la-decision-a-lattention-des-collectivites-locales/>

concentrant les ruissellements vers les terres à cultiver. Elles pourraient être développées bien davantage comme nous le verrons au chapitre XIII. Il est par exemple possible d'obtenir de bons rendements en céréales grâce à un façonnage de surface, la création de billons par exemple, qui facilite le ruissellement de la pluie vers les sillons qui les séparent et où l'on sème. Si les hauteurs de pluie attendues ne représentent que la moitié de ce dont la culture a théoriquement besoin, la largeur des billons devra être ajustée pour que la moitié de la surface soit réellement plantée. D'autres pratiques culturales permettent à la fois d'améliorer l'infiltration ou de réduire l'évaporation de l'eau par le sol, comme les techniques de paillage ou de travail du sol de surface suivant l'adage « un binage vaut deux arrosages ».

Les transferts d'eau virtuelle ont aussi suscité de nombreux débats : ne faudrait-il pas, dans un souci d'efficacité, localiser la production agricole dans les régions où l'eau est plus abondante ? L'idée peut à première vue paraître séduisante étant donné les économies d'eau verte potentielles. La sécurité alimentaire mondiale y gagnerait. Mais cette idée, déjà pour partie mise en œuvre à travers les transferts d'eau virtuelle actuels, se heurte à plusieurs obstacles, le principal étant celui de la souveraineté alimentaire, la légitime volonté des pays de produire leur nourriture et de ne pas être trop dépendants des importations. L'histoire récente a montré l'ampleur des réactions protectionnistes en cas de crise alimentaire. La guerre en Ukraine souligne également que le commerce des céréales peut vite être mis en péril. La recherche de l'efficacité entraîne fréquemment une

perte de résilience. Qui plus est, dépendre de pays exportateurs génère une vassalisation nuisible à terme aux bonnes relations entre pays. Par ailleurs la délocalisation de la production mettrait des millions de petits agriculteurs en péril et il n'est pas sûr que la disponibilité de terres cultivables soit suffisante dans les pays plus productifs.

LUTTER CONTRE LE GASPILLAGE ALIMENTAIRE

Il est une autre eau « virtuelle » qui peut être utilisée pour augmenter l'efficacité de nos usages, c'est celle des pertes et des gaspillages de nourriture qui emportent avec eux toute l'eau et toutes les ressources en terre, énergie et travail humain utilisées pour la produire.

À l'échelle mondiale, nous produisons l'équivalent de 4600 kilocalories de produits végétaux par personne et par jour. Sur ce total, 1700 nourrissent des animaux qui en retour, nous fournissent 500 kilocalories¹⁶. Chaque kilocalorie animale a donc demandé 3,4 kilocalories végétales. Les humains disposent donc de 3400 kilocalories¹⁷. De cette énergie disponible, 600 kilocalories disparaissent dans des pertes post-récolte et 800 kilocalories chez les transformateurs et les consommateurs. Finalement, il reste environ 2000 kilocalories par personne et par jour.

16. Vaclav Smil, *Feeding the world: A Challenge for the 21st Century*, MIT Press, Cambridge, USA, 2000. Ces données datent des années 2000, mais les ordres de grandeur ont peu changé.

17. Soit $4600 - 1700 + 500$ kilocalories.

Les 1 400 kilocalories de pertes et gaspillages représentent 30 % de la production totale. Elles se répartissent différemment entre les produits et les régions du monde. Les pays en développement ont en tendance moins de gaspillages dans les dernières étapes de transformation et de consommation. Ils ont en revanche des pertes post-récolte importantes. Dans les pays industrialisés, les deux tiers des pertes se produisent chez les transformateurs et les consommateurs contre un tiers chez les producteurs. En Europe, les pertes et gaspillages sont estimés à 20 % de la nourriture produite, soit 173 kilos par personne et par an, ces valeurs variant de plus de 500 kilos à 70 kilos¹⁸. La France se situe dans la moitié « basse » du tableau avec 155 kilos par personne et par an.

Les fruits et légumes ainsi que les produits laitiers sont les plus gaspillés, à l'opposé de la viande et du poisson. Les pertes et gaspillages sont particulièrement élevés dans la restauration collective. Leur réduction est à notre portée comme le démontrent de nombreuses initiatives et start-ups qui font preuve d'ingéniosité pour vendre des produits mal calibrés, voire un peu abîmés, ou des produits approchant de leur date de péremption. Chaque pour cent de pertes « gagnées » implique quelques dizaines de litres d'eau économisés par personne et par jour avec un potentiel total de plusieurs centaines de litres !

18. Sophie Brocard, « 88 millions de tonnes de nourriture jetées chaque année en Europe », Toute l'Europe, 1^{er} septembre 2018. <https://www.touteleurope.eu/agriculture-et-peche/88-millions-de-tonnes-de-nourriture-jetees-chaque-annee-en-europe/>

Étant donné l'importance de l'enjeu, les pays européens se sont donné pour objectif de réduire ces pertes et gaspillages par deux d'ici 2030. Pour y contribuer, la France a adopté en 2016 une loi anti-gaspillage qui inclut différentes mesures comme l'interdiction aux grandes surfaces de rendre impropres à la consommation des produits ayant atteint leur date de péremption avant de les jeter.

Les pertes et gaspillages alimentaires ne se contentent pas d'avoir un impact sur l'eau, ils occasionnent aussi des émissions de gaz à effet de serre évaluées à 15,3 millions de tonnes de CO₂ par an en France¹⁹, soit le cinquième des émissions agricoles.

RÉUTILISER ET RECYCLER LES EAUX USÉES

L'amélioration de l'efficacité passe aussi par des mesures de recyclage et de réutilisation des eaux usées. Le monde industriel a, le premier, pris cette option, motivé à la fois par des réglementations induisant des coûts croissants de dépollution, par des tensions grandissantes sur les ressources et par des risques de réputation. Grâce à ce mouvement, les technologies de traitement se sont améliorées, les estimations de l'empreinte eau des produits manufacturés se sont affinées, les impacts de nombreuses industries sur les ressources en eau se sont fortement réduits dans les pays industrialisés et les pays faisant face à des risques de pénurie.

19. Emmanuelle Manck, « Pertes et gaspillages alimentaires : de quoi parle-t-on ? », Inrae, 16 octobre 2019. <https://www.inrae.fr/actualites/infographie-pertes-gaspillages-alimentaires>

Peu de données de synthèse sur les impacts volumiques de ce recyclage sur les ressources en eau sont disponibles. En revanche, on trouve de nombreuses données sur les performances de différentes solutions, ou sur le marché mondial annuel du recyclage d'eau estimé à 17 milliards de dollars en 2022²⁰. Ce chiffre frappe par sa modestie, le marché mondial du traitement et de l'assainissement de l'eau étant lui estimé à 300 milliards de dollars. Mais ce marché est relativement dynamique avec une croissance régulière estimée à 14 % par an qui devrait le voir doubler d'ici 2030.

Dans le monde industriel, le recyclage de l'eau de refroidissement des centrales thermiques présente également de forts enjeux. Ce recyclage permet de diviser les prélèvements par 30 environ et permet à ces centrales de fonctionner avec des débits d'étiage des cours d'eau plus faibles. En France, pour les centrales nucléaires, les deux systèmes se partagent la cinquantaine de réacteurs de manière égale²¹. En 2022, même certaines centrales équipées de refroidissement en circuit fermé ont toutefois dû bénéficier de dérogations pour continuer à fonctionner au plus fort de la sécheresse.

20. Custom Market Insights, rapport "Global Water Recycle and Reuse Market 2023-2032", novembre 2022. <https://www.custommarketinsights.com/report/water-recycle-and-reuse-market/>

21. Voir le rapport d'information n° 142 du Sénat à ce sujet : Délégation sénatoriale à la prospective, « Éviter la panne sèche - Huit questions sur l'avenir de l'eau », annexe 1 : « L'eau et les centrales nucléaires », 24 novembre 2022. <https://www.senat.fr/rap/r22-142/r22-14223.html>

La pression sur les ressources conduit aussi de plus en plus de pays et de municipalités à réutiliser des eaux usées traitées. Plusieurs pays et États dont l'Australie, la Californie, l'Espagne, Chypre ou Malte se sont donné l'objectif ambitieux de couvrir de 10 à 60 % de leurs besoins en eau par la réutilisation. Les techniques de purification par filtration membranaire permettent d'envisager, comme le fait Singapour, de réinjecter une partie de l'eau traitée dans le réseau d'eau potable. Mais avant cela, de nombreuses autres utilisations, en agriculture, dans les golfs, les parcs ou pour des activités de nettoyage peuvent être envisagées. La question du transport et de la distribution de cette eau réduit néanmoins les possibilités sauf à imaginer des systèmes de traitement décentralisés, à l'échelle d'un quartier par exemple, qui faciliteraient le développement d'une réutilisation locale.

La recherche d'efficacité et la réduction du rapport coût-efficacité resteront toujours les premiers leviers à actionner, même en l'absence de tension sur les ressources en eau. Les gains possibles sont loin d'avoir été épuisés et dans de nombreux cas, des efforts permanents de maintenance sont nécessaires pour simplement garder l'efficacité à un bon niveau. Mais attention, l'expérience montre que la polarisation sur l'efficacité nous maintient dans l'illusion d'un monde sans limite. Chaque progrès est une incitation à trouver d'autres objets de consommation qui souvent conduisent à puiser davantage dans les ressources.

XI. DÉVELOPPER LA SOBRIÉTÉ

La sobriété a surgi dans notre conscience collective comme une approche quelque peu punitive imposée par un contexte de crise. Son apparition témoigne d'une prise de conscience de nos gaspillages et des limites de la capacité de notre planète à fournir toujours plus de ressources. Elle est présentée d'abord comme une question de comportement individuel, perçue comme sacrificielle, et donc facilement connotée négativement. Elle est en fait une invitation à réfléchir à ce qui est essentiel à notre bien-être, à lutter contre l'idée que tout ce qui est à portée de notre pouvoir d'achat est bon pour nous. Mais la sobriété est plus que cela. Elle est systémique, car elle touche à l'ensemble des développements technologiques, à la mise en place des normes et aux politiques publiques.

SOBRIÉTÉ ET EFFICACITÉ : DEUX NOTIONS INSÉPARABLES

La priorité donnée à l'efficacité pendant des décennies a conduit à de multiples effets pervers tels que l'effet rebond. Lorsque l'efficacité s'améliore, les coûts se réduisent, ce qui ouvre de nouvelles fenêtres d'opportunités. La consommation se reporte alors vers de nouveaux produits, de nouveaux usages : les améliorations d'efficacité finissent par se diluer dans des changements de consommation dont

l'histoire récente fourmille d'exemples. Celui de l'automobile en est un. L'augmentation régulière d'efficacité des moteurs thermiques imposée par des normes de plus en plus drastiques a été « compensée » par l'augmentation progressive de la taille des véhicules. Les gains d'efficacité ont donc été compensés par la consommation accrue de ces véhicules plus lourds et moins aérodynamiques. Plus généralement, les « progrès technologiques » sont absorbés, sous couvert d'efficacité, par des augmentations de « profondeur technologique », de sophistication des biens de consommation qui nous échappent¹. Nos voitures contenaient en 2023 une centaine de puces électroniques et le développement de voitures de plus en plus intelligentes devrait multiplier ce nombre par deux d'ici 2027², ce qui va accroître la pression sur les ressources en terres rares et en eau. Ces rétroactions systémiques sont progressives, difficiles à bien percevoir et à éviter. Il nous faut néanmoins les intégrer de plus en plus dans la réflexion et dans l'action.

La notion de sobriété génère de nombreux débats, car elle comporte une part importante de subjectivité. Qui peut décider de ce qui est essentiel pour un être humain ? Prendre des douches et non des bains, réduire l'arrosage des pelouses ou le lavage des voitures, d'accord, mais dans quelles proportions ? Faut-il le faire en période de

1. Pierre Veltz, *L'Économie désirable, sortir du monde thermo-fossile*, Le Seuil, 2021.

2. Voir Ridha Loukil, « Le contenu en puces par voiture devrait doubler d'ici à 2027 », *L'Usine nouvelle*, 6 décembre 2022. <https://www.usinenouvelle.com/article/le-contenu-en-puces-par-voiture-devrait-doubler-d-ici-a-2027.N2073591>

sécheresse uniquement ? Ce changement de comportement ne risque-t-il pas de s'évanouir après la crise, imaginée en général comme une situation temporaire avant un retour « à la normale » ? Un tel retour est-il seulement possible alors que le dérèglement climatique n'en est qu'à ses premiers soubresauts ?

