



MARIE-HÉLÈNE TUSSEAU-VUILLEMIN (87) *directrice scientifique à l'Ifremer*

LE CYCLE DE L'EAU, PANORAMA DES RESSOURCES

Les multiples moyens d'observation dont l'homme dispose aujourd'hui permettent de bien connaître le cycle de l'eau et les masses en circulation, auxquelles peuvent s'ajouter des eaux fixées dans les roches, l'écorce et le manteau terrestres. Changement climatique et augmentation des besoins en eau interféreront avec ce cycle.

UN PHÉNOMÈNE LONGTEMPS MAL COMPRIS

L'eau est si commune dans notre environnement tempéré, si présente dans nos usages, du plus quotidien au plus symbolique, en passant par les besoins vitaux, que les questions les plus simples qui s'y rapportent se révèlent parfois déconcertantes. Ainsi Bécassine, lors d'un voyage en Suisse, se laisse-t-elle facilement convaincre que, par souci d'économie, les robinets qui contrôlent le débit des rivières sont fermés la nuit. Effectivement, le terme même de source (et les nombreuses expressions qui en dérivent) nous conduit à cette représentation erronée des mouvements de l'eau, depuis une origine supposée ponctuelle jusqu'à un exutoire lui aussi bien défini. Il faudra de fait attendre le XVIII^e siècle, le siècle des observations, pour apporter une vraisemblance quantifiée aux intuitions

« Le terme même de source conduit à une représentation erronée des mouvements de l'eau »

héritées des philosophes grecs ou des scientifiques de la Renaissance. Après les travaux de Pierre Perrault et de l'abbé Mariotte, c'est Edmond Halley qui se chargera d'explicitier le rôle de l'évaporation sur les océans pour proposer un premier cycle fermé de l'eau. Halley estime, dans un article daté de 1687, les débits cumulés des fleuves les plus importants du bassin versant méditerranéen, les compare à une estimation de l'évaporation de la masse d'eau méditerranéenne (à partir d'une expérience menée sur un béccher de 20 cm de diamètre) et conclut fort justement que cette évaporation suffit à alimenter le débit des fleuves. Les premiers éléments du cycle de l'eau sont posés. Resteront à préciser le rôle joué par la végétation ainsi que les processus contrôlant les infiltrations et circulations souterraines, ce qui demeure de nos jours une question

