

# Chimie et eaux souterraines

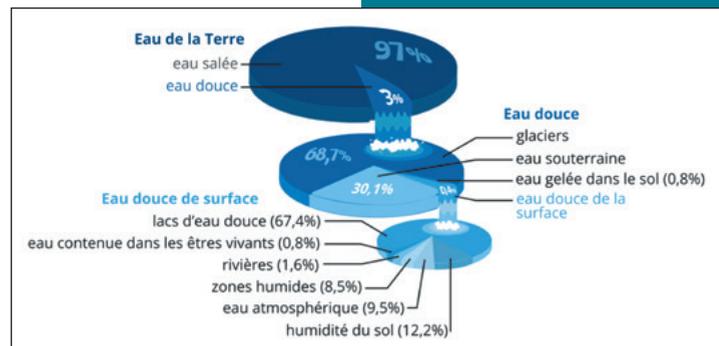
*D'après la conférence d'Alain Dupuy, professeur des universités en hydrogéologie, détaché au BRGM<sup>1</sup>, à Orléans, en tant que directeur du programme EAU sur les ressources en eaux souterraines et le changement global, également codirecteur du Programme et Équipement Prioritaire de Recherche (PEPR) sur l'eau : « One Water – Eau, bien commun », et de Christophe Poinssot, directeur général délégué du BRGM. Ancien élève de l'École normale supérieure, docteur en sciences des matériaux, titulaire d'une HDR en chimie, il est membre de l'Académie des technologies.*

## Introduction

La **figure 1** donne une vision volumique de l'eau présente sur Terre : 97 % d'eau salée et seulement 3 % d'eau douce. Sur le volume total d'eau douce, 30 % sont des eaux souterraines. À noter que ce sont des ordres de grandeur.

Pour mieux se représenter les volumes disponibles, regardons la **figure 2** qui représente

notre planète : elle est bleue, l'atmosphère est remplie de vapeur d'eau et il y a des



**Figure 1**

Répartition de l'eau sur Terre.

© OIEau, 2017.

1. BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières. Établissement public français de référence dans les applications des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol. C'est le service géologique national français.

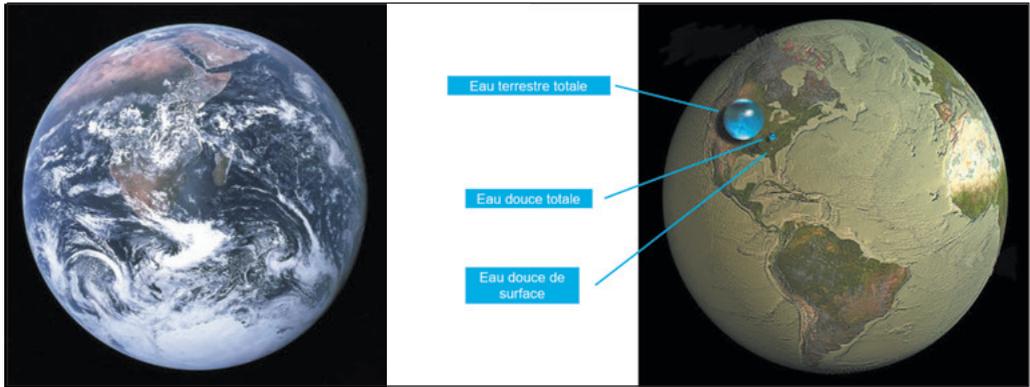


Figure 2

L'eau sur la Terre.

D'après © Howard Perlman, USGS ; Jack Cook, Woods Hole Oceanographic Institution ; Adam Nieman.

nuages. Tout ce qui est noir, c'est aussi de l'eau : ce sont les océans. Imaginons maintenant notre planète à la même échelle, mais avec les eaux retirées et rassemblées dans ces trois sphères à l'échelle. La plus grande, représente la totalité des eaux disponibles (eaux douces et salées) sur Terre, atmosphère comprise : cela représente une sphère de 1400 kilomètres de diamètre. La sphère moyenne représente le volume des eaux douces. Elle a environ 272,8 kilomètres de diamètre : elle contient les inlandsis<sup>2</sup>, les calottes glaciaires, les glaciers, les eaux souterraines, toutes les eaux de surface, les marais, les cours d'eau. La plus petite des sphères est celle de l'eau douce dite « de surface » facilement accessible : ce sont les lacs, les cours d'eau, les rivières, les fleuves, les zones humides et les nappes

2. Inlandsis : très grande étendue de glace recouvrant un continent et pouvant atteindre plusieurs milliers de mètres d'épaisseur.

phréatiques (la première nappe qu'on peut atteindre depuis la surface). Cette sphère ne fait que 56,2 kilomètres de diamètre.

**On ne crée pas d'eau sur Terre, il n'y a que des échanges.** La Terre perd de l'eau par la haute atmosphère, mais elle en reçoit aussi par le cœur, par les roches qu'on appelle « ignées<sup>3</sup> ». C'est de l'eau qui « remonte » des roches internes. Le bilan est à peu près constant : la **figure 3** représente le grand cycle de l'eau avec les flux, les stockages et les temps de résidence. Les flux sont intéressants, même si les chiffres, des milliers de kilomètres cubes par an, sont des ordres de grandeur compliqués à imaginer.