La sobriété est cousine et complémentaire de l'efficacité et il faut réfléchir à ces deux notions ensemble. Car l'effet rebond guette : chaque augmentation d'efficacité dans l'utilisation d'une ressource réduit son coût, ce qui tend à en augmenter la consommation ou à reporter nos usages sur de nouveaux besoins. Si les douches sont plus économes en eau que les bains, cela ne doit pas fournir de prétexte à en prendre davantage. Si l'on a réduit l'arrosage des plantes en en choisissant de moins gourmandes en eau, il faut réfléchir à deux fois avant d'en ajouter de nouvelles.

LA SOBRIÉTÉ D'USAGE³

Puisque la sobriété est affaire de prise de conscience personnelle, il est logique que pour l'eau, elle démarre avec l'usage d'eau potable. Comme nous l'avons vu, lorsqu'elle parvient à notre robinet, l'eau est passée par toute une chaîne de pompages, de traitements qui ont mobilisé bien d'autres ressources. Et lorsqu'elle quitte notre

3. Sur les grandes formes de sobriété, voir les descriptions éclairantes de Pierre Veltz dans *L'Économie désirable*, *op. cit.*

habitation pour rejoindre le réseau d'assainissement, les matières polluantes dont elle s'est chargée vont mobiliser d'autres ressources et polluer les milieux dits « récepteurs », même en présence d'une station d'épuration.

Dans cette logique, la sobriété nous invite à réfléchir aux quantités d'eau requises pour notre alimentation et à élargir la notion de gaspillage à la consommation de produits qui nuisent autant à notre santé qu'à celle de la planète. L'approche des pyramides alimentaires est ici intéressante. Introduites initialement par la Fondation Barilla⁴, elles figurent deux triangles représentés tête-bêche contenant des couches superposées de produits alimentaires. Le premier est posé sur sa base et s'intéresse à notre santé. Tout en bas, la première couche contient les produits qu'il faudrait manger à chaque repas tels que les fruits, légumes et légumineuses. Au-dessus, on trouve d'abord ceux qu'on peut manger chaque jour, comme les féculents ou les produits oléagineux, puis arrivent les laitages, les poissons et les viandes blanches. Dans les dernières couches se trouvent les sucreries, les alcools et enfin tout en haut la viande rouge. Plus on monte dans le triangle, plus les quantités et la fréquence doivent se réduire pour notre santé. Le second triangle représente la succession des impacts sur la planète, en ordre inversé. Les produits à faible impact dans

4. Voir « Barilla et sa recette pour manger 'responsable' », blog Génération EcoGreen, 27 novembre 2010. <https://generationecogreen.wordpress.com/2010/11/27/la-double-pyramide-de-barilla-pour-accompagner-tous-vos-eco-plats/> et pour une présentation incluant les empreintes eau, voir *L'Empreinte eau, op. cit.*

les couches du bas, ceux à fort impact tout en haut. Ce qui frappe dans cette représentation est que la succession des produits est quasi identique dans les deux triangles : les produits tout en bas, à faible impact environnemental, sont ceux à consommer sans modération. Ceux tout en haut, à consommer avec parcimonie, sont aussi ceux à fort impact environnemental. Santé et environnement, même combat ! C'est le sens de la politique « une seule santé » de l'Organisation mondiale de la santé⁵ qui part de ce constat simple : la santé de nos milieux, la santé des animaux et notre propre santé sont étroitement liées et doivent être pensées comme un tout.

La viande mérite notre attention puisqu'elle mobilise environ 60 % des céréales produites en Europe et dans le monde⁶. Cette mobilisation va de pair avec une production de viande intensive qui permet aux consommateurs d'avoir accès à de la viande bon marché. La production intensive de type industriel représente de l'ordre de 80 % de notre consommation⁷. Comme discuté au chapitre IV, la viande a une forte empreinte, non seulement sur l'eau

5. Voir équipe OMS, « Une seule santé », OMS, 21 septembre 2017. <https://www.who.int/fr/news-room/questions-and-answers/item/one-health>

6. Une analyse précise des produits utilisés pour l'alimentation animale est disponible dans la note d'information de Christian Couturier et Sylvain Doublet, « Les céréales et co-produits dans l'alimentation animale », Solagro, avril 2022. https://solagro.org/images/imagesck/files/publications/f120_2022_04_note_alimanimale_solagro.pdf

7. Voir Sarah Finger, « Porcs, bovins, volailles, la vraie vie de la viande française dans l'élevage intensif », *Libération*, 4 juin 2018. https://www.liberation.fr/france/2018/06/04/porcs-bovins-volailles-la-vraie-vie-de-la-viande-francaise-dans-l-elevage-intensif_1656528/

verte de l'agriculture pluviale et des prairies, mais aussi sur l'eau bleue de l'irrigation, notamment sur celle du maïs. Et même lorsque cette eau est de l'eau verte, les conséquences pour la planète sont importantes au regard des émissions de méthane et de l'impact des cultures sur l'intégrité de la biosphère. L'image d'Épinal de vaches paisibles dans de vertes prairies où les pratiques agricoles ancestrales ont forgé une biodiversité spécifique n'est malheureusement pas assez représentative de nos élevages.

Cette histoire illustre le dilemme efficacité-sobriété dans un système ouvert – un pays – et une planète aux contours finis. La compétition internationale conduit à une intensification de la production de viande ou de lait et maintient des prix attractifs. L'empreinte carbone d'une unité de produit est plus faible dans les systèmes intensifs que dans les systèmes extensifs. Cette efficacité a son revers de médaille puisqu'elle ne nous incite pas à la sobriété alors même que celle-ci serait largement à l'avantage de notre santé et de la planète. Le cas de la viande illustre également les risques de l'utilisation des empreintes eau ou carbone par unité de produit qui, en nous entraînant dans une logique d'efficacité compétitive, finissent par nous faire oublier que c'est l'empreinte totale qui compte.

LA SOBRIÉTÉ DE CONCEPTION

Mais la sobriété n'est pas qu'une affaire individuelle, ce qui ajoute à sa complexité. Elle doit aussi nous faire réfléchir à l'ensemble du système de production qui,

avec le temps, devient de plus en plus sophistiqué⁸ et demandeur de ressources diverses et de quantités d'eau et d'énergie croissantes. Sans même que nous nous en apercevions, la fabrication et les composants des biens proposés à notre consommation deviennent de plus en plus riches en technologies diverses et leurs empreintes carbone, énergétique et eau augmentent. Le cas du numérique est à cet égard éclairant. L'utilisation d'eau pour la fabrication des ordinateurs et pour le fonctionnement d'Internet explose avec l'augmentation de l'extraction de lithium, de la production de puces électroniques et des besoins de refroidissement des *data centers*⁹. Elle génère de fortes tensions dans de nombreux pays comme Taïwan qui concentre une grande partie de la production des puces, elle-même tirée à la hausse par les objets connectés ou l'électrification des véhicules¹⁰.

Les prélèvements et la consommation d'eau s'insèrent aussi dans des chaînes de valeur de plus en plus globalisées. Nos vêtements, notre alimentation, les composants de nos systèmes énergétiques sont produits et assemblés

8. Comme le souligne Philippe Bihoux dans *L'Âge des low tech. Vers une civilisation techniquement soutenable*, Le Seuil, 2014.

9. Julian Kamasa, "Microships : Small and Demanded", *CSS Analyses in Security Policy*, n° 295, Center for Security Studies (CSS), ETH Zürich, 2021. <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/519850/CSSAnalyse295-EN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

10. Voir *supra* les chiffres relatifs à la multiplication de la demande de puces dans le secteur automobile.

aux quatre coins de la planète, ce qui internationalise notre empreinte eau. Comme nous l'avons vu au chapitre V, l'Europe et la France sont emblématiques de cette multiplicité d'importations et d'exportations qui accroît et délocalise notre empreinte eau.

Réduire l'utilisation d'eau et de ressources dans les chaînes de valeur de nos biens de consommation est un défi au moins aussi grand que celui du changement de nos comportements individuels. C'est l'ensemble du modèle économique et notre vision du progrès qu'il faut repenser. Démarrer par l'ajustement de nos comportements de consommation doit donner le signal à l'ensemble du système en rappelant que progressivement ce sont les modes de conception et de production des biens de consommation qui doivent changer.

DES PISTES POUR LA SOBRIÉTÉ

Sans être exagérément optimistes, nous observons que, par-delà la prise de conscience, des transformations ont débuté. L'économie de fonctionnalité et l'économie circulaire visent par exemple à réduire le nombre de nouveaux biens produits. Elles invitent à diminuer l'importance du sentiment de propriété des objets pour valoriser leur usage. Ce faisant nous consommons différemment et d'une manière plus collective. Et cela change en profondeur la structure des chaînes de valeur. Lorsque les consommateurs ne sont plus propriétaires de leurs objets, les fabricants de ces objets ont intérêt à ce que ces derniers

aient une durée de vie plus longue et qu'ils soient facilement réparables. Ils n'ont pas non plus intérêt à en vendre le plus possible.

Une autre transformation en cours est celle de la focalisation sur la consommation de produits locaux. Consommer local, c'est prendre davantage conscience des ressources disponibles dans notre environnement proche et se sentir coresponsable de leur gestion respectueuse. C'est aussi contribuer à une simplification des chaînes de valeur qui permet d'en garder un certain contrôle. Si nous ne pouvons pas supprimer totalement l'extraction des ressources naturelles, il nous appartient de retrouver un bon équilibre avec ce que la planète peut nous fournir et cela commence sur notre lieu de vie.

Il faut accélérer ces transformations et, pour ce faire, ne pas hésiter à inverser les règles économiques comme l'illustre la tarification progressive de l'eau potable. L'idée est simple : au lieu de diminuer le prix pour les gros consommateurs comme les règles habituelles du commerce le voudraient, on l'augmente¹¹. Plusieurs villes ont déjà introduit plusieurs paliers dans la tarification.

11. Fatoumata Sillah, « Comment fonctionne la tarification progressive de l'eau, déjà expérimentée à Dunkerque, Montpellier et Libourne ? », *Le Monde*, 21 avril 2023. https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/04/05/comment-fonctionne-la-tarification-progressive-de-l-eau-deja-experimentee-a-dunkerque-montpellier-et-libourne_6168274_3244

De nombreuses variantes sont possibles, mais ces paliers sensibilisent à l'idée qu'à différents niveaux de consommation, correspondent différentes utilités de l'eau. Le tarif de l'eau *essentielle* s'applique aux premiers mètres cubes. Elle est peu chère, voire gratuite afin de la rendre accessible même aux plus démunis. Celui de l'eau *utile*, plus élevé, s'applique aux mètres cubes additionnels tout en ménageant les familles nombreuses. Celui enfin de l'eau *de confort*, plus élevé encore, inclut de fait une sorte de taxe aux consommations élevées, souvent associées aux arrosages de pelouses ou aux remplissages de piscines. La tarification par paliers incite à la sobriété, son introduction vise à réduire les usages les moins utiles et bénéficie économiquement à une large majorité de la population. De nombreuses variantes et ajustements sont possibles pour la rendre la plus efficace et la plus juste possible et ainsi améliorer la prise de conscience. Pour cela, il nous faut encore expérimenter, car l'approche décrite ci-dessus présente de sérieuses limites : un signal-prix pas forcément suffisant pour induire des changements de comportement et surtout la difficulté de la prise en compte du nombre de personnes rattachées à un compteur donné.

On le voit à travers cet exemple, les questions de tarification de l'eau sont plus complexes qu'il n'y paraît. À ce moulin, il faut rajouter le fait que la diminution de la consommation d'eau potable due à l'augmentation d'efficacité et de sobriété observée dans de nombreuses villes européennes dans les dernières décennies peut mettre en danger l'équilibre économique des services gestionnaires

de l'eau. Si les revenus diminuent trop – l'eau étant facturée au mètre cube utilisé –, les coûts fixes de ces services ne peuvent plus être couverts sauf à augmenter les tarifs, ce qui revient à pénaliser les comportements vertueux adoptés.

