

Le cycle de l'eau

Primaire et collège

Résumé

Le cycle de l'eau est aujourd'hui bien compris : évaporation, transport dans l'atmosphère par le vent et les nuages, retombée sous forme de pluie et de neige, écoulement sur les continents et retour aux océans. Nous allons, dans ce qui suit, proposer une description très empirique de la partie continentale du cycle de l'eau, en imaginant des expériences simples qui permettent de « montrer » les écoulements, ainsi que certains aspects de la pollution des nappes. Enfin, nous répondrons à quelques questions plus générales sur l'origine de l'eau sur Terre, la salinité de la mer, le rôle de l'effet de serre sur le cycle de l'eau...

le cycle de l'eau

Ghislain de Marsily

Introduction

Le cycle de l'eau est aujourd'hui bien compris : évaporation, tant sur les océans que sur les continents, transport dans l'atmosphère par le vent et les nuages, retombée sous forme de pluie et de neige, écoulement sur les continents et retour aux océans, par l'intermédiaire des rivières et des NAPPES, ainsi que par migration de la glace sur les calottes glaciaires et formation d'icebergs qui fondent lentement en mer. Nous allons, dans ce qui suit, proposer une description très empirique de la partie continentale du cycle de l'eau, en imaginant des expériences simples qui permettent de « montrer » les écoulements, ainsi que certains aspects de la pollution des nappes. Puis nous donnerons quelques chiffres de bilan, à l'échelle globale, afin de quantifier l'importance de ces écoulements. Enfin, nous répondrons à quelques questions plus générales sur l'origine de l'eau sur Terre, la salinité de la mer, le rôle de l'effet de serre sur le cycle de l'eau...

Quelle vision les Anciens avaient-ils du cycle de l'eau ? Ils s'étaient, à ce sujet, posé deux questions : pourquoi les sources coulent-elles quand il ne pleut pas, et comment se fait-il que le niveau des mers ne monte pas, alors que sans cesse les fleuves s'y écoulent ? La réponse donnée par les philosophes grecs

était simple, limpide, et répondait à la fois aux deux questions : l'eau de mer s'infiltré dans les terres le long du rivage, se dirige en profondeur et se dessale au passage, puis remonte vers les sources et s'écoule dans les rivières. Simple, n'est-ce pas ? Il était donc facile de comprendre pourquoi le niveau des mers ne montait pas et pourquoi les sources coulaient : c'était la même eau que l'on voyait passer sans cesse, selon un cycle de l'eau souterrain. Une ombre existait cependant au tableau : d'où venait l'énergie permettant à l'eau de remonter des points bas (la mer) aux points hauts (les sources) ? Les principes de la thermodynamique n'étant pas encore compris, cette question ne choqua personne, et ce... jusqu'au XVIII^e siècle.

À cette époque, le physicien Pierre Perrault établit que le débit de la Seine pouvait facilement être expliqué à partir de la pluie tombée du ciel, sans recourir à l'eau des profondeurs, et Edmund Halley montra que l'évaporation sur la Méditerranée était du même ordre de grandeur que la somme du débit des fleuves qui s'y jettent : inutile là encore d'invoquer une fuite souterraine de l'eau de la mer vers les continents. Le cycle de l'eau par l'atmosphère était donc finalement établi...

Mais reprenons pas à pas les étapes continentales du cycle de l'eau, à partir du

moment où elle tombe du ciel, en tâchant d'illustrer l'enchaînement des maillons successifs de la chaîne tout en passant des phénomènes visibles, à la surface, aux phénomènes cachés, en milieu souterrain.

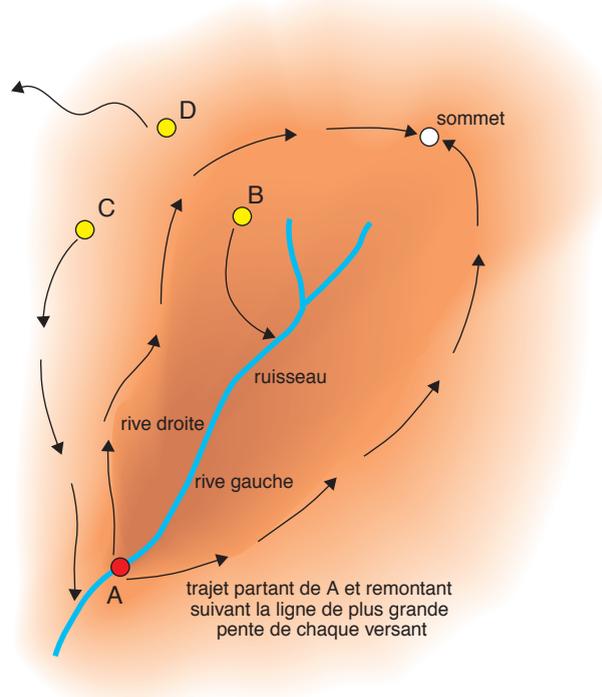
Notre raisonnement se situera à l'échelle du vallon, de la parcelle de terre et du ruisseau, que nous connaissons bien ; et des petites maquettes, faciles à construire, illustreront chacun de ces maillons...