Ce qui est intéressant dans cette représentation, c'est qu'on y retrouve les volumes échangés ainsi que les stocks

3. Les roches ignées (ou magmatiques) se forment quand un magma se refroidit et se solidifie.

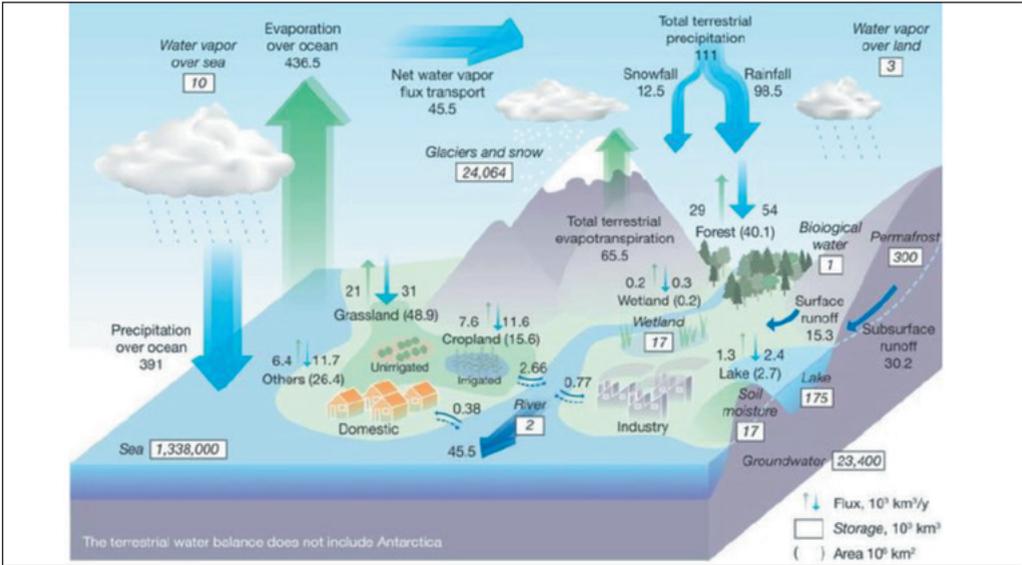


Figure 3

Le grand cycle de l'eau.

© Taikan Oki et Shinjiro Kanae, Science, 2008.

avec les chiffres encadrés : c'est le modèle qu'il faut garder en tête pour conceptualiser le grand cycle de l'eau avec des flux et des stocks.

Ainsi représenté, le grand cycle de l'eau permet de visualiser que les eaux souterraines représentent le plus gros volume d'eau douce disponible et le plus gros stock facilement accessible. Comme déjà dit, le grand cycle de l'eau fonctionne avec des volumes totaux finis, des flux importants et des temps de renouvellement très variables dans les différents compartiments, autrement dit des vitesses de circulation radicalement différentes entre les grands ensembles qui constituent le cycle de l'eau. La **figure 4** représente le cycle terrestre de l'eau de manière différente avec la notion d'aire de ruissellement.

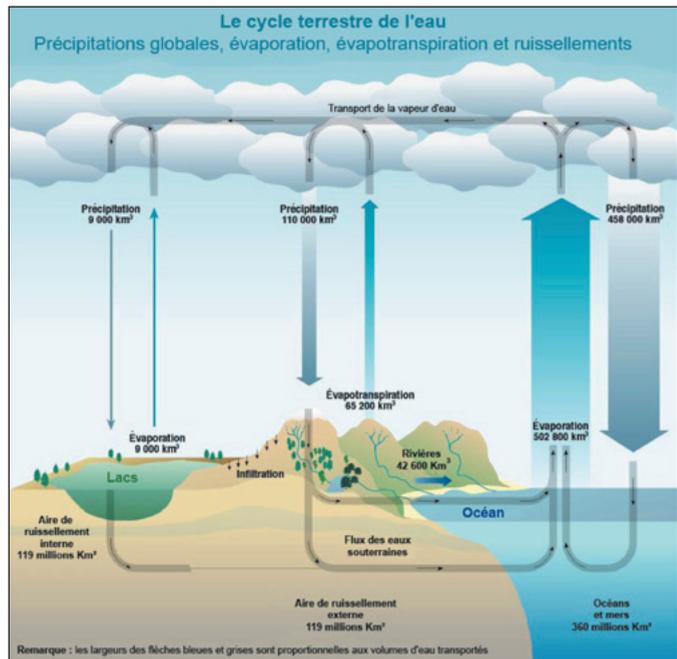


Figure 4

Le cycle terrestre de l'eau.

© UVED.

