

# CYCLE DE L'EAU ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Vital pour notre planète, le cycle de l'eau n'est compris que depuis le XVII<sup>e</sup> siècle. **Ghislain de Marsily** expose les étapes de cette découverte fondatrice et ses développements actuels face aux menaces croissantes de pénuries et à la lumière du rôle de l'eau dans l'effet de serre.

**T**out le monde connaît le cycle de l'eau : il pleut, l'eau qui tombe ruisselle, grossit le débit des rivières et s'infiltré dans le sol. Cette eau finit par aboutir à la mer, où elle s'évapore, forme des nuages et retombe en pluie... C'est à peu près ça, on l'appelle le cycle « per ascensum » de l'eau, qui monte au ciel, puis retombe...

## TRIBUNE

Dans le cadre de notre partenariat avec l'Académie des sciences, des académiciens nous montrent comment des théories, des résultats ou des applications peuvent dépasser ce qui avait été imaginé par les chercheurs... ouvrant ainsi de nouvelles et insoupçonnables perspectives.

Mais cette vision ne date que du XVII<sup>e</sup> siècle ! Auparavant, et depuis les grands philosophes grecs comme Aristote, on vivait sur la croyance d'un cycle dit « per descensum » où l'eau de nos rivières et de nos sources viendrait de la mer, qui s'infiltrerait directement dans les terres le long des côtes et remonterait aux sources ! À bien y réfléchir, ce cycle est faux, mais n'est pas idiot. Pourquoi les rivières coulent-elles quand il ne pleut pas ? Pourquoi le niveau de la mer ne monte-t-il pas, alors que les rivières se jettent dedans, avec des débits souvent énormes ? Le cycle « per descensum » est capable d'expliquer ces deux mystères : l'eau de la mer s'infiltré dans les terres, c'est pourquoi le niveau de la mer ne monte pas, puis ressort par les sources et alimente ainsi les rivières, c'est pourquoi les rivières coulent quand il ne pleut pas.

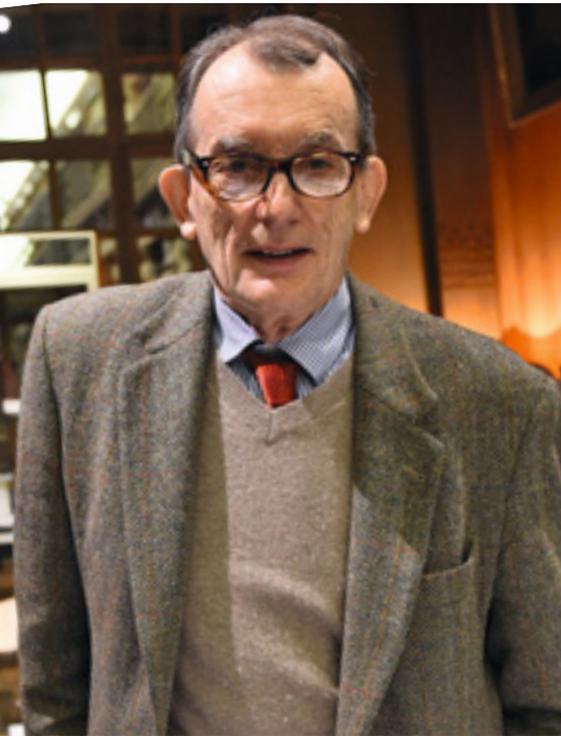
Mais il y a deux petits problèmes : l'eau de mer est

salée, l'eau des sources et des rivières est douce ; pourquoi ? Ensuite, l'eau dans ce cycle remonte des points bas (la mer) vers les points hauts (les sources en altitude des rivières) : pourquoi ? Pour les Grecs, c'était l'évaporation de l'eau de mer dans le sous-sol par la chaleur contenue dans la terre qui expliquait l'absence de sel, cette eau évaporée se condensant dans des grottes en altitude et coulant ensuite vers les sources. C'était intéressant... mais faux !

## « DE L'ORIGINE DES FONTAINES »

La théorie du cycle de l'eau « per ascensum » a été établie par un Français, Pierre Perrault (1611-1680), qui publia, en 1674, « De l'origine des fontaines », où il démontrait que la quantité d'eau de pluie tombée annuellement sur le bassin de la Seine était très largement supérieure au volume d'eau écoulé en un an par la Seine vers la mer. Il n'y avait donc pas besoin de faire venir de l'eau de mer pour expliquer le débit des rivières quand il ne pleut pas : c'est l'infiltration de l'eau de pluie dans le sous-sol qui alimente les nappes d'eau souterraine, lesquelles alimentent ensuite les sources et les rivières, cet écoulement souterrain étant très lent... L'eau qui manque à l'exutoire de la Seine est, en fait, celle qui est évaporée ou transpirée par la végétation.