Notre sobriété individuelle et collective est une brique essentielle de la préservation de nos ressources en eau. Elle doit en permanence compléter notre tendance à imaginer que l'efficacité va résoudre les problèmes. Elle est une invitation à prendre de la hauteur, à sortir du système dans lequel le raisonnement sur l'efficacité nous maintient. Elle n'est pas tant affaire de privation ou d'abnégation que de recentrage sur des valeurs qui nous reconnectent à d'autres humains tout autant qu'à la planète et à ses richesses. Elle nous incite à sortir de cette position de domination et de contrôle de la nature qui a accompagné le développement économique au cours des derniers siècles¹².

12. Lire à ce sujet *Les Lumières à l'âge du vivant*, de Corinne Pelluchon, Le Seuil, 2021.

XII. ACCROÎTRE NOTRE RÉSILIENCE

Le troisième prisme, celui de la résilience, cherche à corriger un autre effet pervers de la priorité donnée à l'efficacité : la focalisation sur le court terme ou sur le plus immédiatement générateur de profit économique. La crise du Covid l'a illustré : en cherchant à optimiser les chaînes de valeur, en développant le « juste-à-temps », en diminuant les stocks, en produisant tout au moindre coût – et souvent en délocalisant la production –, nous sommes devenus vulnérables aux crises auxquelles nous sommes confrontés et qui sont véritablement transformatrices de nos sociétés, comme l'a montré Nassim Taleb¹ dans son livre *Le Cygne noir*. Il est essentiel de se préparer aux crises en créant des mécanismes tampons permettant d'amortir les chocs, en prenant davantage en compte le temps long, en identifiant les endroits que la recherche d'efficacité a rendus fragiles. L'eau étant particulièrement affectée par le dérèglement climatique, sa gestion doit intégrer la forte probabilité d'événements extrêmes et la nécessité de faire de l'eau un outil de la résilience de nos sociétés.

1. Nassim Nicholas Taleb, *Le Cygne noir. La puissance de l'imprévisible*, Les Belles Lettres, 2012.

REVOIR LA NOTION DE CRISE

S'il est un concept que la crise du Covid-19 a mis sur le devant de la scène, c'est celui de résilience. Ce surgissement a fait suite à plusieurs décennies de réflexion dans des disciplines comme la psychologie, la médecine, les sciences de l'ingénierie ou l'écologie². La résilience est essentiellement la capacité d'un système à absorber les perturbations produites par une crise sévère et à retrouver un fonctionnement « normal ». Dans l'imaginaire collectif, ce fonctionnement « normal » est celui d'avant la crise, pensée comme une déstabilisation passagère. Pourtant, de nombreux théoriciens de la résilience, réunis au sein de la Resilience Alliance³, ont choisi d'adopter une approche différente. Ils sont partis de l'observation suivante : de nombreux systèmes naturels soumis à des perturbations peuvent changer brusquement de mode de fonctionnement, parfois en raison d'un petit nombre de facteurs (voir Chapitre VII).

La leçon principale de ce travail est que les systèmes écologiques, humains, techniques sont des systèmes en équilibre instable, que leur mode de fonctionnement peut basculer soudainement, et qu'il est ensuite difficile de revenir au mode de fonctionnement initial. La théorie des limites planétaires, développée par le Stockholm Resilience Centre, étend cette approche à la planète entière.

2. Une analyse détaillée de l'évolution du concept est présentée dans Agnès Sinaï, Raphaël Stevens, Hugo Carton, Pablo Servigne, *Petit traité de résilience locale*, Éd. C. L. Mayer, 2015.

3. Voir le site de la Resilience Alliance : <https://www.resalliance.org/>

Le fonctionnement particulier de la planète au cours de l'holocène demeure en équilibre instable qui pourrait basculer brutalement et plonger la planète dans un régime climatique marqué comme auparavant par des fluctuations de grande ampleur. Il nous faut donc abandonner cette idée implicite qu'une crise n'est qu'une perturbation passagère : les cygnes noirs de Nassim Taleb⁴ ont des impacts durables et structurants pour nos sociétés. Ils peuvent et doivent nous aider à engager les transformations profondes dont nous avons besoin.

COMMENT ÊTRE RÉILIENT ?

Pour être résilient, un système a plusieurs solutions qu'illustre la fable de La Fontaine « Le chêne et le roseau ». Le chêne résiste à une tempête parce qu'il est solide et ancré dans le sol tandis que le roseau mise sur sa souplesse. La Fontaine donne raison au roseau puisque le chêne, « Celui de qui la tête au Ciel était voisine », finit déraciné par la tempête. Mais ce qui est vrai pour une tempête ne l'est peut-être pas pour une autre perturbation. Pour être résilients, les systèmes doivent faire preuve de qualités qui combinent, ou oscillent entre, ces deux pôles de robustesse et de souplesse tels que l'adaptabilité, la persistance, la capacité d'anticipation, de récupération ou de transformation. Pour y parvenir, ils doivent développer

4. *Op. cit.*

cinq propriétés que Johan Rockström⁵ identifie comme la diversité, la redondance, la connectivité, l'inclusivité teintée d'équité, ainsi que l'apprentissage adaptatif.

Le Covid-19 a été un *stress-test* grandeur nature de notre résilience. Il nous a permis de comprendre les faiblesses du modèle de fonctionnement de nos sociétés et de notre modèle économique. Nos chaînes d'approvisionnement manquent de diversité et de redondance. La connectivité est certes importante, mais elle est insuffisamment développée en réseau. L'inclusivité manque cruellement vis-à-vis des pays du sud qui n'ont pas bénéficié des mêmes traitements et vaccins que les pays industrialisés. Nos capacités d'adaptation, la robustesse des services de santé ont néanmoins permis au système de réagir et de trouver des solutions qui ne sont toutefois que palliatives. Il faut aussi espérer que nos capacités d'anticipation se sont améliorées.

Ce qui frappe dans ces différentes propriétés et qualités, c'est que plusieurs d'entre elles s'opposent clairement à celle qui nous pilote depuis un siècle, l'efficacité⁶. La réduction de la connectivité au profit de fournisseurs peu divers, la réduction des stocks dans les filières d'approvisionnement, le manque de redondance des modes de production sont des sous-produits de la priorité donnée à

5. Johan Rockström et al., "Shaping a resilient future in response to Covid-19", *Nature Sustainability*, vol. 6, mai 2023. <https://www.nature.com/articles/s41893-023-01105-9>

6. L'analyse des oppositions entre efficacité et résilience est analysée en détail par Jeremy Rifkin dans *L'Âge de la résilience*, Les liens qui libèrent, 2022.

l'efficacité qui impose de simplifier, d'éviter le moindre grain de sable pouvant occasionner des frottements et ralentir la production. Tant que tout fonctionne bien, l'efficacité paie. En revanche, lorsqu'un cygne noir (une guerre, une sécheresse, une épidémie...) survient, ses conséquences en cascade peuvent être catastrophiques. Il faut donc continûment rechercher des compromis entre efficacité et résilience.

LES RISQUES D'HIER NE SONT PAS CEUX DE DEMAIN

Raisonnement en ayant en tête de tels compromis est essentiel pour la gestion de l'eau qui est particulièrement sensible aux sautes d'humeur de la météo, à l'identification de nouveaux contaminants ou aux crises sanitaires. Pour accroître notre résilience, il faut dépasser notre tendance à privilégier le court terme pour bien intégrer les risques à venir. Risques qu'il faut savoir évaluer, anticiper en s'y préparant, atténuer en se protégeant et partager pour en répartir les conséquences de manière équitable.

Or, avec le dérèglement climatique et l'ensemble des changements planétaires, l'évaluation des risques devient un vrai casse-tête. Dans un système au fonctionnement régulier, les outils statistiques marchent, il est possible de calculer la probabilité que survienne un événement extrême, de prédire les périodes de hautes eaux ou de basses eaux, d'anticiper les besoins en eau des plantes. Cette connaissance a été essentielle pour dimensionner des infrastructures comme les digues, les ponts, les réservoirs

et les réseaux de drainage et d'irrigation ou pour développer des systèmes d'assurance. Les probabilités s'estimaient en observant la variabilité météorologique et hydrologique du passé. Mais avec le dérèglement, la référence au passé devient illusoire. C'est vers l'avenir qu'il faut se projeter et, pour cela, il faut considérer à la fois la variabilité intrinsèque des phénomènes et la grande incertitude des conditions futures. Ces dernières dépendent des capacités de l'humanité à agir pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre et la dégradation de la biosphère et ainsi éviter leurs conséquences sur la météorologie et l'hydrologie. L'amplitude des conséquences potentielles de ces scénarios est considérable et il est difficile de prévoir les effets en cascade et les rétroactions des phénomènes simulés de chacun d'eux, comme le montrent les quatre ou cinq grands scénarios publiés régulièrement par le GIEC. Bref, pour beaucoup d'acteurs devant prendre des décisions impliquant le long terme, hommes politiques, bâtisseurs, assureurs, le risque n'est plus tant affaire du passé que du futur et d'un futur difficilement quantifiable.

Dans un tel contexte, la résilience doit devenir, si ce n'est notre étoile polaire, du moins un objectif essentiel. Ne pouvant pas prédire l'avenir de manière statistiquement fiable, il faut nous assurer que les nouveaux investissements, les modes de production et la gestion des ressources ont bien été passés au crible de la résilience. L'eau est l'élément le plus affecté par le dérèglement climatique. La préserver et la gérer de manière attentionnée sont plus que jamais essentiels.

La carte des solutions nous permettant d'atteindre nos objectifs peut être organisée autour de deux axes. Le premier décrit la polarité entre robustesse et flexibilité, le second la manière d'appréhender des risques de plus en plus incertains.

ROBUSTESSE, STOCKAGE ET MÉCANISMES TAMPONS

Une première manière de se protéger contre les aléas du climat est de créer des lieux où l'eau peut se stocker afin d'en avoir à disposition en cas de sécheresse ou d'empêcher par des digues l'inondation de zones sensibles. Créer des barrages et des retenues d'eau est l'idée qui vient immédiatement à l'esprit. Les humains ont implanté plus de 800 000 ouvrages de stockage, dont plus de 50 000 grands barrages dans le monde⁷. Ces barrages et retenues nous fournissent des services essentiels qu'il ne faut pas oublier : production d'électricité, irrigation, attraction touristique, pêche, régulation des débits et prévention des inondations. Nombre d'entre eux sont multifonctionnels et sont gérés en tenant compte des besoins fort divers de leurs bénéficiaires. Cette multiplicité des services est une richesse, mais elle crée souvent des tensions, notamment entre acteurs de l'amont des bassins-versants

7. Alexandra Courtin-Nomade, « Comment concilier barrages et transport des sédiments ? », Encyclopédie de l'environnement, 20 juin 2018. <https://www.encyclopedie-environnement.org/eau/concilier-barrages-transport-sediments/>

qui, placés à plus haute altitude, « ont la gravité avec eux » et peuvent produire de l'énergie, et ceux de l'aval, souvent des plaines densément peuplées, où irriguer des cultures pour contribuer à la sécurité alimentaire est essentiel. Les rivalités entre la Turquie, la Syrie et l'Irak ou celles entre l'Éthiopie, le Soudan et l'Égypte requièrent de ces pays des efforts diplomatiques et des trésors d'ingéniosité pour faire de l'eau un outil de coopération plutôt que de conflit. La diversité des services fournis par les barrages peut être un atout pour peu que ces pays parviennent à négocier sur la base d'un partage de valeur plutôt que d'un strict partage d'eau.