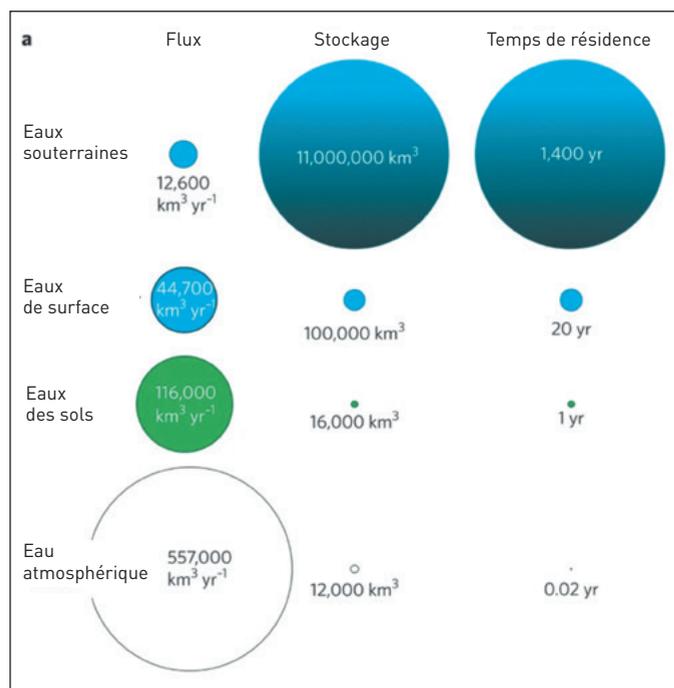
La **figure 5** est une autre représentation du cycle de l'eau souvent utilisée, qui permet de voir les stocks et les flux. Nous pouvons voir que les eaux souterraines représentent le plus gros stock, alors que le stock d'eau atmosphérique est beaucoup plus faible. Par contre, le flux de l'eau atmosphérique est énorme alors que le flux dans le souterrain est beaucoup plus petit. Cela se traduit par un taux de renouvellement ou un temps de résidence très court pour les eaux atmosphériques et beaucoup plus grand pour les eaux souterraines. Pour les eaux du sol, le temps de résidence est d'une année en moyenne, de vingt ans pour les eaux de surface telles que les lacs, alors que, pour les

eaux souterraines, il atteint facilement des centaines, voire des milliers d'années. Ces différences importantes changent beaucoup de choses parce qu'on ne gère pas un flux comme on gère un stock.

## 1 Hydrogéochimie

**L'hydrogéochimie est la connaissance des caractéristiques chimiques et physicochimiques des eaux souterraines, des processus d'acquisition de leur composition et des lois qui régissent les échanges entre l'eau, le sol et le sous-sol.**

En hydrogéologie, elle permet de gérer qualitativement le stock des eaux souterraines qui représentent, en France, environ 67 % de l'alimentation en eau potable. Cette science de l'hydrogéochimie est donc essentielle car, au-delà des schémas de circulation hydrodynamique dans le sous-sol, elle permet de calculer la composition de l'eau tout au long de sa circulation souterraine. Le **concept de faciès hydrochimique** repose sur l'hypothèse selon laquelle la composition chimique de l'eau souterraine reflète un équilibre chimique des eaux avec les roches dans lesquelles elles circulent. On peut ainsi classer les eaux et établir leur carte d'identité en fonction de leur faciès. Les chimistes, hydrochimistes ou hydrogéochimistes ont ainsi cette capacité de dire, de simuler, de calculer l'évolution de la teneur en sels d'une eau, dans certaines concentrations, et l'évolution dans l'espace et dans le temps. Parmi les représentations d'analyses



**Figure 5**

Flux, stockage et temps de résidence de l'eau dans les différents milieux.  
D'après Aeschbach-Hertig et Gleeson, Nature Geoscience, 2012.

les plus célèbres (*Figure 6*), le diagramme de Schoëller-Berkaloff et celui de Piper sont actuellement parmi les plus utilisés pour les classes de qualité d'eau. On classe les eaux en bicarbonatée, calcique et magnésienne; les eaux souterraines appartiennent le plus souvent à cet ensemble.

**Prenons l'exemple du Bassin parisien** et examinons sa carte géologique (*Figure 7*). Sous la carte, on trouve la coupe géologique du bassin, qui correspond à la ligne qui part des Vosges et va jusqu'au pays d'Auge. C'est donc un bassin fermé qui se poursuit au-delà de la Manche et qui va jusqu'en Angleterre. En regardant le log stratigraphique (à droite de la carte géologique), tout ce qui est coloré représente les aquifères, c'est-à-dire les roches qui contiennent l'eau, dans lesquelles l'eau souterraine circule et que l'on peut puiser

à l'aide de forages. Ailleurs, quand ce n'est pas coloré, cela correspond à un aquitard ou semi-perméable. Ces horizons sont toujours saturés (remplis) d'eau, mais l'eau y circule moins vite et moins bien que dans un aquifère. Mais, surtout, dans l'aquitard, on ne sait pas sortir de l'eau, on ne sait pas l'exploiter. **On ne peut donc exploiter l'eau que dans les parties colorées, soit les aquifères.** Avant d'exploiter l'eau, la qualité de cette eau doit être considérée. On commence par regarder les interactions entre la roche et l'eau qui y circule. L'eau qui circule vient forcément d'un lieu donné de la surface : ce sont des eaux des précipitations avec la composition d'une eau de pluie. Au fur et à mesure du lent cheminement, à travers le sol puis le sous-sol dans l'aquifère, la composition de cette eau peut changer.