Où va l'eau qui tombe du ciel ?

Tout le monde comprend que, quand il pleut, de l'eau ruisselle sur le sol et se dirige vers les points bas (elle coule dans le sens de la pente) pour finalement arriver à la rivière. Pour le voir, menons une expérience simple : vidons sur le sol, dans un endroit pentu, un arrosoir plein d'eau. Celle-ci ruisselle et coule vers le bas, dans le sens de la pente la plus forte (c'est-à-dire qu'elle ne coule pas en biais, mais parallèle au sens de la pente, comme un skieur qui fait du « schuss », pour descendre le plus vite possible). Aux Treilles, nous avons fait l'expérience au bord d'un

petit ruisseau, que l'eau a fini par rejoindre (lorsqu'on en versait suffisamment). De cette expérience, nous pouvons déduire ce que l'on appelle le BASSIN VERSANT du point de la rivière où nous nous trouvons.

Dans la pratique, on définit le bassin versant d'une rivière entière (par exemple, la Marne) en choisissant comme point A le point de confluence avec la Seine, ou, pour la Seine, le point d'arrivée en mer.



Plaçons-nous au bord du ruisseau, au point A sur la figure ci-dessus, et gravissons la colline, selon la pente la plus forte, dans les traces d'un skieur qui aurait fait du schuss et serait arrivé au point A. Formons plus précisément deux groupes, qui remontent la pente à partir du point A en suivant la ligne de la plus grande pente, l'un sur la rive droite du ruisseau et l'autre sur la rive gauche (en regardant vers l'aval – c'est-à-dire dans la direction vers laquelle l'eau s'écoule –, la rive droite est celle qui correspond à notre côté droit). Les deux équipes montent chacune de leur côté, et se rejoignent sur un sommets, ou sur le bombement d'un plateau, qui correspond au sommets du « bassin versant ».

La région comprise entre les chemins empruntés par les deux équipes, depuis le point de départ A jusqu'au sommets (en plus foncé sur la figure), est appelée bassin versant du ruisseau au point A. Toutes les eaux de pluie reçues par ce bassin versant aboutissent au point A, tandis que les eaux tombées à l'extérieur de cette région ne s'écoulent pas vers A. En effet, comme l'eau coule toujours dans le sens de la plus forte pente, à partir d'un point situé à l'intérieur du bassin versant (le point B, par exemple), l'eau arrive au ruisseau avant A, tandis que, pour un point extérieur au bassin versant (les points C et D, par exemple), elle arrive au ruisseau après A, ou rejoint un autre ruisseau.

Il y a donc autant de bassins versants que de points A choisis le long du ruisseau.

Cette notion de bassin versant est très importante en hydrologie : pour connaître le débit qui risque de s'écouler en un point donné d'une rivière – si cette dernière est en crue, par exemple – afin de prévoir les dimensions d'un pont ou une digue, il faut connaître la surface du bassin versant en ce point, estimer l'intensité maximale, en mm/h, d'une pluie extrême, rare, qui ne se produit, par exemple, qu'une fois en dix ans ou même en cent ans (à partir des chroniques de pluie de la région), et estimer le coefficient de RUISSELLEMENT de cette pluie (voir page suivante). Le produit de cette intensité de la pluie par le coefficient de ruissellement et par la surface du bassin versant indiquera le débit probable au point choisi. Pour savoir quel volume de retenue donner à un barrage afin de se protéger des crues, ou pour stocker de l'eau en hiver destinée à l'irrigation en été, il faut connaître la quantité d'eau susceptible de s'écouler vers le barrage, également obtenue en multipliant

la surface du bassin versant par la hauteur de pluie qui peut ruisseler, pour un orage donné (afin de stocker la crue correspondante), ou pendant une saison donnée (pour stocker l'eau d'irrigation correspondante).

Comment mesurer le débit d'une rivière ?