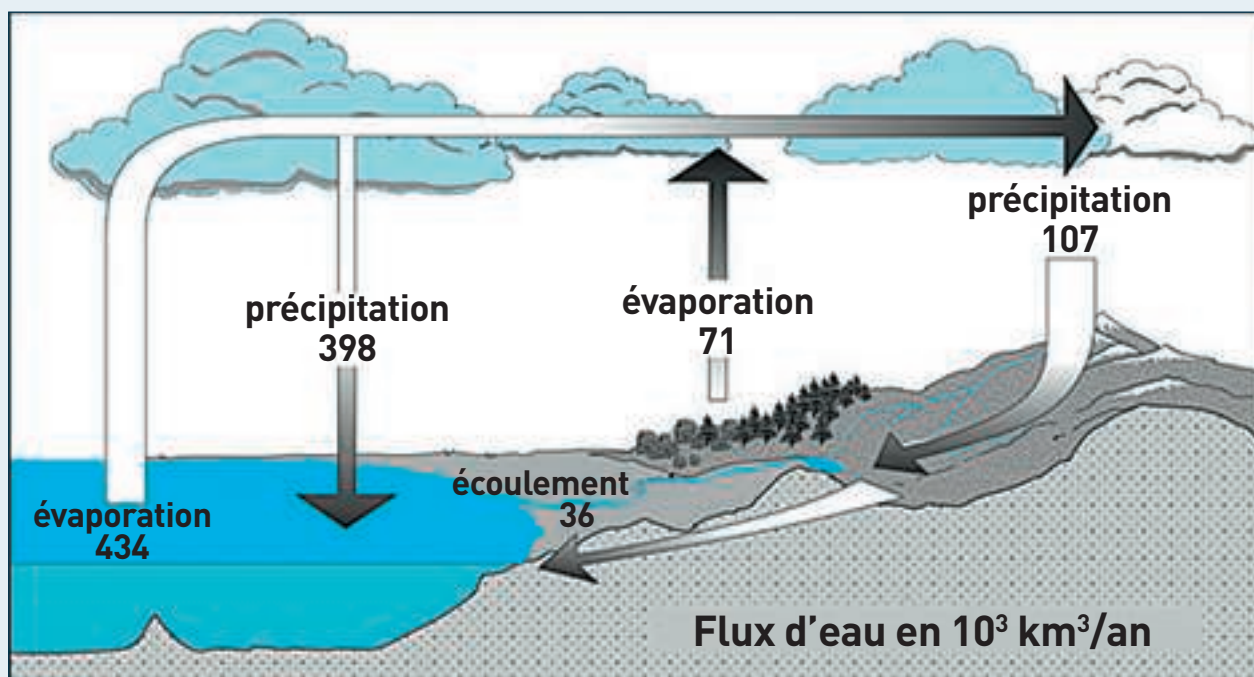
REPÈRES

La Terre est une planète bleue, la seule du système solaire à disposer d'une telle abondance d'eau liquide à sa surface, dont 70 % est couverte d'eau. Le volume d'eau sur la Terre est de 1 386 millions de kilomètres cubes (soit 0,17 % de la planète). Répartie en couche uniforme à la surface du globe, l'eau occuperait une couche de 2,7 km d'épaisseur.



Le terme de source conduit à une représentation erronée des mouvements de l'eau.

ILLUSTRATION DU CYCLE DE L'EAU GLOBAL DU RÉSEAU DES BASSINS VERSANTS



(AllEnvi, <http://rnbv.ippg.fr/>).

INVENTAIRE DES VOLUMES D'EAU À LA SURFACE DE LA TERRE

Milieux	Volumes, milliers de km ³	% total
Océans	1 335 000	96,7
Glaces	30 100	2,18
Eaux souterraines	15 000	1,1
Lacs d'eau douce et mers intérieures	280	0,02
Sols	120	0,0088
Atmosphère	13	0,0009
Rivières	2	0,0001
Biota	1	0,00007
Total	~1 380 500	100

scientifique épineuse sous le terme de « fonctionnement de la zone critique ».

PLUS D'UN MILLIARD DE KILOMÈTRES CARRÉS

Notre connaissance actuelle du cycle de l'eau et des réservoirs terrestres de surface repose sur un dispositif d'observations intégré, incluant l'observation spatiale, l'instrumentation des bassins versants et le suivi des eaux souterraines. L'inventaire des volumes d'eau n'est pas établi avec la même précision selon les

milieux, mais il révèle que près de 97 % de l'eau est contenue dans les océans, que l'eau atmosphérique, dont le rôle est essentiel dans la régulation de notre climat, représente un volume très faible (0,001 %), que 75 % de l'eau douce se trouve en fait sous forme de glace dans les calottes polaires et que c'est sur 1 % de l'eau terrestre que reposent

« Les besoins humains en eau douce reposent sur 1 % de l'eau terrestre »

essentiellement les besoins humains en eau douce (eaux souterraines).

UN CYCLE MESURÉ ET OBSERVÉ

Neige et pluie permettent à l'eau de l'atmosphère de rejoindre la surface du globe. Une partie de l'eau ainsi précipitée ruisselle directement (sur les surfaces imperméabilisées, c'est la totalité, sur des sols moins artificialisés, seulement une partie) vers la rivière la plus proche. Le restant pénètre dans les sols jusqu'à une profondeur variable. Cette eau

alimente les aquifères souterrains, qui sont en liaison plus ou moins directe avec les rivières. Les rivières s'écoulent vers les océans. Les océans s'évaporent vers l'atmosphère. À ce schéma très macroscopique s'ajoutent de nombreux flux plus locaux, comme, par exemple, l'évapotranspiration des végétaux sur le continent et les flux entre aquifères.

À ce schéma très macroscopique s'ajoutent de nombreux flux plus locaux, comme, par exemple, l'évapotranspiration des végétaux sur le continent et les flux entre aquifères.