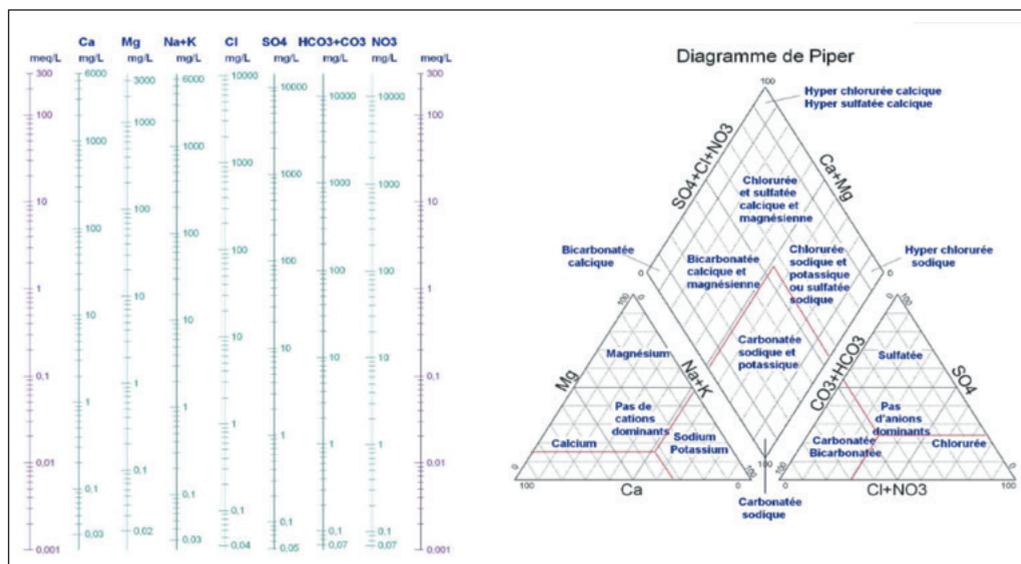


Figure 6

Diagramme de Schoëller-Berkaloff et diagramme de Piper.

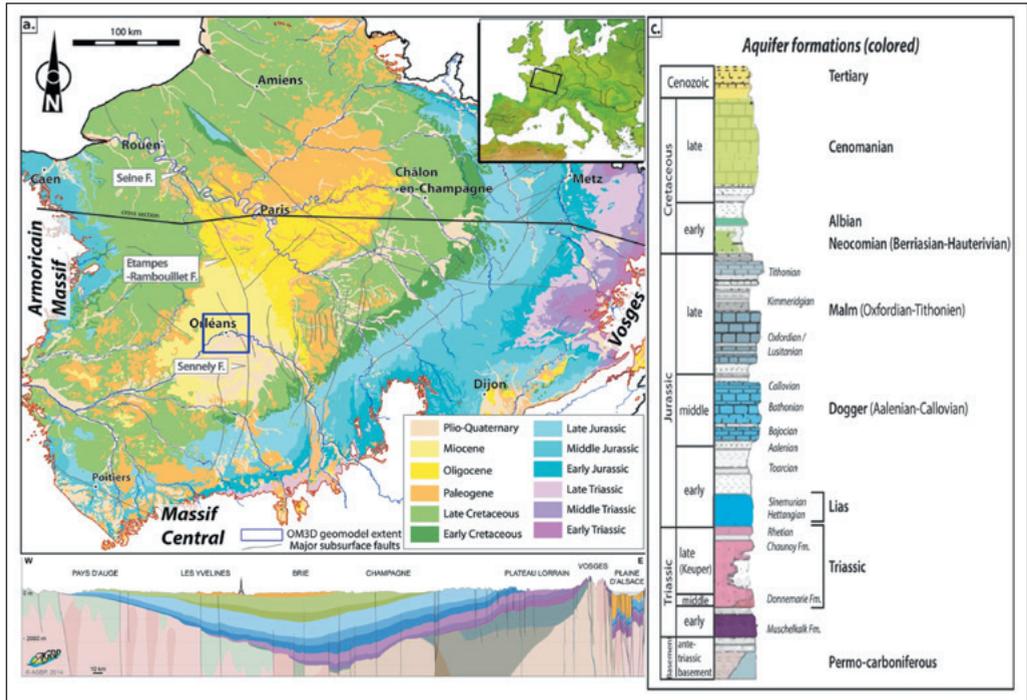


Figure 7

Carte et coupe géologique du Bassin parisien.

D'après P. Mas *et al.*, 2022.

Regardons l'exemple de la **figure 8**, qui représente la nappe stratégique de l'Albien située sous Paris, qui était connue pour être artésienne il y a longtemps. « Artésienne » signifie que l'on pouvait creuser un puits jusqu'à cette couche géologique située à peu près à 600 mètres de profondeur sous Paris, et que l'eau jaillissait par surpression.

À partir de la carte de la **figure 8**, on arrive maintenant à identifier, en fonction du lieu, les eaux selon leur composition. Du point de vue du fonctionnement hydrodynamique, lorsque la nappe est « libre », elle reçoit directement l'eau des précipitations.

L'eau s'infiltré à travers le sol, percole<sup>4</sup> dans le sous-sol, rejoint la nappe libre de l'aquifère et se charge en éléments qui sont contenus dans le sol et la roche. Du point de vue de la qualité, tout va bien si le sol ou la roche ne contiennent pas ou peu d'éléments indésirés. Malheureusement, nous produisons de nombreux polluants que nous diffusons sur le sol, polluants qui peuvent ainsi contaminer les eaux qui s'infiltrent et percolent vers les nappes. De même, la roche aquifère, qui peut avoir des millions d'années, s'est