Le stockage de l'eau de surface présente des inconvénients générateurs de tensions entre ses bénéficiaires potentiels et ceux qui sont affectés par ces inconvénients. Ceux-ci sont notamment la perturbation du cycle de l'eau due à l'évaporation ou à la rupture du régime hydrologique, la rétention des sédiments par les barrages⁸ et de multiples conséquences sur les écosystèmes et sur les populations et acteurs économiques devant être déplacés ou n'ayant plus accès à l'eau dans les mêmes conditions. Dans de nombreux pays, cela explique que la création

8. Selon les Nations unies, le quart des capacités de stockage des grands barrages aura été perdue pour cause de sédimentation en 2050. UN University Institute for Water, Environment and Health, "Trapped Sediment Robbing World's Large Dams of Vital Water Storage Capacity; ~26% Loss by 2050 Foreseen", communiqué de presse, 11 janvier 2023. <https://inweh.unu.edu/trapped-sediment-robbing-worlds-large-dams-of-vital-water-storage-capacity-26-loss-by-2050-foreseen/>

de stockage additionnel d'eau de surface soit de plus en plus difficile en l'absence de concertation et d'implication de l'ensemble des parties prenantes, incluant la nature. Cette dernière est représentée par des associations d'humains dont le rôle est essentiel. L'eau, qui est un bien commun, doit bénéficier à tous au travers des services environnementaux qu'elle procure et qui contribuent à notre résilience.

Stocker de l'eau peut aussi se faire dans le sous-sol, comme nous le rappellent les nappes souterraines. Or, ce stockage est menacé de plusieurs façons. La période de recharge des nappes, nous l'avons vu, se réduit avec le changement climatique. Le stockage est aussi mis à mal par l'imperméabilisation des sols agricoles résultant de la diminution progressive de leur contenu en matière organique et par l'élimination des obstacles à l'écoulement et des zones de rétention d'eau dans nos paysages. Il faut plus que jamais favoriser l'infiltration de l'eau partout où cela est possible et tolérable, en recréant des haies ou des petits réservoirs, en réduisant la vitesse d'évacuation de l'eau, en réaménageant des zones perméables dans les villes. De nombreuses solutions existent et doivent être mises en œuvre de manière dispersée et concertée, dans les paysages, car l'infiltration est un processus lent qui doit être aussi diffus que possible.

Favoriser l'infiltration et réalimenter les sols et les nappes souterraines en eau verte permet de réguler le cycle de l'eau, crée des disponibilités pour l'eau potable ou

l'irrigation, et permet aussi de stimuler les écosystèmes naturels grâce à l'eau verte mobilisée, comme nous le verrons au chapitre suivant.

Le fait d'infiltrer et stocker de l'eau dans les sols doit également être favorisé pour améliorer la résistance des plantes à la sécheresse. Pour cela aussi des solutions simples existent. D'abord éviter de laisser les sols nus grâce à des couverts intermédiaires (des plantes ou des mélanges de plantes mis en place entre deux cultures successives) qui présentent de multiples avantages : ils absorbent du carbone de l'air et des nitrates du sol ou de l'air, ils évitent le ruissellement et l'érosion, ils fertilisent lors de leur destruction et enfouissement dans le sol. Ils sont un des outils essentiels pour augmenter la teneur en matière organique qui chute dans les sols cultivés intensivement. Or plus les sols contiennent de matière organique, plus ils peuvent stocker de l'eau et de la fertilité. Cette matière organique peut d'ailleurs être ajoutée au sol sous forme de compost ou de biochar, un charbon de bois particulier produit par pyrolyse en conditions de température et d'oxygénation contrôlées, processus qui génère également de l'énergie. Le biochar possède une grande stabilité et retient à la fois l'eau et la fertilité. C'est le type de charbon de bois identifié dans les *terra preta*⁹ d'Amazonie et qui confère à ces sols une fertilité exceptionnelle qui semble s'autoentretenir

9. Article « Terra preta », Wikipédia, l'encyclopédie libre, 18 août 2023. https://fr.wikipedia.org/wiki/Terra_preta

pendant des siècles. Son utilisation se développe aujourd'hui rapidement un peu partout dans le monde.

Les mécanismes « tampon » peuvent être conçus aussi bien pour infiltrer l'eau que pour lutter contre les inondations. C'est le cas par exemple des réservoirs situés dans la partie amont de la Seine mis en place depuis la fin des années 1960 pour écrêter les crues exceptionnelles et prévenir le retour de la fameuse crue de 1910¹⁰. Plus généralement, on cherche aujourd'hui à redonner aux fleuves et rivières des possibilités de sortir de leur lit lors des crues en inondant d'anciens méandres et zones humides de leur lit majeur que la domestication des cours d'eau avait condamnés et souvent transformés en terres agricoles. On essaie également de ralentir les écoulements en recréant des méandres éliminés pour faciliter l'installation d'infrastructures. Le ralentissement ainsi opéré facilite aussi l'infiltration de l'eau.

FLEXIBILITÉ, ADAPTABILITÉ, DIVERSIFICATION

La robustesse doit être complétée par de l'agilité, pas tant pour se protéger que pour s'adapter à des changements rapides. Les activités fortement dépendantes de la météo, agriculture, tourisme, eau potable, énergie sont les premières concernées, car elles doivent pouvoir réagir ou anticiper une variabilité des conditions.

10. Article « EPTB Seine Grands Lacs », Wikipédia, l'encyclopédie libre. 7 nov. 2023. https://fr.wikipedia.org/wiki/EPTB_Seine_Grands_Lacs

Un premier type d'adaptation passe par la diversification des ressources ou des modes de production, tout particulièrement en agriculture. Certaines méthodes traditionnelles des agriculteurs donnent l'exemple comme celles consistant à planter différentes cultures ou différentes variétés d'une culture au sein d'une même parcelle. En mélangeant des variétés à fort potentiel, mais dépendantes de bonnes conditions, avec des variétés rustiques garantissant un rendement minimum même en cas de sécheresse, les agriculteurs sont certains de ne pas perdre entièrement leur récolte. La diversification peut être étendue à des mélanges de cultures au sein de mêmes parcelles ou au sein d'une même ferme avec un objectif similaire. Une telle approche a été abandonnée avec la révolution verte et l'introduction de variétés performantes qui assurent de meilleurs rendements à condition d'être constamment alimentées en engrais et en eau. Avec ces variétés, on gagne en efficacité, mais aussi en vulnérabilité à la sécheresse, aux maladies.

Le souci d'une meilleure résilience conduit aujourd'hui à réinvestir cette question essentielle de la diversité dans les champs et les paysages¹¹. Ainsi en France en 2022, l'idée

11. On consultera à ce propos la synthèse du rapport d'expertise scientifique collective de l'Inrae, sous la direction d'Anaïs Tibi, « Protéger les cultures en augmentant la diversité végétale des espaces agricoles », Inrae, 2022. https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/RegulNat-synthese_14-11-22_VF_2.pdf. Les données présentées viennent toutes de ce rapport.

de mélanger plusieurs variétés de blé dans une même parcelle a germé chez un sixième des céréaliers. D'autres associations de céréales ou de colza et de légumineuses gagnent également du terrain. On appelle « plantes compagnes » les plantes qui renforcent une culture principale, soit en lui apportant des nutriments, soit en créant de la biodiversité propice à un meilleur contrôle des maladies¹². Les arbres fruitiers ou la vigne, qui font partie des cultures les plus traitées, vivent de plus en plus dans des vergers enherbés ou fleuris. L'agroforesterie se développe et occupait plus de 100 000 hectares en France en 2023.

Cette attention croissante à la biodiversité gagne tous les échelons, des sols aux parcelles, des fermes aux paysages. Seule la biodiversité permettra de réactiver les services écosystémiques essentiels de stockage de carbone et d'azote, de protection contre la propagation des maladies, de rétention des nutriments, de maintien de la qualité et de la disponibilité en eau, et de bien d'autres encore. Car sans elle, il ne sera pas possible de sortir du mode de production dominant actuel et en particulier de se passer des pesticides de synthèse. Il est possible que nous soyons amenés à être un peu moins efficaces en devenant plus résilients et moins vulnérables aux conditions sans

12. Voir les plantes compagnes listées sur le site de Cérience <https://www.cerience.fr/fr/semences/couverts-vegetaux-grandes-cultures/plantes-compagnes>

doute plus extrêmes qui nous attendent¹³. Notons que les possibles pertes d'efficacité ne viendraient pas tant des pertes de rendement, des gains étant en général observés, que de la nécessaire transformation de surfaces agricoles en surfaces dédiées à des plantes protectrices (fleurs, arbres, haies...)

La diversification des cultures doit aussi s'approprier la question de la disponibilité de l'eau en été et donc celle de l'irrigation intensive, particulièrement celle des céréales destinées à la production d'aliments pour l'élevage. Cette question est indissociable de celle de notre sobriété en viande, essentielle pour améliorer notre santé. Étant donné les interdépendances du système agricole mondial, il faut éviter que la transformation des systèmes de production conduise à une augmentation des importations de viande de faible qualité. Cela ne sera possible que si nous changeons l'ensemble de notre logiciel agroalimentaire, des producteurs aux consommateurs. On voit ici que les questions d'efficacité permettant de maintenir des prix bas, de sobriété nécessaire pour notre bien-être et de résilience sont intrinsèquement liées et doivent absolument être faire l'objet de raisonnements systémiques, tant elles sont interconnectées.

13. Il est déjà bien démontré qu'avec un sol vivant et riche en matière organique, les rendements des cultures restent élevés et moins dépendants des conditions météorologiques.

Il est enfin nécessaire de diversifier les sources d'eau, particulièrement dans les régions menacées par la sécheresse. Nous avons évoqué plus haut la réutilisation des eaux usées épurées qui contribue à cette diversification tout en améliorant l'efficacité des usages. Le plan « eau » de la France¹⁴ adopté en 2023 vise à multiplier par dix cette réutilisation d'ici 2030 en clarifiant les réglementations et en facilitant des expérimentations de longue durée, tout en veillant aux conséquences possibles sur la santé humaine et celle des écosystèmes. Les zones côtières seront privilégiées, car dans l'intérieur du territoire, les eaux usées contribuent au soutien d'étiage des cours d'eau, essentiel pour la santé des écosystèmes et pour la production d'énergie.

Une autre source d'eau non conventionnelle est celle obtenue par dessalement d'eau de mer. Les techniques de filtration par des membranes microporeuses ont grandement facilité le développement de cette technique énergivore qui rejette des saumures en grandes quantités, chaque mètre cube d'eau de mer contenant environ 40 kilogrammes de sel par litre. 22 800 unités de dessalement ont été installées en 2022 qui produisent 110 millions de m³ d'eau douce par jour pour 300 millions de personnes. Le coût du dessalement, deux à trois fois

14. Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, communiqué de presse « Plan Eau : le Gouvernement accélère la réutilisation des eaux usées traitées (REUT) », 30 août 2023. <https://www.ecologie.gouv.fr/plan-eau-gouvernement-accelere-reutilisation-des-eaux-usees-traitees-reut>

plus élevé que celui de l'eau potable conventionnelle, rend cette technique prohibitive pour un usage agricole. Elle est aussi réservée aux zones côtières, vu le coût de transport élevé de l'eau. Le dessalement est attractif pour les pays disposant d'énergie bon marché comme les pays du Moyen-Orient. Il fournit ainsi 70 % de l'eau potable de l'Arabie saoudite, 90 % de celle du Koweït et 42 % de celle des Émirats arabes unis¹⁵.

Même si réutiliser les eaux usées et faire appel au dessalement de l'eau de mer accroissent la résilience, ces solutions ne doivent être mises en œuvre qu'après avoir examiné les autres options d'amélioration de l'efficacité de la gestion des ressources conventionnelles et d'accroissement de la sobriété¹⁶.

GESTION, ANTICIPATION ET RÉDUCTION DES RISQUES

La recherche de résilience nécessite de raisonner sur le moyen et le long terme, de penser les évolutions lentes et les signaux faibles d'évolution du contexte. Et dans un monde hyperconnecté, ils vont générer des effets en cascade eux-mêmes difficilement prévisibles. Notre dépendance

15. Martine Valo, « Le dessalement de l'eau de mer en plein essor malgré son coût environnemental », *Le Monde*, 13 juin 2023. https://www.lemonde.fr/en/environnement/article/2023/06/16/seawater-desalination-booms-despite-environmental-cost_6032699_114.html

16. Charlène Descollonges, *L'Eau - Fake or not ?*, Tana Éditions, 2023.

à des pays lointains pour des matières premières, des produits de haute technologie ou des médicaments nous rend vulnérables.