© FOTOLIA

Les océans représentent 97 % de la masse d'eau.

DES RÉSERVES ÉNORMES FIXÉES D'EAU « JUVÉNILE »

En plus de cette eau en perpétuel mouvement à la surface de la Terre, de grosses quantités de molécules H_2O sont provisoirement fixées dans les roches, l'écorce et le manteau. Cette eau peut éventuellement revenir dans le cycle de l'eau superficielle lors d'éruptions volcaniques. C'est ce que l'on appelle l'eau juvénile. Les volumes concernés sont considérables (environ 18 fois le volume des océans, sur la base de 1 à 2 % de la lithosphère), mais il s'agit de molécules dispersées engagées dans des combinaisons chimiques stables et ne jouant aucun des rôles de l'eau telle que nous la connaissons à la surface de la Terre.

UNE ORIGINE ENCORE MAL CONNUE

Cette vision en cycle fermé appelle d'autres questions. Cette matière si précieuse, d'où nous vient-elle et se renouvelle-t-elle ? On date l'origine de la Terre à environ 4,6 milliards d'années et les roches sédimentaires les plus anciennes connues – et dont la formation est conditionnée à la présence d'eau –

ont seulement 3,8 milliards d'années. Néanmoins, d'autres indices permettent aux scientifiques de penser que de l'eau était présente à la surface de la Terre il y a 4,4 milliards d'années environ. Quant à son origine, elle est probablement à la fois

exogène (apports par bombardements météoritiques ou cométaires de la toute jeune planète) et endogène (dégazage de l'eau initialement prisonnière des magmas volcaniques). L'atmosphère terrestre a alors permis de retenir l'eau, continuellement

éaporée et condensée du fait des très hautes températures. Des molécules d'eau sont dissociées aux confins de l'atmosphère et s'échappent ainsi de la planète. L'apport d'eau juvénile contenu dans les éruptions volcaniques est vraisemblablement du même ordre de grandeur, puisque, selon les estimations actuelles, c'est seulement de l'ordre de 0,1 % que l'eau terrestre aurait diminué depuis son apparition. En quelque sorte, les dinosaures ont bu la même eau que nous.

LES ENJEUX DE L'EAU DANS LE CHANGEMENT GLOBAL

Les usages humains de l'eau sont essentiellement liés à l'alimentation (usage

direct et agriculture), à l'industrie et à l'hygiène. Ces usages sont très fortement variables d'une société à l'autre, en fonction des cultures et des niveaux de vie. Néanmoins, l'eau est évidemment également partie intégrante des écosystèmes aquatiques, marins ou d'eau douce, et est à ce titre absolument nécessaire à la production de nombreux autres services écosystémiques qui ont été pour certains mentionnés plus haut (régulation thermique par exemple).

Le changement global, que nous expérimentons d'ores et déjà, se traduira au moins par deux composantes : le changement climatique et ses conséquences sur le cycle de l'eau ; la démographie croissante et les tensions sur la ressource en eau et sa qualité. Ces deux évolutions touchent directement les usages que l'homme fait de l'eau, mais aussi les écosystèmes aquatiques et les services qu'ils sont à même de lui procurer.