4. Percoler : pour un liquide, passer à travers des matériaux poreux.

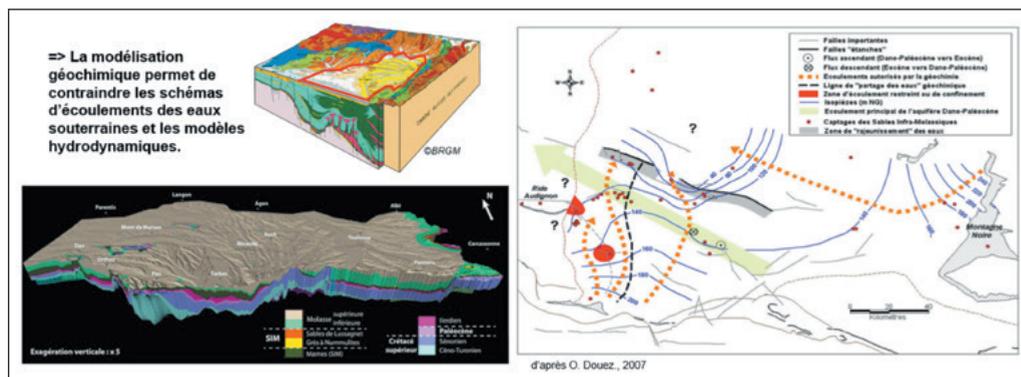


Figure 9

Modélisation hydrogéochimique du bassin du Sud-Ouest.

sédimentée avec une teneur en un élément  $x$  ou  $y$ , comme le sélénium ou le fluor. Cela pourra se traduire par une eau riche en ces éléments. C'est le cas de La Roche-Posay, qui est une eau thermale parce qu'elle contient du sélénium. Lorsque la présence d'éléments est induite par la géologie, on parle de « fond géochimique ». Pour qualifier une ressource en eau, il faut composer avec toutes ces données.

La **figure 8** montre également la cartographie des types d'eaux, qui sont très différents. Cela traduit une évolution de la qualité de l'eau en fonction du lieu où l'on se trouve, en fonction de la géologie que l'on a rencontrée et en fonction des contraintes d'écoulement que l'on a pu avoir.

L'hydrochimie et la géochimie ne servent pas qu'à caractériser le faciès de l'eau : la modélisation géochimique permet de contraindre les schémas d'écoulement des eaux souterraines et les modèles hydrodynamiques.

Les hydrochimistes modélisateurs ont la capacité de calculer comment cette eau va évoluer en fonction des variations de lithologie de la roche encaissante et de sa nature géologique. Ils sont également capables de dire, comme on peut le voir sur la **figure 9** avec l'exemple du Bassin aquitain, les écoulements chimiquement autorisés qui ont été déterminés par modélisation. Ils figurent en pointillés une limite interne dans l'écoulement, limite qui s'est mise en place naturellement avec des chimies d'eau incompatibles. Les connaissances hydrochimiques qui figurent sur cette carte ont été appréhendées dans les modélisations numériques : on a donc tenu compte de cette évolution et de ces contraintes pour revisiter le modèle de fonctionnement des ressources en eaux souterraines. Les modélisations hydrodynamiques et hydrochimiques ont ainsi pu donner des éléments de réponse aux décideurs pour dire comment gérer leurs ressources, où les exploiter, où ne pas les



engagées pour limiter et pour abaisser les concentrations de ces éléments polluants, ou perturbants, qui dégradent la qualité des ressources en eau. En 2019, sur les 689 masses d'eaux souterraines, 70 % étaient en bon état (**Figure 10**). Il y a donc encore quelques efforts à faire.

Toutes ces données sont ouvertes au public et rassemblées dans des bases de données, telles que le Sandre<sup>5</sup> ou ADES<sup>6</sup>, mais elles ne sont pas si facilement accessibles en termes de compréhension des données.

## 2 Hydrologie isotopique

La chimie a également beaucoup aidé dans un autre domaine : l'**hydrologie isotopique**. Les eaux de différents

endroits ont une signature isotopique différente. Cette empreinte est utilisée pour retracer le parcours de l'eau tout au long de son cycle hydrologique, de l'évaporation au retour dans les océans ou dans l'atmosphère en passant par les différentes étapes de précipitation, d'infiltration, de ruissellement, etc. (**Figure 11**). Pour ce faire, on se réfère à un référentiel fixé dans le cycle : il s'agit de l'océan qui sert de source par évaporation en termes d'isotopes naturels<sup>7</sup>. Des appauvrissements ont lieu en fonction de la distance par rapport à la source, par rapport à l'altitude, mais, surtout, également par rapport à la température. Par exemple, lors d'une évaporation, la vapeur d'eau est moins concentrée en  $H_2^{18}O$  que le liquide dont elle est issue, et inversement lors d'une précipitation.

5. Sandre : référentiel des stations de mesure du niveau et de la qualité des eaux souterraines.

6. ADES : base de données relative aux eaux souterraines (> 4 000 points de mesure).

7. Les isotopes sont des atomes qui possèdent le même nombre d'électrons – et donc de protons, pour rester neutre –, mais un nombre différent de neutrons.