Outre les modes d'action déjà présentés plus haut, la gestion et la réduction de ces risques pour partie inconnus nécessitent de revoir nos modèles économiques. Il faut diversifier nos chaînes d'approvisionnement et renforcer autant que possible celles de proximité. Non pas que la proximité soit moins sujette à ces risques, mais les chaînes d'approvisionnement courtes sont moins complexes, les produits souvent moins transformés et notre capacité à les réparer est meilleure. On note ici une convergence entre la résilience et la sobriété de conception.

Il reste que nous n'avons pas été habitués à intégrer le moyen et le long terme dans nos décisions. Notre préférence pour le présent est un sous-produit de décennies de croissance économique dopée par un aveuglement aux externalités négatives induites sur notre bien le plus précieux, notre planète. Cette préférence peut sembler théorique, elle se traduit pourtant de manière concrète par des décisions et des choix d'investissements guidés par une approche économique donnant une importance faible au futur et utilisant des taux d'actualisation élevés¹⁷.

17. Voir à ce sujet les débats entre économistes autour du taux d'actualisation de 1,4 % utilisé dans le rapport Stern sur l'adaptation au changement climatique. Un tel taux, bien inférieur aux 4 % plus classiques, maintient la valeur d'un investissement pendant beaucoup plus longtemps et redonne de l'importance aux générations futures. Sarah Andrieux, Clémentine Van Effenterre, « Polémiques autour du rapport Stern », *Regards croisés sur l'économie*, vol. 6, n° 2, 2009. <https://www.cairn.info/revue-regards-croises-sur-l-economie-2009-2-page-72.htm>

Plus généralement, pour évaluer notre vulnérabilité et notre capacité à réagir à des risques inconnus, il nous faut expérimenter et tester des solutions, et simuler des situations de crise pour apprendre à y répondre. À la suite de la crise financière de 2008, les banques ont été renforcées puis soumises à des *stress-tests* afin de s'assurer que leurs capitaux propres leur permettraient de réagir à des crises diverses, y compris d'origine climatique¹⁸. Au regard des enjeux vitaux liés à l'eau, nous avons besoin de concevoir et de développer de tels *stress-tests* pour évaluer notre vulnérabilité aux différentes crises de l'eau¹⁹ et pour imaginer collectivement les réponses possibles.

COOPÉRATION, PARTAGE DE L'EAU ET DES RISQUES

L'eau est un de nos biens communs essentiels et, à ce titre, les citoyens et les communautés locales doivent se la réapproprier. À tous les échelons, du village au grand bassin international, les tensions sur l'eau ont la plupart du

18. Voir à ce sujet la page « Tests de résistance » sur le site de la BCE. <https://www.bankingsupervision.europa.eu/banking/tasks/stresstests/html/index.fr.html>

19. Les prémices d'une telle approche ont été mises en œuvre dans les années 1990, pour simuler les impacts en cascade qu'aurait une crue identique à celle de la Seine en 1910. Sans aller jusqu'à un véritable *stress-test*, la simulation des conséquences en cascade a souligné de nombreux points de vulnérabilité du système électrique, de transport, de télécommunication ou de stockage d'importantes archives. De nombreuses actions correctives avaient alors été prises. Voir une synthèse de ce travail dans l'introduction au rapport *Les Eaux continentales*, *op. cit.* https://www.academie-sciences.fr/archivage_site/activite/rapport/rst25_intro.pdf

temps suscité la coopération grâce à son caractère vital et non substituable. Il est de ce fait rare que des conflits d'envergure soient uniquement dus à l'eau²⁰. Même lorsque l'eau est l'un des ingrédients d'un conflit, elle joue souvent un rôle moindre que l'accaparement des terres ou des sources d'énergie et elle facilite la recherche de solutions.

En toute logique, les mécanismes de partage de l'eau sont donc une des clés de la résilience. Les utilisateurs de l'eau sont nombreux et divers et, comme nous l'avons vu précédemment, les usages diffèrent par leurs conséquences sur la consommation ou par les types d'eau mobilisés. Il faut donc s'assurer d'une représentation équitable des utilisateurs dans les institutions et trouver le moyen pour que la nature et ses écosystèmes y soient représentés du fait de leur rôle clé pour notre résilience. Des approches locales et multi-acteurs sont essentielles pour que les règles de ce partage de l'eau soient définies de la meilleure manière possible avant les crises et en tenant compte du moyen et du long terme. Des outils participatifs simulant des situations de crise et permettant de mettre les différents acteurs « en situation » devraient être utilisés pour cela. L'eau peut alors s'avérer un formidable outil de démocratie locale.

20. Voir les travaux de Aaron Wolf à ce sujet : Aaron T. Wolf *et al.*, "Water can be a pathway to peace, not war", *Navigating Peace*, n° 1, Woodrow Wilson International Center for Scholars, juillet 2006. <https://www.files.ethz.ch/isn/133520/NavigatingPeaceIssue1.pdf>

Partager l'eau implique aussi de partager les risques liés à l'eau, ce qui passe classiquement par des mécanismes d'assurance²¹. Ces derniers ne fonctionnent bien que si de nombreux acteurs contribuent afin de répartir les charges de remboursement. Il faut également que la puissance publique puisse intervenir pour les catastrophes d'ampleur exceptionnelle. Même si l'assurance est mise en danger par la méconnaissance et l'augmentation des risques futurs, elle reste un outil essentiel de la résilience.

La résilience devient progressivement un concept clé et un guide pour nous préparer aux défis à venir. Elle impose de remettre en cause notre organisation et celle de nos chaînes de valeur dictées par l'efficacité et la compétition, de redécouvrir l'importance de la coopération, cette « autre loi de la jungle²² », ainsi que la prise en compte du long terme dans notre manière de fonctionner en société. L'eau étant notre bien commun le plus menacé, elle peut nous aider à développer des outils en ce sens.

21. Comme la nouvelle assurance récolte mise en place en France pour lutter contre les effets du changement climatique. Ministère de l'Économie des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique, « Assurance récolte : un nouveau dispositif pour protéger les agriculteurs face aux aléas climatiques », 3 octobre 2022. <https://www.economie.gouv.fr/assurance-recolte-nouveau-dispositif-agriculteurs-aleas-climatiques>

22. Pablo Servigne, Gauthier Chapelle, *L'Entraide. L'autre loi de la jungle*, Les liens qui libèrent, 2017.

XIII. METTRE EN ŒUVRE DES APPROCHES RÉGÉNÉRATIVES

Le quatrième prisme, celui de la régénération, est un concept en émergence. Lorsque nous pensons résilience ou développement durable, nous pensons à préserver ou restaurer la situation idéalisée « d'avant la crise ». Les approches régénératives nous invitent à être créatifs en nous inspirant de la nature qui bénéficie d'un long processus d'évolution. Ses multiples expérimentations, avancées et crises ont conduit à une mobilisation et à une création de richesse extraordinaire. La planète a d'une certaine façon sa propre agriculture qui produit patiemment de la biomasse végétale et animale.

FAIRE PROSPÉRER LE VIVANT

Les barrières de corail, qui naissent souvent dans des milieux pauvres en substances nutritives, illustrent parfaitement cette capacité. Grâce à la symbiose entre des animaux, des cnidaires ayant la faculté de se construire un squelette calcaire, et des algues, les zooxanthelles, qui se développent grâce à la photosynthèse, des écosystèmes riches se développent et génèrent une biodiversité plus importante même que celle de la forêt équatoriale.

Selon certains auteurs, 30 à 40 % des espèces marines auraient besoin des coraux à un moment de leur vie¹.

L'économie symbiotique, comme l'a dénommée Isabelle Delannoy², combine cette puissance de la nature avec l'intelligence humaine pour régénérer des milieux dégradés, appauvris souvent par les pratiques humaines. Son objectif est d'aller au-delà de la conservation, d'enrichir et de recréer les conditions de systèmes prospères. La permaculture illustre de telles approches en recréant des mécanismes symbiotiques dans des écosystèmes de plantes cultivées. Au lieu de produire une seule espèce, l'idée est d'associer des plantes de différentes tailles qui optimisent la captation de l'énergie solaire, augmentent la biodiversité pour éviter la prolifération d'espèces ayant potentiellement un rôle destructeur et créent des chaînes trophiques circulaires qui assurent le recyclage des substances nutritives comme l'azote et le phosphore. Sur une superficie réduite, la permaculture parvient à produire une nourriture diverse et variée. Elle n'est pas une solution adaptable à toutes les cultures et à tous les contextes, mais elle illustre bien la manière dont la complémentarité et les symbioses entre espèces peuvent générer une biodiversité et une productivité importantes.

1. InEE-CNRS, « Les coraux font de la photosynthèse ! (grâce à la symbiose...) », 8 août 2018. <https://www.inee.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/les-coraux-font-de-la-photosynthese-grace-la-symbiose>

2. Isabelle Delannoy, *L'Économie symbiotique. Régénérer la planète, l'économie, la société*, Actes Sud, 2017.

Dans les deux exemples ci-dessus, les ingrédients du succès sont une gestion efficace de l'énergie solaire combinée à une multiplication des interactions – notamment symbiotiques – entre espèces et à un recyclage des éléments nutritifs. Reproduire de tels mécanismes demande une approche holistique du système et une observation fine de la manière dont la nature fonctionne. C'est ce qu'a montré Allan Savory dans son travail sur la désertification³. L'histoire de ce dernier démarre en Zambie, alors appelée Rhodésie du Nord, dans les années 1950, alors qu'il travaillait à la protection de la faune sauvage. La désertification était déjà un problème et la responsabilité en était imputée à l'augmentation du nombre de grands herbivores et notamment des éléphants. Un programme de réduction drastique des troupeaux d'éléphants fut alors mis en place, ce qui à la surprise générale, n'eut aucun effet notable sur la désertification. Allan Savory se référa alors aux travaux d'un agronome français, André Voisin, pour démontrer que le problème n'était pas lié à une surdensité de ces grands herbivores, mais à une mauvaise organisation de leurs déplacements. Pour que des prairies fonctionnent bien, il faut que les herbivores se déplacent rapidement et évitent de brouter deux fois de suite au même endroit. Dans l'idéal, les animaux doivent changer de prairie tous les jours afin de maximiser leur capacité de régénérer la prairie et les sols grâce à leurs déjections et de minimiser la dégradation des plantes.

3. Allan Savory, Jody Butterfield, *Holistic management. A commonsense revolution to restore our environment*, Washington, Island Press, 2016.

Ces principes étant acquis, Allan Savory mit en place avec succès des programmes de régénération des zones en désertification en utilisant également le bétail des éleveurs locaux. Il compléta son travail en développant une approche holistique et régénérative de la gestion des sols et des ressources naturelles. Des zones entières se mirent à reverdir et à prospérer. Son institut⁴ basé aujourd'hui aux États-Unis travaille dans 40 pays avec des éleveurs et continue d'affiner ses approches.

Le courant régénératif s'inspire du fonctionnement du vivant à toutes les échelles et se développe dans de nombreuses directions, y compris dans les sciences humaines et sociales⁵. Le domaine de l'eau n'est pas en reste puisqu'une association « Pour une Hydrologie régénérative » a récemment vu le jour⁶ en France.

L'EAU VERTE AU CŒUR DE L'ACTION

Les approches régénératives s'appliquent aux sols, aux cultures, à la gestion des prairies, aux forêts, aux territoires dégradés ou en voie de désertification. L'amélioration de la gestion de l'eau, tout particulièrement de l'eau verte,

4. Voir Savory Institute, <https://savory.global>

5. Les travaux de l'organisation Regenesys, et notamment le livre de Pamela Mang et Ben Haggard, *Regenerative Development & Design: A Framework for Evolving Sustainability* (Hoboken, Wiley, 2016) - <https://regenesysgroup.com/book> - expliquent les fondamentaux de l'approche tout comme, en France, ceux d'Isabelle Delannoy sur l'économie symbiotique.

6. L'association Pour une Hydrologie régénérative a été créée en 2022. <https://hydrologie-regenerative.fr>

en est un des ingrédients essentiels comme le montre l'expérience indienne.