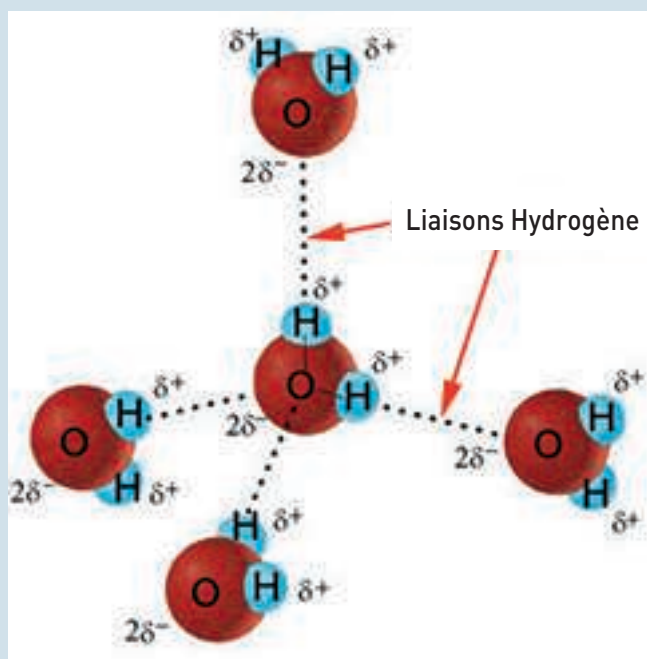
MODIFICATION DES PRÉCIPITATIONS

Selon les scénarios élaborés par le GIEC pour la fin du XXI^e siècle, le réchauffement minimum serait de 1,5 °C, quels que soient les modèles ou les hypothèses utilisés. Ce réchauffement s'accompagne d'une modification spatiale et temporelle des précipitations, les événements extrêmes s'accroissant. Les traductions de ces modalités en termes de cycle de l'eau ne sont pas encore effectuées et constituent des enjeux de recherche. En effet, ruissellement, érosion, fonctionnement de la zone critique ont toutes les chances d'évoluer différemment selon la fréquence et l'intensité des précipitations, selon des processus encore mal connus.

La tension sur les ressources accompagnera le changement climatique. Il ne s'agit plus seulement de garantir l'accès à l'eau en quantité, mais aussi en qualité, car les pressions anthropiques contribuent, directement ou indirectement, à sa dégradation. Dans les pays développés, les conséquences de l'agriculture et de l'élevage intensifs sur l'augmentation des concentrations en nitrates, produits phytosanitaires, métaux, antibiotiques,

UNE MOLÉCULE COMMUNE ET PRÉCIEUSE

La molécule d'eau se présente sous la forme d'un tétraèdre légèrement déformé, les deux liaisons O-H formant un angle de $104,5^\circ$. Les paires d'électrons libres de l'oxygène induisent un moment dipolaire, orienté selon l'axe de symétrie de la molécule, qui rend possible la formation de liaisons hydrogène entre les molécules d'eau. De cela découlent nombre de propriétés remarquables, auxquelles est lié le développement de la vie sur Terre.



Dans les phases condensées, les liaisons hydrogène confèrent une forte cohésion au fluide ou au cristal. Amener l'eau en phase gazeuse demande de briser ces liaisons, ce qui requiert une énergie importante. En conséquence, la température d'ébullition de l'eau est particulièrement élevée et cela permet à l'eau liquide d'exister sur Terre dans une gamme étendue de températures. Pour cette même raison, la capacité thermique de l'eau et sa chaleur latente d'évaporation sont exceptionnellement élevées. Cela confère aux océans et à l'atmosphère une

capacité de régulation des températures et du climat tout à fait importante (sans atmosphère, la température sur la Lune varie de plusieurs centaines de degrés chaque jour) et rend aussi par exemple la transpiration très efficace pour refroidir un organisme. Il est également remarquable de constater que la glace est moins dense que l'eau liquide, le maximum de densité étant atteint à 4°C . En effet, la structure cristalline de la glace tient les molécules plus éloignées les unes des autres que dans l'état liquide, dans lequel les liaisons H assurent une forte cohésion. C'est ainsi que les glaçons flottent dans nos verres et surtout à la surface des lacs, permettant à la faune de survivre dans l'eau sous-jacente ainsi isolée de l'atmosphère lorsqu'elle se refroidit. Du fait encore de la liaison hydrogène, la tension superficielle de l'eau pure est la plus élevée de tous les liquides. Cela permet à certains insectes de se déplacer à la surface de l'eau, à la sève de monter dans les tiges par capillarité, et bien d'autres phénomènes.