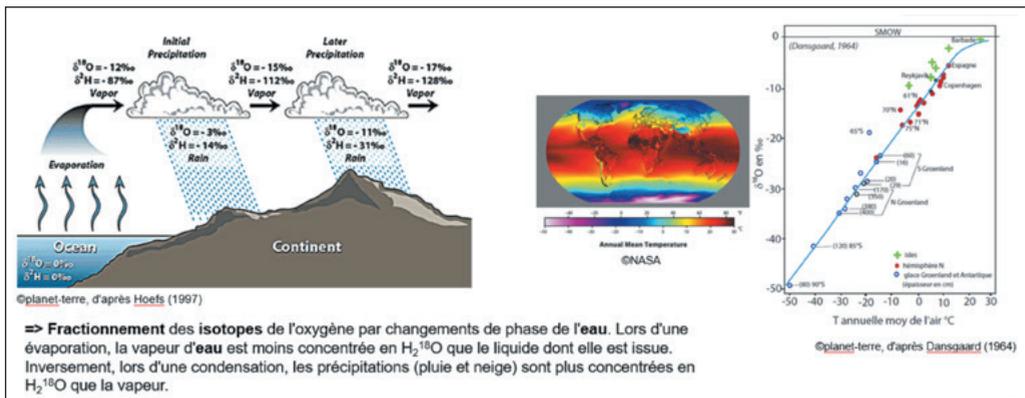


Figure 11

L'hydrologie isotopique pour retracer le parcours de l'eau tout au long du cycle hydrologique.

La référence eau standard de l'océan est le SMOW<sup>8</sup>. Plus les mesures s'éloignent de cette référence, plus on va vers une droite mondiale météoritique qui permet de caractériser et de positionner le type de précipitation que l'on a. Dans le cycle de l'eau, les précipitations sont la fonction d'entrée. Puis il se passe quelques jours, quelques semaines, jusqu'à l'infiltration qui va sceller l'empreinte, et l'empreinte va se conserver dans le domaine souterrain. Donc, si l'on arrive à connaître cette isotopie dans l'analyse d'une eau que l'on peut faire en profondeur, on saura dire depuis combien de temps elle circule, où elle s'est infiltrée et quelles évolutions elle a suivies. C'est tout l'enjeu d'une gestion quantitative de nos ressources.

Les isotopes radioactifs naturellement présents dans l'eau sont utilisés pour estimer l'âge des eaux souterraines (Figure 12). Cela a été fait, entre autres, sur des aquifères profonds dans le sud-ouest de la France, dans le Bassin parisien etc. Grâce aux analyses isotopiques, on arrive à reconstituer l'historique des précipitations et de leurs températures originelles que l'on cale avec la courbe de référence issue d'une carotte glaciaire<sup>9</sup> (courbe en bleu ciel dans la figure 12). Grâce à la reconstitution des températures paléoclimatiques, on arrive ainsi à situer l'origine des eaux par rapport à la fonction d'entrée de notre

8. SMOW (Standard Mean Ocean Water : «eau standard de l'océan moyen») : référence pour l'oxygène et l'hydrogène dans l'étude du cycle de l'eau.

9. Carotte glaciaire : échantillon, retiré de calottes glaciaires, formé par compression de couches de neige successives, année après année. Une découpe verticale de glace contient donc des couches de plus en plus anciennes à mesure qu'on s'enfonce vers le centre de la Terre.

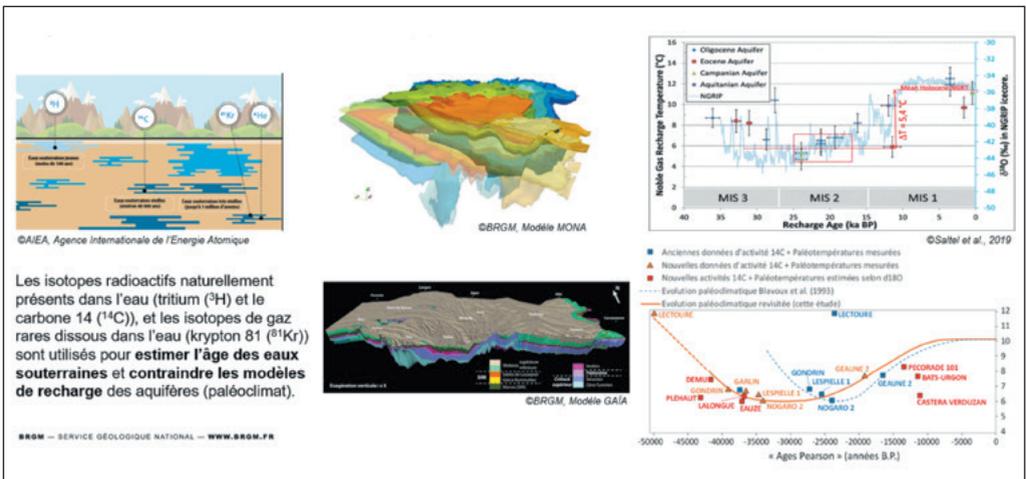


Figure 12

L'hydrologie isotopique pour estimer l'âge des eaux souterraines.