Presque au même moment, en 1687, le physicien anglais Edmond Halley (1656-1742) démontra que la quantité d'eau qui s'évaporait chaque année à la surface de la Méditerranée était supérieure au volume apporté annuellement par les fleuves. La différence entre l'eau évaporée et celle arrivant en



## PROFIL

Professeur émérite à Sorbonne Université, université Pierre-et-Marie-Curie (Paris-VI), membre de l'Académie des sciences, **Ghislain de Marsily** est géologue, spécialisé en hydrologie. Ses recherches portent sur les ressources en eau – et les effets du changement climatique –, la contamination des eaux par les activités humaines et les processus géologiques liés aux écoulements souterrains.

mer est comblée par une entrée d'eau de l'Atlantique dans la Méditerranée par Gibraltar. Pas besoin là non plus de faire intervenir un flux « per descensum » pour expliquer la stabilité du niveau des mers.

### EAU VERTE ET EAU BLEUE

Aujourd'hui, nous pouvons quantifier plus précisément les composantes du cycle de l'eau « per ascensum ». À l'échelle de la planète, il tombe chaque année sur les continents une lame d'eau de 113 000 km<sup>3</sup>, dont 65 % proviennent de l'évaporation et de la transpiration de la végétation sur les continents, et 35 % seulement de l'évaporation sur les océans. Ce flux entrant se divise en quatre flux complémentaires, dont le total est bien sûr égal en moyenne au flux entrant. En premier lieu, 73 000 km<sup>3</sup>/an s'évaporent ou sont transpirés par la végétation. Cette eau, dite « verte » – car c'est elle qui alimente la végétation naturelle et l'agriculture dite pluviale –, tombe en pluie, s'infiltré dans le sol

**À l'échelle de la planète, il tombe chaque année sur les continents une lame d'eau de 113 000 km<sup>3</sup>, dont 65 % proviennent de l'évaporation et de la transpiration de la végétation sur les continents, et 35 % seulement de l'évaporation sur les océans.**

superficiel, y est stockée et immobilisée par la capillarité (comme dans une feuille de buvard), puis reprise par les racines des plantes, transportée aux feuilles par la sève, et transpirée par la surface des feuilles. 26 000 km<sup>3</sup>/an ruissellent à la surface du sol, arrivent dans les rivières, puis retournent à la mer. 10 000 km<sup>3</sup>/an s'infiltrent par ailleurs dans les sols en profondeur, au-delà du sol superficiel et alimentent les nappes souterraines, lesquelles se vident dans les sources, les rivières et la mer. La somme du ruissellement et des écoulements souterrains, qu'on appelle « eau bleue », représente 36 000 km<sup>3</sup>/an. C'est l'eau des ingénieurs, que l'on peut capter et faire couler dans des canaux ou des tuyaux, pour les besoins en eau domestique et industrielle ou pour l'irrigation. Enfin, le dernier flux est la fusion en mer des icebergs relâchés par les continents gelés (Groenland, Antarctique) pour 3 400 km<sup>3</sup>/an.

### POUR DESSALER, L'OSMOSE INVERSE

Si le cycle « per ascensum » n'apporte pas assez d'eau pour satisfaire les besoins, que faire ? On peut, en premier lieu, économiser l'eau, vivre plus sobrement. On peut aussi se déplacer. C'est ce que font depuis des temps immémoriaux les populations nomades qui suivent le régime des pluies, comme aujourd'hui encore en Afrique ou aux États-Unis pendant la grande sécheresse des années 1930, le « Dust Bowl ». On peut aussi tenter d'augmenter la pluie en envoyant dans les nuages des particules avec des fusées, mais c'est peu efficace. On peut stocker l'eau quand il pleut, et l'utiliser quand elle manque. Il faut alors ériger des barrages. On en a construit beaucoup jusque dans les années 1980, mais c'est aujourd'hui très mal vu par les protecteurs de l'environnement, parfois à juste titre (Sivens en France). On peut aussi transférer de l'eau en canal ou en conduite sous-marine. On peut enfin retraiter les eaux usées ou dessaler l'eau de mer.