La polarisation de l'eau lui permet aussi de dissoudre facilement les corps ioniques, en particulier les sels, en entourant chaque ion d'une coque de molécules d'eau (solvatation). Cette propriété est elle aussi extrêmement structurante en ce qu'elle fait de l'eau un excellent vecteur de substances. L'érosion des roches et des sols par les eaux courantes, légèrement acidifiées par le contact avec le dioxyde de carbone atmosphérique, donne par exemple accès à la biosphère à de nombreux minéraux. Mais l'autre versant de cette propriété (les interactions hydrophobes entre molécules peu polaires en solution) est tout aussi important. En effet, les macromolécules organiques essentielles à la vie (enzymes, ADN, ARN) comprennent des groupements polaires et d'autres apolaires, dont les interactions avec l'eau conditionnent la structure spatiale (la macromolécule s'agence de telle sorte que les groupements hydrophobes puissent s'isoler du solvant). C'est de cette structure que dépendent généralement la réactivité et la spécificité de la molécule. D'apparence si simple, la molécule d'eau se révèle ainsi d'une prodigieuse ingéniosité qui a été mise à profit par le développement et l'évolution de la vie sur Terre.

etc., sont désormais bien connues, ainsi que celles de l'industrie. Elles s'accompagnent désormais des molécules dites « émergentes », issues de notre mode de vie moderne (cosmétiques, médicaments, ignifugeants, plastifiants), voire de toxines produites naturellement par les écosystèmes, à des fréquences accrues. Dans les pays en développement, dont les systèmes d'assainissement sont moins performants voire inexistantes, les pollutions les plus graves sont microbiologiques et compromettent gravement l'accès à l'eau.

Au-delà des usages directs de l'homme, le fonctionnement des écosystèmes aquatiques sera très probablement fortement modifié par ces différentes composantes du changement global, et ni leurs vulnérabilités ni leurs capacités de résilience ne sont encore bien connues ni comprises. Les modifications de régime hydrique appelleront des modifications des habitats et des communautés abritées et de leurs fonctionnalités. Elles joueront également un rôle dans l'exposition de ces communautés aux contaminations diverses citées

*« La tension
sur les ressources
accompagnera
le changement climatique »*

plus haut. Les rejets ponctuels se trouvent concentrés en régime d'étiage, les apports diffus se trouvent majorés en régime de crue. Les services rendus par les écosystèmes aquatiques sont tellement variés qu'il est inutile de chercher à les lister, mais on peut

citer l'exemple des régulations chimiques et biologiques, avec les transformations microbiennes en zone humide, ou dans les sédiments estuariens, qui pourraient fortement évoluer.



L'eau enfermée dans la roche revient lors d'éruptions volcaniques.

Enfin, n'oublions pas les risques associés au cycle de l'eau dans le changement global, qui sont majeurs et déjà expérimentés par certaines populations parmi les plus exposées : élévation du niveau de la mer, érosion des côtes, submersions, fonte des glaciers et des glaces de mer, inondations, sécheresses, instabilité des terrains. L'eau nous est tellement nécessaire, familière et précieuse qu'il est de notre responsabilité collective de nous ménager un avenir commun. ■

BIBLIOGRAPHIE

- L'Hôte Yann, 1990, *Historique du concept de cycle de l'eau et des premières mesures hydrologiques en Europe*, Hydrologie continentale, vol. 5, n° 1, p. 13-27.
- Dörfliger N. et Flammarion P, Prospective du groupe thématique « Eau » d'AllEnvi (<http://www.allenvi.fr>).
- De Marsily, 2009, *L'eau, un trésor en partage*, Éditions Dunod.
- Stratégie nationale de recherche, rapports intermédiaires d'avril 2014, atelier 1 « Gestion sobre des ressources et adaptation au changement climatique », piloté par G. de Marsily et E. Vergès, téléchargeable sur le site du ministère de la Recherche et de l'Enseignement supérieur (<http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid78802/strategie-nationale-de-recherche-bilan-des-travaux-des-10-ateliers.html#atelier1>).
- Tusseau-Vuillemin M.-H., Gourlay C, Ducharne A., Gonzales J.-L., Béranger K., « Introduction à la biogéochimie marine des eaux de surface », cours MF 202, ENSTA ParisTech.
- *Water JPI, scientific perspective*, adoptée en juin 2014, téléchargeable sur le site de la JPI (Joint Programming Initiative) : <http://www.waterjpi.eu/images/documents/Water%20JPI%20SRIA%201%200.pdf>