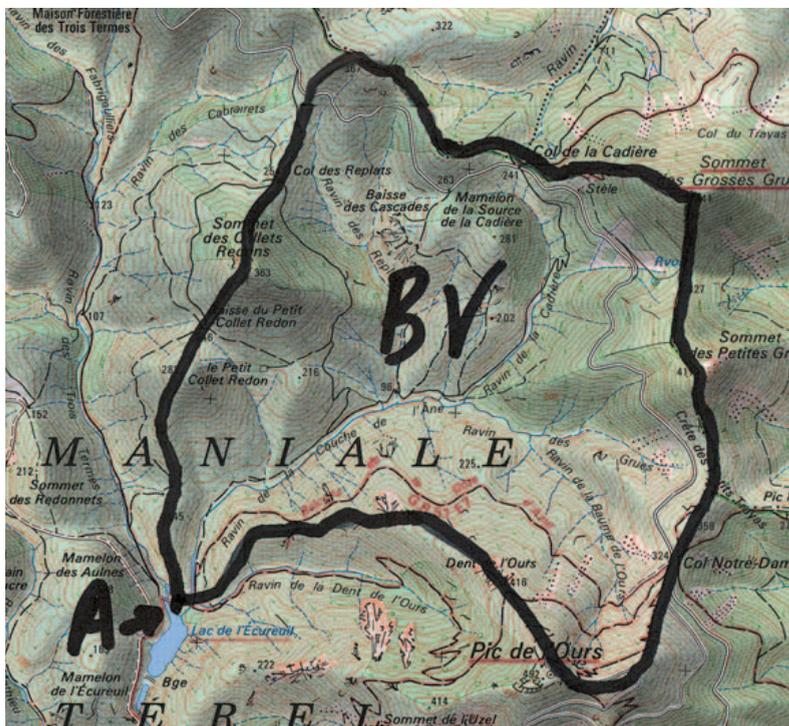
Dans la pratique, les hydrologues font des mesures de la vitesse réelle de l'eau en plusieurs points de la section de la rivière (des sous-sections), avec un « micromoulinet », une petite hélice de métal plongée dans l'eau, qui tourne plus vite quand le courant est plus fort. On compte simplement, avec un compteur, le nombre de tours de l'hélice en une minute. Une table convertit le nombre de tours en vitesse de l'eau. Le débit de la rivière est ensuite calculé en multipliant la vitesse mesurée en chaque point par la sous-section de la rivière correspondant à ce point, puis en faisant la somme de ces

débâts par sous-section. Cette opération s'appelle un « jaugeage de la rivière ».

Les hydrologues posent aussi des ÉCHELLES (que l'on appelle LIMNIMÉTRIQUES) graduées dans les rivières, souvent sur la pile d'un

Pour dessiner le bassin versant d'une rivière ou d'un ruisseau, plutôt que de le faire « avec les pieds » sur le terrain, on utilise une carte topographique IGN, par exemple au 1/50 000, et on dessine le bassin en partant toujours du point A choisi sur la rivière, puis en remontant vers l'amont, le trait de crayon étant toujours perpendiculaire aux lignes de niveau. La carte ci-contre représente un bassin versant aboutissant au lac de l'Écureuil, dans le massif de l'Estérel.

© IGN-Paris 2001, autorisation n°80-1056, extrait de carte IGN 1/25000 n°3644 O.





- Pour mesurer approximativement le débit d'un ruisseau ou d'une rivière, nous jetons dans l'eau un petit flotteur (morceau de papier, feuille, bâtonnet...). Nous avons au préalable installé deux repères, en tendant deux cordes à travers le ruisseau, séparées par exemple de 1 m, de 10 m ou de 100 m. Nous mesurons au chronomètre le temps mis par le flotteur pour franchir la distance qui sépare nos repères. Disons qu'il a mis sept secondes pour faire 1 m. On répète plusieurs fois la mesure pour confirmation. La vitesse de l'eau, en surface du ruisseau, est donc de 1 m en sept secondes, soit 0,143 m/s.
- Pour obtenir le débit, il faut mesurer la section à travers laquelle se produit l'écoulement, c'est-à-dire la largeur du ruisseau (disons 0,60 m) et la profondeur moyenne de la lame d'eau (disons 0,20 m). La section est donc de 0,12 m², et le débit de $0,143 \times 0,12 = 0,017$ m³/s, soit encore 17 litres par seconde. C'est évidemment peu précis, car la vitesse de l'eau varie dans le lit du ruisseau (elle est plus faible aux bords et au fond), mais cela donne un ordre de grandeur. On prend souvent les deux tiers de la valeur ainsi trouvée, pour tenir compte de ces différences de vitesse ; ici, on trouverait alors 11 litres par seconde.