Dans les états arides du nord-est de l'Inde, de nombreux écosystèmes dégradés par la déforestation et l'érosion des sols ont été régénérés dans les dernières décennies par les communautés locales soutenues par des organisations comme Gram Vikas ou Tarun Bharat Sangh⁷. La méthode démarre par la création ou la remise en fonction de multiples petites structures hydrauliques permettant de stocker et d'infiltrer l'eau de pluie. Ces structures sont complétées par la création de haies ou de forêts, par la mise en place d'une agriculture recréant de la biodiversité à tous les échelons, du sol aux paysages. L'expérience a été un succès. Avec cette méthode, en quelques années, une cascade de changements profonds se produit. L'eau bleue disponible sert à irriguer des petites parcelles de cultures vivrières. L'infiltration accrue d'eau permet à la végétation de se développer et à la pluie de ne plus ruisseler, ce qui réduit l'érosion des sols et maintient leur fertilité. Au bout de quelques années, les nappes profondes se rechargent, des rivières à sec depuis longtemps se remettent à couler : le cycle de l'eau local s'est régénéré et régularisé et il génère une rétroaction vertueuse avec la production agricole et la végétation dont la croissance augmente les stocks de carbone souterrains et en retour les capacités de stockage d'eau verte.

7. Ces deux organisations ont été créées par des leaders charismatiques, respectivement Joe Madiath et Rajendra Singh; ce dernier, surnommé le « waterman of India », est le lauréat du Prix de l'eau de Stockholm en 2015.

À plus grande échelle, la régénération peut renforcer le recyclage continental. Les mécanismes de l'activation du cycle de l'eau régional sont de mieux en mieux compris grâce à l'étude du fonctionnement des biomes forestiers⁸. Les forêts d'Amazonie, du Congo ou d'Asie du Sud-Est⁹ créent leurs propres conditions favorables. Les arbres émettent différentes substances comme des composés organiques volatils ou de petits cristaux de sel qui provoquent la condensation de l'eau et les précipitations. L'eau évaporée peut ainsi être en partie recyclée sur place¹⁰. Mais ce n'est pas tout : la condensation de l'eau, à l'inverse de l'évaporation, produit de l'énergie et réchauffe l'atmosphère, ce qui génère un appel d'air et l'arrivée de vapeur d'eau en provenance des régions adjacentes ou de l'océan. Les écosystèmes et les forêts en particulier sont à même de créer des conditions favorables à leur bon fonctionnement. A contrario, leur destruction supprime ces mécanismes : la déforestation et la dégradation des écosystèmes sont responsables de 18 % du réchauffement moyen de la

8. Une excellente synthèse est disponible dans l'article de David Ellison et al., "Trees, forests and water : *Cool insights for a hot world*", *Global Environmental Change*, vol. 43, mars 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>

9. Voir Ilima Loomis, "Trees in the Amazon make their own rain", *Science*, 4 août 2017 (<https://www.science.org/content/article/trees-amazon-make-their-own-rain>) sur l'Amazonie ou le Ted talk de Willie Smits "How to restore a rainforest" sur la régénération d'une forêt en Indonésie, 22 février 2013 (<https://www.youtube.com/watch?v=dXWikNXiG2Q&t=1218s>).

10. Voir la présentation du recyclage continental au chapitre II et celle de la méthode Wave au chapitre VI.

planète¹¹ et d'une diminution des précipitations de 30 % dans les régions affectées¹².

Des chercheurs et des aménageurs envisagent d'appliquer ces connaissances. Dans la vallée de Los Angeles, ils projettent de planter des peupliers et de les irriguer avec les eaux usées de la ville. Ils comptent sur la combinaison de l'émission de composés volatils par les arbres avec les phénomènes advectifs d'entraînement de la vapeur d'eau vers les montagnes environnantes pour favoriser la condensation et la re-précipitation locale de l'eau évaporée¹³. Ils espèrent accroître le recyclage local d'eau verte d'un taux moyen de 10-12 % à une valeur de 40 %.

En France, une initiative d'inspiration semblable d'autoroute de la pluie a été lancée dans le Sud de la France. L'idée est d'expérimenter la mise en place d'un corridor arboré entre Toulouse et Montpellier et d'y stimuler ainsi le recyclage de l'évaporation et de l'eau verte¹⁴.

11. Ramdane Alkama, Alessandro Cescatti, "Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover", *Science*, vol. 351, 5 février 2016. <http://dx.doi.org/10.1126/science.aac8083>

12. Deborah Lawrence, Karen Vandecar, "Effects of tropical deforestation on climate and agriculture", *Nature Climate Change*, vol. 5, janvier 2015. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2430>

13. Yves Sciamma, « Un projet mise sur les arbres pour faire revenir la pluie », *Science et Vie*, n° 1208, 25 avril 2018. <https://www.science-et-vie.com/article-magazine/un-projet-mise-sur-les-arbres-pour-faire-revenir-la-pluie>

14. Site du projet Autoroute de la pluie : <https://www.autoroutedelapluie.org>

RÉCOLTER, INFILTRER ET VALORISER L'EAU DE PLUIE

Activer le recyclage continental de l'eau verte, c'est bien, mais encore faut-il que l'eau de pluie ainsi générée puisse être valorisée. Pour cela, les pratiques traditionnelles de récolte de l'eau de pluie dans les régions sèches montrent la voie. Leur principe est de capter le ruissellement et de le canaliser vers des zones de stockage ou d'infiltration ou de s'assurer que des infrastructures naturelles ou construites stoppent son ruissellement. De telles techniques sont encore en place dans les oliveraies du Maghreb. Plus généralement, en zone urbaine, l'eau des toits ou des sols peut être amenée vers des réservoirs où elle pourra être réutilisée. En zone rurale, des petites infrastructures de stockage, des haies, des zones humides peuvent être construites ou protégées de manière diffuse dans les bassins-versants. Le stockage peut aussi être dynamique et utiliser les réseaux de fossés dans lesquels les ouvrages de franchissement sont volontairement conçus pour ralentir les écoulements. L'eau peut être ainsi stockée temporairement et ralentie plusieurs fois le long de son transfert vers l'aval, ce qui favorise son infiltration¹⁵. Notons que ces approches reviennent sur les aménagements mis en place depuis plusieurs décennies dont la vocation était généralement d'évacuer l'eau le plus rapidement possible afin de réduire les dommages aux cultures

15. C'est l'approche dite du « ralentissement dynamique » utilisée pour maximiser l'écrêtement des crues dans les bassins-versants.

dus aux « excès d'eau ». La simplification du parcellaire et des multiples zones diffuses de ralentissement et de stockage de l'eau, la suppression, toujours en cours, des haies, l'approfondissement des réseaux de fossés, ont longtemps concouru à cette évacuation rapide sur laquelle il faut revenir aujourd'hui.

En Afrique de l'Est, le programme Justdigg¹⁶ s'est lancé dans la restauration de régions en voie de désertification grâce à un façonnage de la surface du sol en « demi-lunes » qui permet de capter les ruissellements. Le zaï¹⁷, une technique traditionnelle originaire du pays dogon, consiste à semer dans des « poquets », de simples trous qu'on remplit de compost. Elle est mise en œuvre pour capter l'eau de pluie et s'assurer du bon démarrage des cultures. Les barrages ensablés au Kenya¹⁸ sont de petites retenues construites dans le lit de rivières asséchées grâce à des petits murets de pierres où le sable s'accumule progressivement lors des épisodes de fortes pluies. Le sable crée une réserve d'eau qui peut être valorisée pour l'eau potable, l'agriculture, la végétalisation des fonds de vallée et la régénération progressive de bassins-versants. Toutes ces approches peuvent être stimulées par des mécanismes

16. Voir le site de Justdiggit : <https://justdiggit.org/>

17. Mamadou Togola, « Restauration des sols dégradés : le Zaï et la demi-lune, deux techniques agricoles pour arrêter le désert », *Journal scientifique et technique du Mali JSTM*, n° 32, 10 décembre 2018. <https://www.jstm.org/restauration-des-sols-degrades-le-zai-et-la-demi-lune-deux-techniques-agricoles-pour-arreter-le-desert/>

18. Voir le film *Sand dams in Kenya* sur le site Sand Dams worldwide, juillet 2009. <https://www.sanddamsworldwide.org.uk/the-power-of-sand-dams-in-kenya>

de financement adaptés, combinant ressources publiques, privées et communautaires¹⁹ bénéficiant aux différents acteurs d'un même bassin-versant.

En Australie, une approche de régénération des paysages a été initiée par Perceval Yeomans sous le nom de « Keyline design » ou méthode d'aménagement des espaces agricoles (et urbains). L'idée est de localiser les « points clés » d'un paysage où les eaux de ruissellement convergent et d'organiser, à partir de ces points, des sillons ou des petits fossés perpendiculaires à la pente qui redistribuent l'eau et facilitent son infiltration²⁰. S'inspirant de la démarche holistique d'Allan Savory, l'approche inclut aussi la régénération des sols et de la végétation. Elle commence à se développer en France sous l'impulsion de l'association Pour une Hydrologie régénérative²¹.

Dans les villes, la récolte et l'infiltration de l'eau de pluie se développent également grâce à la réduction des surfaces imperméabilisées et à des systèmes de captage et de stockage divers. Cette récolte réduit la pression sur les réseaux d'assainissement souvent mis en défaut lors des épisodes pluvieux intenses, notamment dans les réseaux

19. Voir "What is a Water Fund ?" sur le site <https://waterfundstoolbox.org/getting-started/what-is-a-water-fund>

20. Voir la page « Le Keyline Design » sur le site Paysages fertiles : <https://www.paysages-fertiles.fr/www/index.php/methodologie/le-keyline-design>

21. Voir note 6.

«unitaires» où sont regroupées eaux usées et eaux de pluie. Lors de ces événements, les stations d'épuration subissent un stress déstabilisant pour les processus biologiques qu'elles abritent. Les réseaux sont même souvent complètement dépassés et relâchent alors des eaux polluées dans la nature. Les réserves d'eau de pluie constituées sont aussi disponibles pour reverdir la ville et la rendre plus résiliente.

Après avoir favorisé l'infiltration de l'eau, il est aussi intéressant d'en stocker davantage dans les sols en accroissant leur teneur en matière organique. Il est en effet bien démontré qu'un sol contenant des composés organiques présente une porosité et une capacité de rétention d'eau plus grandes. Un tel sol a également une meilleure fertilité. L'observation de sols riches en charbon de bois en Amazonie, les *terra preta*, a donné l'idée de produire un charbon de bois particulier, le biochar qui, ajouté au sol, en améliore la rétention d'eau et la fertilité tout en y stockant un carbone peu dégradable par les bactéries et champignons du sol. La production et l'usage de biochar se répandent rapidement à la fois pour l'agriculture et pour améliorer la résistance des végétaux plantés dans les villes.

À L'INTERFACE EAU BLEUE-EAU VERTE

Les zones humides artificielles ou construites²² fournissent un autre exemple de « Solutions fondées sur la Nature » définies comme « les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité²³ ». Leur conception a démarré aux États-Unis il y a plusieurs décennies. Elles ont pour principal objectif d'épurer des eaux bleues ou vertes grâce à la mise en place d'écosystèmes typiques des zones humides naturelles. On force des eaux d'infiltration, de ruissellement ou de cours d'eau à parcourir lentement des milieux poreux et plantés d'espèces capables d'absorber ou de dégrader des polluants comme dans des stations d'épuration par lagunage. Les zones humides construites sont un réservoir d'ingéniosité comme le montre l'initiative de l'entreprise Bamboo For Life²⁴ qui combine l'épuration par les plantations de bambous et la valorisation de leur biomasse dans de nombreux domaines y compris la production de matériaux composites pour l'aviation. La solution développée contribue à

22. D'après le terme anglais *constructed wetland*.

23. L'expression « Solution fondée sur la Nature (SFN) » devient progressivement l'expression générique désignant toutes les solutions qui cherchent à renforcer les écosystèmes et à s'assurer de la continuité des services qu'ils nous procurent. Voir le site du comité français de l'UICN (Union internationale pour conservation de la nature) : <https://uicn.fr/solutions-fondees-sur-la-nature/>

24. Voir le site de l'entreprise Bamboo For Life : <https://bambooforlife.fr>

l'épuration de l'eau, produit de la biomasse et la valorise de manière innovante, stocke davantage de carbone au mètre carré qu'une forêt et contribue au rafraîchissement local.