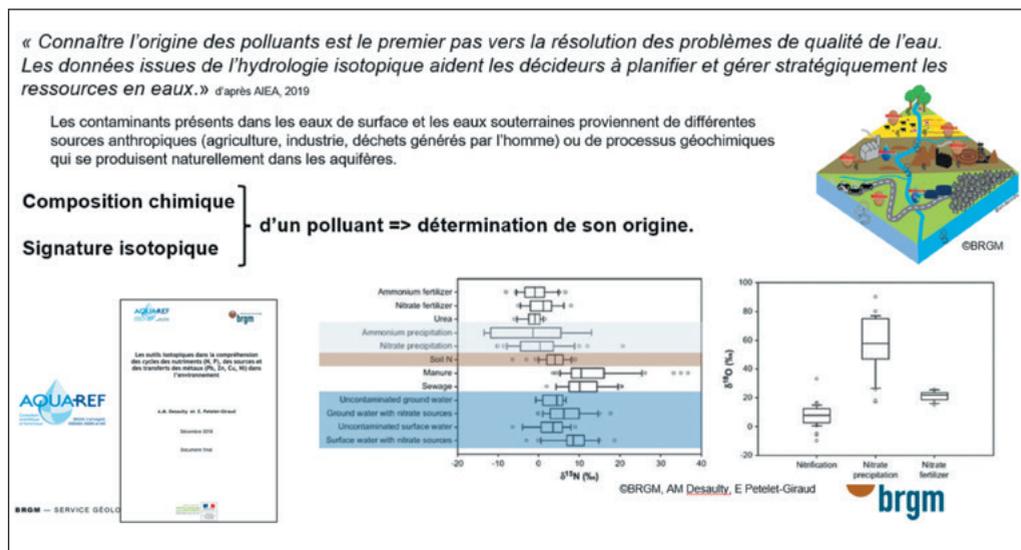


Figure 13

L'hydrologie isotopique pour connaître l'origine des polluants.

système que sont les précipitations. Ici, grâce aux techniques analytiques et aux progrès de l'analyse, on a pu se rendre compte que, dans ce bassin, circulent des eaux qui avoisinent 50 000 ans d'âge.

Connaître l'origine des polluants est le premier pas vers la résolution des problèmes de qualité de l'eau. Cette fois-ci, l'isotopie ne va pas porter sur la molécule d'eau en elle-même, mais sur le polluant (Figure 13). On va regarder les isotopes naturels qui participent à la composition du polluant et on va le traiter de la même manière, pour essayer de voir, par exemple sur l'azote, la différence de contenu de  $^{15}\text{N}$ , par rapport à son origine potentielle. Cela permettra d'être beaucoup plus précis par rapport à sa source d'origine, et donc d'identifier la cause sur laquelle il faut jouer.

### 3 Biogéochimie environnementale

Jusqu'à il y a une dizaine d'années, on pensait qu'il y avait peu ou pas de formes de vie dans les eaux souterraines. On se trompait, et beaucoup de travaux sont maintenant réalisés pour identifier les phyla<sup>10</sup> et la stygofaune<sup>11</sup> qui s'y trouvent (Figure 14).

Ces communautés bactériennes peuvent être perturbées par nos activités, et la recharge artificielle des aquifères, surtout avec des eaux usées traitées, peut être un élément de solution pour augmenter le stock et résoudre une partie des problèmes de disponibilité, mais avec le risque potentiel de perturber

10. Phyla : micro-organismes, division spécifique des bactéries.

11. Stygofaune : ensemble des espèces qui vivent dans les milieux aquatiques souterrains.

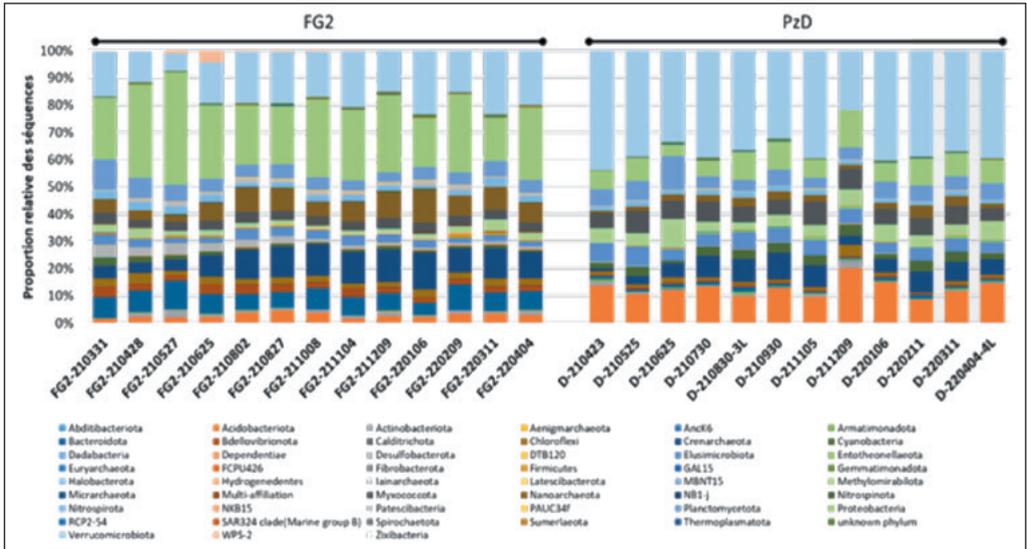


Figure 14

Évolution temporelle de la diversité des phyla dans les eaux souterraines.

le biotope<sup>12</sup> souterrain peu ou pas connu. Il faut donc prévoir ce que l'on fait à l'avance et non *a posteriori*.

12. Biotope : milieu biologique présentant des conditions de vie homogènes.

Des outils sont actuellement développés, et résumés sur le schéma de la **figure 15**, pour étudier l'évolution temporelle de ces phyla. D'autre part, dans le cadre du programme de recherche One Water<sup>13</sup>, exposé dans un autre chapitre de cet ouvrage (voir l'article de Mme Agathe Euzen), un projet s'intéresse à l'inventaire, l'identification, la classification des ARN environnementaux et des ADN environnementaux<sup>14</sup> comme sentinelles de la qualité des milieux.