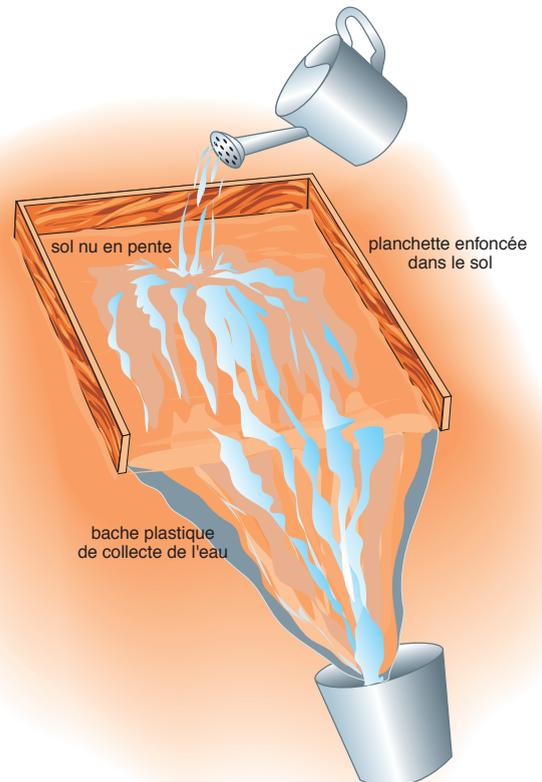
pont, et mesurent périodiquement la hauteur de l'eau sur l'échelle. Cette mesure est aujourd'hui le plus souvent faite sur un enregistreur automatique, qui utilise un flotteur ou un capteur de pression. Plus la hauteur d'eau dans la rivière est importante, plus le débit est grand.

Ceci est facile à comprendre : si la hauteur d'eau augmente, la section d'écoulement aussi ; de plus, en général, la largeur de la rivière augmente, ce qui augmente encore la section (sauf si les berges sont verticales) ; enfin, en général aussi, la vitesse de l'eau est plus forte s'il y a plus d'eau dans la rivière.

Les hydrologues ont constaté que le débit d'une rivière est à peu près toujours le même, pour une hauteur d'eau donnée : quand on mesure la hauteur d'eau à l'échelle, on la convertit donc en débit grâce à une *courbe de tarage*, qui indique le débit pour une hauteur d'eau donnée. Cette courbe de tarage est établie à partir de jaugeages réalisés au micromoulinet, sur toute la section de la rivière, depuis le fond jusqu'au niveau de l'eau au jour de la mesure. De telles mesures sont faites à plusieurs jours d'intervalle, pour différentes hauteurs d'eau dans la rivière.

Il faut regarder cependant si la section est modifiée par la crue, par exemple si

des branchages sont venus s'y coincer, ou si des érosions très importantes ont approfondi le lit de la rivière... Dans ce cas, la courbe de tarage doit être entièrement refaite, car la relation hauteur-débit établie avant la modification de la section n'est plus valable.



Est-ce que toute l'eau tombée ruisselle ?



Pour étudier cette question, nous construisons sur un sol nu pentu un carré de 1 m de côté, délimité sur trois côtés par des planchettes enfoncées dans le sol. Le quatrième côté, qui se trouve vers l'aval, est équipé d'une paroi en plastique (un sac poubelle découpé) dont le bord amont est un peu enterré (comme sur la figure ci-contre) et le bord aval replié pour former un entonnoir, qui va nous permettre de récupérer l'eau qui ruisselle dans un seau. Nous versons un grand arrosoir de 10 litres sur le sol, en prenant soin de n'arroser que l'intérieur du carré. Au début, si le sol est sec, on voit bien que la terre « boit » une partie de l'eau. Ensuite, cette dernière se met à ruisseler, et on la récupère dans le seau. Aux Treilles, nous avons récupéré moins de 5 litres, sur les 10 litres versés. Une partie de l'eau s'infiltré donc dans le sol. On appelle « coefficient de ruissellement » la fraction de l'eau de pluie qui ruisselle (ici, ce coefficient serait de 50 %). Nous mesurons ensuite la vitesse d'INFILTRATION de l'eau dans le sol. Pour ce faire, nous prenons une boîte de conserve d'une contenance de 1 l, ouverte à ses deux bouts, que nous enfonçons dans le sol, sur un centimètre. Puis nous la remplissons d'eau. Nous remarquons que l'eau descend dans la boîte, parce qu'elle s'infiltré dans le sol. On mesure la vitesse de descente en millimètres par heure, par exemple. Si l'on poursuit l'expérience un long moment, en versant périodiquement de l'eau dans la boîte, on voit que la vitesse de descente diminue avec le temps : un sol bien sec au départ « boit » plus vite qu'un sol déjà humide. Mais cette vitesse ne devient jamais nulle, elle atteint au bout de quelque temps une vitesse constante. Suivant la nature du sol, cette vitesse peut être de 10, 100 ou 1 000 mm/h.