L'osmose inverse est devenue, depuis quelques décennies, une méthode de plus en plus utilisée pour apporter de l'eau douce quand elle fait défaut mais où de l'eau salée est disponible. Elle a remplacé la distillation, qui consommait trop d'énergie. On force avec des pompes de l'eau salée à travers une membrane qui ne laisse passer que l'eau, pas le sel. Le coût de l'eau osmosée est de l'ordre de 0,7 euro/m<sup>3</sup>. Le prix moyen de l'eau domestique en France est de l'ordre de 3,5 euros/m<sup>3</sup> : raisonnable pour l'eau de boisson, il est beaucoup trop élevé pour l'eau d'irrigation (l'agriculture ne la paye en général que très peu, en moyenne de 0,05 à 0,3 euro/m<sup>3</sup>). Une )))

**La vapeur d'eau dans l'atmosphère et l'eau liquide dans les nuages ont un effet de serre très puissant... et largement méconnu. (...) L'eau agit en quelque sorte comme un amplificateur de l'effet des gaz à effet de serre (GES) sur le climat.**

» entreprise française, Suez, a construit plusieurs usines d'osmose inverse en Australie, mais l'énergie utilisée provient pour partie de champs d'éoliennes, une énergie intermittente bien adaptée car, quand le vent souffle, on peut stocker l'eau dessalée pour l'utiliser quand le vent ne souffle pas. On produirait actuellement entre 47 et 60 millions de m<sup>3</sup> par jour d'eau osmosée, soit moins de 0,5 % de l'eau douce consommée sur Terre, mais ce chiffre augmente d'environ 17 % par an.

Parlons d'une petite invention récente. On a constaté que les ondes radio transmettant les signaux des téléphones portables d'une antenne réceptrice à une autre étaient atténuées quand il pleuvait. Des chercheurs de l'Institut de recherche pour le développement travaillant en Afrique avec l'opérateur Orange ont ainsi pu montrer que si l'on mesurait systématiquement cette atténuation au cours du temps, on pouvait en déduire une estimation en temps réel de la pluie qui tombait entre les deux antennes. C'est une pluie moyenne sur la distance entre les deux antennes, mais c'est une information très importante et facile à recueillir, car, en Afrique, les réseaux des mesures de la pluviométrie sont très dégradés.

**UNE INEXORABLE ÉLÉVATION DU NIVEAU DE LA MER**

Finissons par l'eau, l'effet de serre et le changement climatique. La vapeur d'eau dans l'atmosphère et l'eau liquide dans les nuages ont un effet de serre très puissant... et largement méconnu. En régime naturel, 60 % de l'effet de serre proviennent de la vapeur d'eau, l'eau liquide et les autres gaz à effet de serre ne contribuant, à parts à peu près égales, que pour 20 % chacun. Si on ajoute plus de gaz carbonique ou de méthane à l'atmosphère, l'effet de serre est renforcé, la température de l'atmosphère augmente, et, par voie de conséquence, la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère s'accroît. L'eau agit en quelque sorte comme un amplificateur de l'effet des gaz à effet de serre (GES) sur le climat.

Le changement climatique prévoit pour 2050 une forte diminution des précipitations dans les zones de latitude méditerranéenne et une augmentation dans les zones nordiques. La France se trouve pratiquement à l'interface, si bien qu'il est difficile de dire si la France du Nord aura moins d'eau, alors qu'on en est quasi sûr pour la France du Sud, avec

une diminution des pluies, surtout en été, et une réduction du débit des fleuves d'environ 30 %. Il est urgent de mettre en place des politiques de sobriété, tant pour l'irrigation que pour l'eau domestique ou de transfert d'eau. Mais, comme l'appuient avec force de nombreux scientifiques, relayés par des mouvements citoyens, à l'instar de l'élan impulsé par la jeune suédoise Greta Thunberg, il est aussi infiniment urgent de changer, à l'échelle de la planète, le système de production énergétique, pour réduire de 50 % d'ici à 2030 les émissions de GES. Les énergies vertes sont essentielles, mais il faut alors développer le stockage de l'énergie, et maintenir sinon développer toutes formes d'énergies peu ou pas émettrices de CO<sub>2</sub>. Sans cela, surviendront des épisodes de graves pénuries d'eau potable, au moins localement, et des tempêtes dévastatrices, alors que le niveau de la mer, lui, augmentera de façon inexorable – on parle de + 9 m au XXIII<sup>e</sup> siècle... Nous devons nous y préparer... ou, mieux encore, agir sans attendre. ★

**LE SITE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES:**  
www.academie-sciences.fr



« **L'Eau, un trésor en partage** », de G. de Marsily, préface d'E. Orsenna. Dunod, 2009.

« **Allons-nous bientôt manquer d'eau ?** » de G. de Marsily, R. Abarca-del-Rio, A. Cazenave, P. Ribstein, dans « la Météorologie, revue de l'atmosphère et du climat », n° 101, mai 2018.

**EN LIGNE**  
[http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/67429/meteo\\_2018\\_101\\_39.pdf](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/67429/meteo_2018_101_39.pdf)

**À l'horizon 2050, il est quasi certain que la France du Sud connaîtra une forte diminution des pluies et une réduction du débit des fleuves d'environ 30 %.**



ROB-LAN