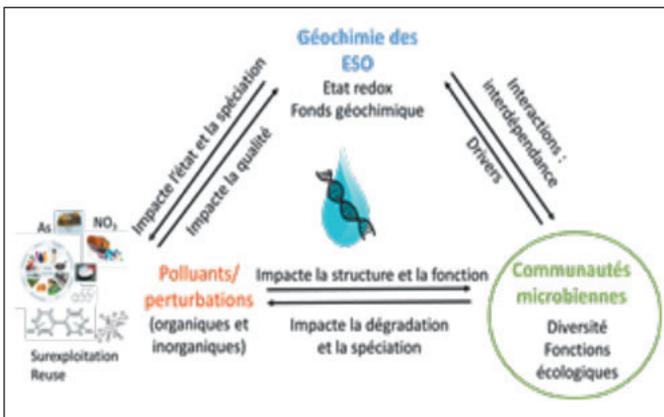


Figure 15

Interactions entre communautés bactériennes, polluants et fonds géochimiques.

13. One Water : « une seule eau ».  
 14. La détection d'ADN et d'ARN dans l'environnement permet, théoriquement, de définir l'activité d'un organisme dans une condition donnée.

## Conclusion

En conclusion, nous disposons d'une bonne connaissance relative des systèmes aquifères en France, comme illustré par la carte actualisée des aquifères en France (**Figure 16**). Mais la **figure 17** nous rappelle les très nombreuses sources de pollution existantes, malheureusement souvent anthropiques, qui sont présentes au droit des ressources en eau. Il ne faut pas non plus oublier l'historique de nos activités

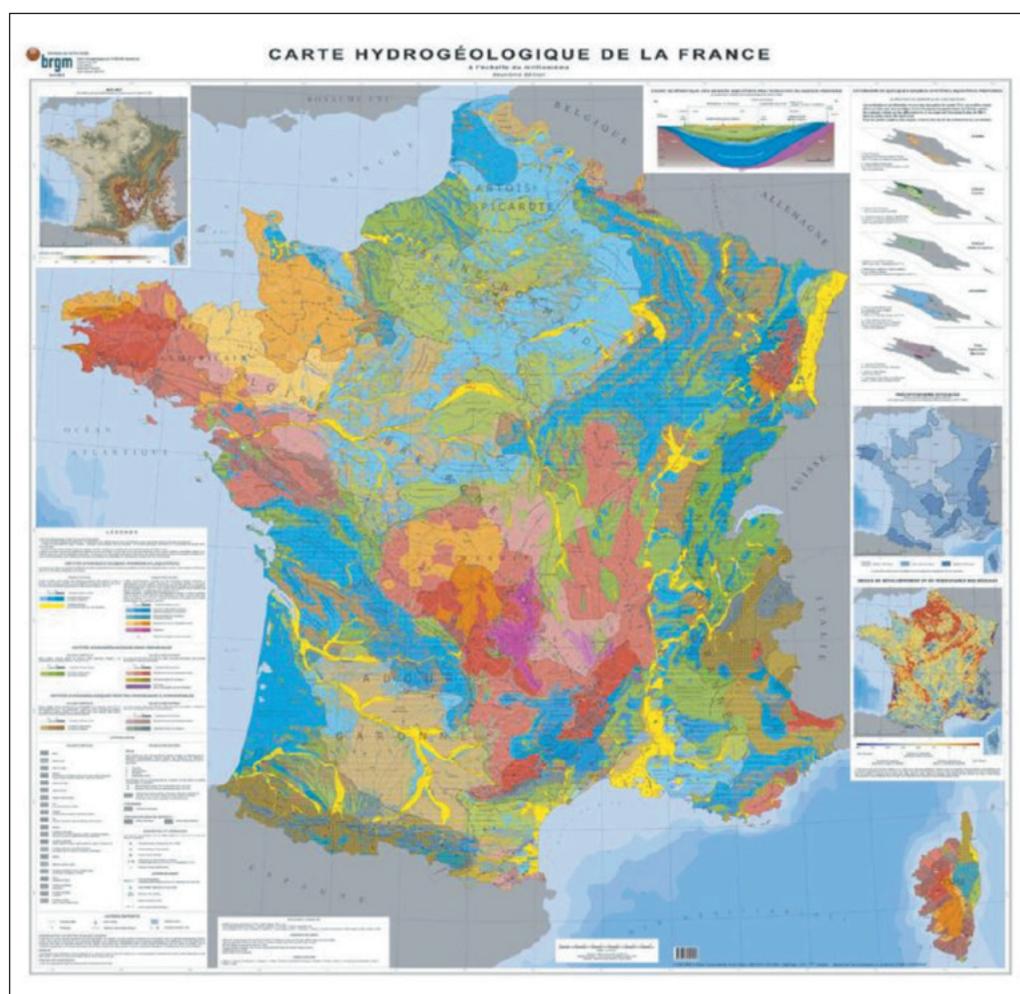


Figure 16

Carte des aquifères en France.

passées qui étaient moins vertueuses en termes de protection de la qualité de nos ressources en eau. Et, pour finir, ne pas oublier non plus que tout ce que l'homme a épandu ou déversé à la surface du sol, y compris ce qui y est venu *via* l'atmosphère, peut se retrouver au bout d'un laps de temps plus ou moins important dans les eaux souterraines...



Figure 17

Sources de pollution des eaux souterraines.