Les approches régénératives nous invitent à nous inspirer du vivant pour aller au-delà de la simple préservation de l'existant et créer davantage de biodiversité et de prospérité dans nos paysages. Elles nous encouragent à repenser fondamentalement le rôle de l'eau verte, cette eau qui démultiplie en la recyclant l'eau disponible. Pourrions-nous imaginer d'utiliser mieux les 7 % de vapeur d'eau supplémentaire permis par le degré de réchauffement déjà atteint, afin d'activer le recyclage d'eau verte et de bénéficier de ses multiples bienfaits ?

Par-delà l'eau et les plantes, les approches régénératives inspirent aujourd'hui les sphères économiques, sociales et technologiques comme le décrit Isabelle Delannoy dans *L'Économie symbiotique*²⁵. Car au sein même des processus naturels se cachent des mécanismes de coopération entre espèces, des cercles vertueux de fertilisation croisée essentiels pour les systèmes complexes et autoadaptatifs dont nous faisons partie.

25. *Op. cit.*

Laissons-nous aller à un peu d'optimisme. Nous avons en main de nombreuses solutions, mais les mettre en œuvre suppose de changer l'état d'esprit et les logiciels qui nous ont conduits là où nous sommes aujourd'hui. Il nous faut, en particulier, accepter que l'augmentation de l'efficacité doive aujourd'hui être complétée par une analyse de ses conséquences plus globales sur nos modes de vie, de production et de consommation et donc sur la sobriété, qui ne doit pas être un sparadrap qu'on adopte juste le temps d'une « crise ». On doit aussi y adjoindre une analyse de la montée de la vulnérabilité et des risques que l'augmentation de l'efficacité risque de produire. Notre réflexion sur le risque, jusqu'ici dirigée vers un passé connu, doit en particulier être profondément revue, car nous entrons dans une ère de surprises où des phénomènes jusqu'ici non observés vont se produire. Augmenter notre résilience par tous les moyens possibles est essentiel.

Les trois prismes de l'efficacité, de la sobriété et de la résilience ne sont pas indépendants. C'est d'une approche globale qui prenne en compte leurs interrelations dont nous avons besoin pour trouver les solutions optimales. La nature montre l'exemple : les multiples expérimentations de l'évolution ont conduit à des systèmes ayant réussi cette optimisation. Trois milliards d'années d'apprentissage par essai-erreur, ça aide ! Voilà en quoi le prisme de la régénération peut être utile. Il doit être celui qui, en toile de fond, nous guide dans la recherche et la mise en place de solutions qui allient efficacité, sobriété et résilience.

CONCLUSION

Ce livre est parti d'un questionnement simple : pourquoi examinons-nous l'eau sous le prisme unique de l'eau bleue, celle des rivières, des lacs et des nappes souterraines, gratifiée du titre honorifique d'«eau utile»? Pourquoi ce manque de considération pour l'eau de pluie qui pourtant nourrit la grande majorité de la population mondiale¹? Ce questionnement s'est inspiré des travaux de Malin Falkenmark et Johan Rockström, ainsi que de ceux du regretté Arjen Hoekstra, relatifs à notre empreinte eau. Grâce à eux, une pensée plus globale a pu émerger qui donnait toute sa place à l'eau verte, celle qui, infiltrée dans les sols, aide notre planète à développer sa propre agriculture. Ce n'était que le début.

Dans les années 2010, un article de chercheurs hollandais² a quantifié et décrit le mécanisme du recyclage continental. Il montrait comment et combien l'eau de pluie des continents provient pour une bonne part d'un recyclage de l'eau organisé par l'évaporation de la végétation. Que dans certaines régions boisées ou montagneuses, l'eau se recycle sur place. Ce mécanisme explique la transformation de la pluie continentale en 36 % d'eau bleue et en 64 % d'eau verte.

1. Même dans un pays comme la Tunisie, l'eau de pluie représente 80 % de l'eau agricole d'après Mustapha Besbes *et al.*, *op. cit.*

2. Rudi van der Ent *et al.*, *op. cit.*

Ce qu'on comprend aujourd'hui encore mieux, c'est que le recyclage continental est un véritable amplificateur du cycle de l'eau. La végétation, les écosystèmes, les forêts tropicales structurent et coconstruisent ce cycle avec l'aide des océans. L'image d'Épinal d'un cycle qui évapore de l'eau de l'océan, la transporte via les nuages sur un bassin-versant d'où elle repart vers l'océan via les cours d'eau et les nappes souterraines est totalement biaisée par notre vision de l'eau centrée sur l'eau bleue. La réalité est une série de bassins-versants virtuels en cascade dans lesquels l'eau se recycle. Ces recyclages successifs d'eau verte génèrent à nouveau de l'eau bleue et de l'eau verte³. L'eau ne fait pas qu'un aller-retour entre l'océan et les continents. Son infiltration dans les sols, son captage et son évaporation par la végétation la recyclent, ce qui augmente les quantités de pluie sur les continents.

Dans une planète avec une biosphère moins développée, telle qu'elle se trouvait avant l'holocène, alors que les glaces couvraient de nombreuses régions, le recyclage continental devait être moins important qu'aujourd'hui, ce qui rétroagissait sur la biosphère et la stabilité de la planète. C'est là sans doute une partie de l'explication de la variabilité du climat lors des glaciations précédant l'holocène.

3. La méthode *Wave*, *op. cit.*, fournit des données non seulement sur le recyclage local dans son ensemble, mais aussi sur sa contribution à la production d'eau bleue au sein des pays ou des bassins-versants.

Une chose est sûre, il est essentiel aujourd'hui de comprendre les conditions et les limites de la stabilité remarquable du fonctionnement et du climat de notre planète dans les douze mille dernières années. Pour cela, l'approche des limites planétaires égrenées tout au long de cet essai s'avère fertile, car elle développe une vision globale des interférences de notre développement avec le fonctionnement de la planète. Sans surprise, l'eau intervient dans la plupart de ces limites, qu'il s'agisse du climat, de la biodiversité, des grands cycles biogéochimiques ou encore du transport et de l'accumulation des polluants. L'approche des limites planétaires montre aussi combien les défis auxquels nous faisons face devraient être traités de manière holistique et systémique.

Dans cette perspective, il nous faudrait aujourd'hui développer pour l'eau des indicateurs globaux qui, comme ceux utilisés pour le climat, puissent nous informer de l'état de la planète et de nos actions. Deux de ces indicateurs peuvent être proposés. Tout d'abord un indicateur de l'extension maximale annuelle des zones mortes anoxiques océaniques dans les zones côtières où se déversent les eaux douces. Cette extension est le résultat de la quantité et de la qualité des eaux déversées ainsi que de l'évolution de la température des eaux côtières qui conditionne aussi leur teneur en oxygène. Tout comme l'évolution de la banquise estivale de l'Arctique, un tel indicateur serait une sorte de thermomètre global de l'état de l'eau douce.

Alors que ce premier indicateur concernerait l'eau bleue, le deuxième, tout aussi fondamental, devrait concerner l'eau verte. Cet indicateur pourrait être celui proposé par la limite planétaire de l'eau verte, soit la somme des déviations de teneur en eau verte des sols sur la planète par rapport à la période préindustrielle. Il pourrait aussi être intéressant d'examiner où et comment évoluent les 70 000 km³ d'eau verte produits par le recyclage continental, car, comme nous l'avons vu, ce volume annuel est le témoin du fonctionnement d'ensemble de la biosphère. Et plus la biosphère est active, plus elle recycle, plus elle génère d'eau verte. En théorie, il n'y a pas de limite à ce recyclage qui pourrait être plus important encore si toute la planète était verte. Un tel indicateur pourrait d'ailleurs être décliné à différentes échelles pour mesurer à la fois les impacts de nos transformations des usages de l'eau et des territoires et les résultats des approches régénératives qui se développent en de nombreuses régions. Il aurait l'avantage de guider et de stimuler l'action.

Tout autant que celui de l'eau douce, son cycle à travers les continents doit être perçu comme un bien commun de l'humanité qu'il importe de protéger avec soin, comme le propose la Commission mondiale sur l'économie de l'eau⁴.

4. Voir le site de la Global Commission on the Economics of Water : <https://watercommission.org>

Enfin, sans tomber dans un optimisme béat, reconnaissons que, pour surmonter les défis auxquels nous faisons face, il faut trouver le moyen de garder espoir et de se motiver pour agir. Le pessimisme de l'intelligence, comme le soulignait Gramsci, ne doit pas ternir l'optimisme de la volonté. Pourquoi alors ne pas développer davantage cette double approche des empreintes de pied (*footprints*) mesurant les impacts négatifs et des empreintes de main (*handprints*) rendant compte des impacts positifs de nos actions afin de nous redonner collectivement des raisons d'espérer et de démultiplier nos actions positives? En nous focalisant sur les problèmes, nous tombons facilement dans le pessimisme et l'inaction alors que c'est l'inverse qu'il nous faut.

ANNEXES

ANNEXE 1 LES LIMITES PLANÉTAIRES

Le tableau ci-dessous présente une synthèse des 9 limites planétaires étudiées, leur logique, les variables de contrôle, les seuils (i) d'entrée dans une zone à risque et (ii) de passage à une situation dangereuse, retenus pour chacune d'elles et leurs valeurs de 2023. Les six premières limites du tableau sont considérées comme présentant des risques pour la sortie de la planète de sa zone de stabilité de l'holocène en 2023. Les deux variables de contrôle de l'eau bleue et de l'eau verte sont dans cette situation.

Source : Katherine Richardson *et al.*, "Earth beyond six of nine planetary boundaries", *Science Advances*, vol. 9, n° 37, 2023. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>

| Les 9 limites | Explications | Variables de contrôle et seuils de risques (i) importants, (ii) dangereux | Valeurs 2023 |
|---|--|--|----------------------------------|
| Le dérèglement climatique | Au-delà d'une certaine augmentation de température moyenne, le dérèglement s'autoamplifie. | a. Teneur en CO ₂ de l'atmosphère, (i) 350 ppm, (ii) 450 ppm b. Forçage radiatif additionnel (énergie supplémentaire capturée) par mètre carré, (i) 1 W/m ² , (ii) 1,5 W/m ² | 417 ppm 2,91 W/m ² |
| La dégradation de la biosphère et de la biodiversité | Les écosystèmes constituent le socle permettant à la biosphère de fournir des services essentiels au bon fonctionnement de la planète. | a. Taux annuel d'extinctions d'espèces, (i) 10 E/MSY, 100 E/MSY (extinctions par million d'espèces par an). b. Taux de réduction de l'énergie disponible pour les écosystèmes naturels par rapport à l'holocène, (i) 10 %, (ii) 20 %. | >100 30 % |
| Le changement de l'utilisation des terres | La déforestation et la dégradation des sols réduisent la résilience et perturbent le bon fonctionnement de la planète dans son ensemble. | Réduction du taux de couverture forestière par rapport à l'holocène, (i) 25 %, (ii) 46 % (moyenne pondérée des différents biomes). | 40 % |
| Nouvelles entités chimiques à risque | L'accumulation de molécules aux propriétés insuffisamment connues (microplastiques, perturbateurs endocriniens, OGM) bouleverse les écosystèmes. | Part des nouvelles molécules aux impacts inconnus ne faisant l'objet d'aucun suivi, seuils encore inconnus. | >80% |

| | | | |
|--|--|---|---------------------------------|
| <p>Perturbation des cycles globaux du phosphore et de l'azote</p> | <p>Les apports excessifs de ces substances provoquent l'eutrophisation et l'apparition de zones mortes dans les océans.</p> | <p>a. Quantité d'azote prélevée dans l'atmosphère annuellement, (i) 62 Mt/an, (ii) 82 Mt/an. b. Quantité de phosphore rejeté dans l'eau, (i) 11 Mt/an, (ii) 100 Mt/an.</p> | <p>190 Mt/an 22,6 Mt/an</p> |
| <p>Cycle de l'eau douce, verte et bleue</p> | <p>L'utilisation excessive d'eau douce ou la dégradation du cycle de l'eau verte perturbe le fonctionnement de l'ensemble des écosystèmes.</p> | <p>a. Déviations [95^e centile] des flux d'eau de surface par rapport à l'ère préindustrielle, (i) 10,2 %, (ii) 50 %. b. Déviations [95^e centile] des teneurs en eau des sols depuis l'ère préindustrielle, (i) 11,1 %, (ii) 50 %.</p> | <p>18,2 % 15,8 %</p> |
| <p>Acidification des océans</p> | <p>De nombreux organismes, notamment les barrières de corail, sont menacés par une acidification trop rapide.</p> | <p>Concentration en ions carbonates (de l'aragonite) dans les eaux marines de surface, (i) 3,44 (ii) 2,75 fois le niveau de saturation de l'aragonite.</p> | <p>2,8</p> |
| <p>Teneur en aérosols de l'atmosphère</p> | <p>Les aérosols sont toxiques pour de nombreux organismes.</p> | <p>Aerosol Optical Depth, mesure de la réduction de radiation solaire atteignant la surface de la planète. (i) 0,1, (ii) 0,25.</p> | <p>0,076</p> |
| <p>Teneur en ozone de la haute atmosphère</p> | <p>L'ozone est nécessaire pour filtrer les rayons UV du soleil qui sont nocifs pour la santé humaine et celle des végétaux.</p> | <p>Concentration en ozone de la haute atmosphère, (i) 276, (ii) 261 Unités Dobson (DU).</p> | <p>284 DU</p> |

ANNEXE 2

CONSOMMATION ET PRÉLÈVEMENTS D'EAU BLEUE (b) ET VERTE (v) DANS LE MONDE ET EN FRANCE, EN KILOMÈTRES CUBES PAR AN.

La planète

Les précipitations continentales moyennes sont estimées à 110 000 km³/an. L'eau bleue est estimée à 40 000 km³/an.

| Utilisations | Eau consommée | Part des précipitations continentales | Eau prélevée | Part de l'eau bleue mondiale |
|-------------------------------------|---------------|---------------------------------------|--------------|------------------------------|
| Écosystèmes naturels (v) | 61 100* | 56,4 % | - | - |
| Agriculture pluviale (v) | 4 900 | 4,5 % | - | - |
| Pâturages (v) | 950 | 0,9 % | - | - |
| Agriculture irriguée (b) + (v) | 2 200 | 2,0 % | 2 700 | 6,8 % |
| Évaporation des barrages (b) | 700 | 0,6 % | - | - |
| Usages urbains (b) | 50 | 0,05 % | 500 | 1,3 % |
| Usages industriels hors énergie (b) | 80 | 0,07 % | 700 | 1,8 % |

| | | | | |
|---|---------|--------|-------|--------|
| Refroidissement des centrales thermiques (b) | 20 | 0,02 % | 1 100 | 2,8 % |
| Total (v) | 67 550 | 61,4 % | - | - |
| Total (b) | 2 450** | 2,2 % | 5 000 | 12,5 % |
| Total (v) + (b) | 70 000 | 63,6 % | 5 000 | 12,5 % |

* Cette valeur n'est qu'indicative et est reprise ici pour obtenir un total de 70 000 km³/an.

** Hypothèse : 1 600 km³ d'eau bleue consommée dans les périmètres irrigués.

Le cycle est complété par les 40 000 km³/an d'eau bleue retournant chaque année à l'océan.

La France

Les précipitations métropolitaines annuelles moyennes sont estimées à 510 km³/an. L'eau bleue interne (hors apports internationaux) est estimée à 198 km³/an, l'eau verte à 312 km³/an.

| Utilisations | Eau consommée | Part des précipitations métropolitaines | Eau prélevée | Part de l'eau bleue métropolitaine |
|-------------------------------------|---------------|---|--------------|------------------------------------|
| Écosystèmes naturels (v) | 243,1 | 47,7 % | | |
| Agriculture pluviale (v) | 62,7 | 12,3 % | | |
| Pâturages (v) | 5,7 | 1,1 % | | |
| Agriculture irriguée (b) + (v) | 2,4 | 0,5 % | 2,9 | 1,5 % |
| Évaporation des barrages (b) | non connu | non connu | | |
| Usages urbains (b) | 1,1 | 0,2 % | 5,3 | 2,7 % |
| Usages industriels hors énergie (b) | 0,2 | 0,04 % | 2,5 | 1,3 % |

| | | | | |
|---|-------|--------|------|--------|
| Refroidissement des centrales thermiques (b) | 1,6 | 0,3 % | 16 | 8,1 % |
| Total (v) | 311,9 | 61,1 % | - | - |
| Total (b) | 4,9** | 1 % | 26,7 | 13,5 % |
| Total (v) + (b) | 316,8 | 62,1 % | 26,7 | 13,5 % |

** hypothèse : 2 km³ d'eau bleue consommée dans l'agriculture irriguée.

Les prélèvements annuels réalisés pour alimenter les canaux (5 km³) n'ont pas été intégrés pour faciliter la comparaison avec les données mondiales.

Le cycle est complété par les 198 km³/an retournant à l'océan (auxquels il faut ajouter les 11 km³ d'eau apportés par les fleuves internationaux).

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---------------------|---|
| INTRODUCTION | 9 |
|---------------------|---|

| | |
|--|----|
| PREMIÈRE PARTIE - L'EAU DOUCE DANS TOUS SES ÉTATS | 21 |
|--|----|

| | |
|-------------------------------|----|
| I. LES CYCLES DE L'EAU | 23 |
|-------------------------------|----|

| | |
|---------------------------|----|
| Les mille vertus de l'eau | 23 |
|---------------------------|----|

| | |
|-------------------------|----|
| Le grand cycle de l'eau | 25 |
|-------------------------|----|

| | |
|---|----|
| Les précipitations à l'origine de l'eau bleue | 27 |
|---|----|

| | |
|--------------------|----|
| Du global au local | 29 |
|--------------------|----|

| | |
|-------------------------|----|
| Le petit cycle de l'eau | 31 |
|-------------------------|----|

| | |
|--|----|
| II. ÉLARGIR NOTRE PERCEPTION : L'EAU BLEUE ET L'EAU VERTE | 33 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| L'amplification du cycle de l'eau par le recyclage continental | 33 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Complémentarité et rôles des deux types d'eau | 37 |
|---|----|

| | |
|-------------------------|----|
| Les limites planétaires | 40 |
|-------------------------|----|

| | |
|--|----|
| III. LES USAGES DE L'EAU ET LEURS IMPACTS | 45 |
|--|----|

| | |
|-------------------------------|----|
| Que signifie utiliser l'eau ? | 45 |
|-------------------------------|----|

| | |
|----------------------------|----|
| Des impacts très variables | 50 |
|----------------------------|----|

| | |
|--|----|
| Compter l'eau : une entreprise difficile | 51 |
|--|----|

| | |
|------------------------------|----|
| L'eau bleue que l'on prélève | 53 |
|------------------------------|----|

| | |
|-------------------------------|----|
| L'eau bleue que l'on consomme | 57 |
|-------------------------------|----|

| | |
|-------------------------------|----|
| L'eau verte que l'on consomme | 59 |
|-------------------------------|----|

| | |
|-------------------------------|----|
| Une vue d'ensemble planétaire | 61 |
|-------------------------------|----|

| | |
|---|----|
| À l'échelle d'un pays ou d'une région : le cas de la France | 63 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Usages de l'eau et limites planétaires | 66 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| IV. EAU AGRICOLE, EAU VIRTUELLE | 73 |
| Les plantes, des gourmandes en eau | 73 |
| Le cas de la viande | 76 |
| Les autres produits transformés | 78 |
| Régimes alimentaires et besoins en eau | 79 |
| Produire localement ou importer ? L'importance de l'eau virtuelle | 82 |

| | |
|---|-----|
| V. UNE APPROCHE HOLISTIQUE DE NOS USAGES : | |
| L'EMPREINTE EAU | 87 |
| La notion d'empreinte | 87 |
| L'empreinte eau volumique | 89 |
| L'empreinte eau volumique de la France | 92 |
| L'empreinte eau multicritère | 97 |
| Empreinte de pied, empreinte de main ? | 101 |

| | |
|--|-----|
| DEUXIÈME PARTIE - LES CAUCHEMARS DE L'EAU | 105 |
|--|-----|

| | |
|---|-----|
| VI. SÉCHERESSES ET PÉNURIES D'EAU | 107 |
| Les famines, menaces existentielles pour l'humanité | 107 |
| Le phénomène El Niño, un amplificateur de risque | 109 |
| Sécheresses ou pénuries ? | 112 |
| Le cas du fleuve Jaune | 114 |
| Estimation du stress et des risques | 118 |
| Le bilan hydrique des sols, un régulateur essentiel | 122 |
| Eau virtuelle et pénuries | 125 |

| | |
|--|-----|
| VII. EUTROPHISATION ET POLLUTIONS | 129 |
| L'océan, témoin ultime de la qualité de l'eau douce | 129 |
| Mais que font les stations d'épuration ? | 130 |
| La limite planétaire des « nouvelles entités chimiques » | 135 |
| Eutrophisation et prolifération d'algues | 136 |
| Les zones mortes marines | 141 |
| La limite planétaire des cycles de l'azote et du phosphore | 143 |
| Flux environnementaux des cours d'eau | 145 |
| <hr/> | |
| VIII. DÉRÈGLEMENT CLIMATIQUE, CYCLE DE L'EAU ET ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES | 149 |
| L'eau et ses propriétés physiques | 149 |
| Principales conséquences du dérèglement climatique | 150 |
| La France sous une double influence | 153 |
| Anticiper les impacts locaux | 154 |
| Conséquences sur les proportions d'eau bleue et d'eau verte | 158 |
| Fonte des glaciers et réduction du manteau neigeux | 162 |
| Saisonnalité et décalage des cycles | 164 |
| Salinisation des eaux douces côtières | 167 |
| Une nouvelle science et des phénomènes inédits | 168 |
| Une variabilité surprenante | 172 |
| L'eau à la fois actrice et victime | 175 |
| La limite planétaire du dérèglement climatique | 175 |
| <hr/> | |
| IX. BIODIVERSITÉ ET INTÉGRITÉ DE LA BIOSPHERE | 179 |
| Penser la nature et sa diversité | 180 |
| Biodiversité et milieux aquatiques | 183 |
| Le cas des zones humides | 184 |
| Eau et intégrité de la biosphère | 187 |
| Les limites planétaires de la biodiversité et de la déforestation | 190 |
| <hr/> | |

TROISIÈME PARTIE - MISER SUR L'OPTIMISME DE LA VOLONTÉ 197

X. AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE NOS USAGES 199L'efficacité, paradigme majeur du xx^e siècle 200

Un cas clinique : l'eau potable 201

L'eau agricole, bleue, verte ou virtuelle 206

Lutter contre le gaspillage alimentaire 210

Réutiliser et recycler les eaux usées 212

XI. DÉVELOPPER LA SOBRIÉTÉ 215

Sobriété et efficacité : deux notions inséparables 215

La sobriété d'usage 217

La sobriété de conception 220

Des pistes pour la sobriété 222

XII. ACCROÎTRE NOTRE RÉSILIENCE 227

Revoir la notion de crise 228

Comment être résilient ? 229

Les risques d'hier ne sont pas ceux de demain 231

Robustesse, stockage et mécanismes tampons 233

Flexibilité, adaptabilité, diversification 237

Gestion, anticipation et réduction des risques 242

Coopération, partage de l'eau et des risques 244

XIII. METTRE EN ŒUVRE DES APPROCHES RÉGÉNÉRATIVES 247

Faire prospérer le vivant 247

L'eau verte au cœur de l'action 250

Récolter, infiltrer et valoriser l'eau de pluie 254

À l'interface eau bleue – eau verte 258

| | |
|-------------------|-----|
| CONCLUSION | 261 |
|-------------------|-----|

| | |
|----------------|-----|
| ANNEXES | 267 |
|----------------|-----|

| | |
|------------------------------------|-----|
| Annexe 1 – Les limites planétaires | 267 |
|------------------------------------|-----|

| | |
|--|-----|
| Annexe 2 – Consommation et prélèvements d'eau bleue (b) et verte (v) dans le monde et en France, en kilomètres cubes par an | 270 |
|--|-----|