Parfois, l'eau ne ruisselle jamais



Prenons une autre boîte de conserve, cette fois ouverte seulement en haut. Mettons-la dehors quand il pleut. Il s'agit d'un PLUVIOMÈTRE rudimentaire, pour mesurer la pluie. Nous mesurons la vitesse de montée de l'eau dans la boîte, en millimètres par heure. L'eau monte, par exemple, de 10 mm en une heure. Si, dans la boîte sans fond enfoncée dans le sol, nous avons observé qu'il pouvait s'infiltrer par exemple 100 mm en une heure, alors il est clair qu'il ne pleut pas assez vite pour que l'eau puisse ruisseler. Toute l'eau de pluie s'infiltré donc dans le sol, et le coefficient de ruissellement est nul. On peut le vérifier, avec la boîte sans fond qui est restée enfoncée dans le sol : on ne voit pas d'eau s'y accumuler, bien qu'il pleuve.

C'est donc l'intensité de la pluie (nombre de millimètres de pluie par heure), comparée à la capacité d'infiltration du sol (nombre de millimètres d'infiltration possible par heure), qui va déterminer la présence ou non de ruissellement. Ainsi, si le sol est très sableux,

comme dans la forêt de Fontainebleau, la pluie ne ruisselle jamais ; au contraire, quand le sol est argileux, comme dans le Gers, la vitesse d'infiltration est très faible, et la moindre pluie se met à ruisseler.

Que devient l'eau qui s'est infiltrée ?



Nous prélevons un fragment du sol, à l'endroit où nous avons fait l'expérience de ruissellement et d'infiltration. Nous le séchons dans le four de la cuisine, pendant deux ou trois heures, à four pas trop chaud (on choisit conventionnellement une température de 105 °C pour ne pas détruire la matière organique ou même déstabiliser les argiles, ce qui modifierait les propriétés du sol). Nous mettons le sol sec dans un petit moule à gâteau en aluminium, doublé d'un petit morceau de chiffon ou de papier filtre. Au préalable, nous avons percé des trous avec un couteau pointu dans le fond du moule. Nous pesons le moule avec son sol sec sur une balance, puis nous versons sur le sol sec un volume connu d'eau, par exemple 50 cl, mesuré à l'aide d'un verre gradué emprunté à la cuisine. Une partie de l'eau versée (si l'on en a versé assez) traverse le sol et ressort par les

- trous faits dans le moule. Nous récupérons cette eau dans un verre, puis mesurons le volume d'eau recueilli avec le verre gradué. Nous constatons que nous avons recueilli moins d'eau que nous n'en avons versé (par exemple 30 cl récupérés pour 50 cl versés). C'est le sol qui a gardé le reste, comme une éponge.
- Pour le vérifier, nous pesons le sol humide, quand toute l'eau qui veut bien sortir s'est égouttée. Sachant qu'un centilitre d'eau pèse 10 g, on doit trouver que le sol humide pèse plus lourd que le sol sec (200 g de plus, dans cet exemple, pour une différence de 20 cl).
- Versons à nouveau de l'eau sur notre sol humide. Cette fois, nous constatons que toute l'eau versée traverse le sol et se retrouve dans le verre. Le « sol-éponge », une fois mouillé, ne retient pas davantage d'eau.
- Avec cette expérience, nous avons montré deux choses : que le sol retient de l'eau lorsqu'il est sec, mais qu'il la laisse passer plus bas quand il est déjà mouillé.

Pourquoi le sol se dessèche-t-il ?



- Que devient l'eau du sol mouillé ? Pour le savoir, posons par terre le petit moule contenant le sol mouillé, à l'extérieur, par beau temps. Protégeons-le seulement à l'aide d'un grillage (un tamis de cuisine retourné) pour éviter qu'oiseaux ou fourmis nous cherchent noise. Tous les matins, nous pesons le moule. Le poids diminue tous les jours, à moins qu'il n'ait plu. S'il fait beau et chaud pendant longtemps, nous revieñdrions au poids initial du sol sec (pas tout à fait cependant, car le four à 105 °C dessèche plus efficacement que l'évaporation par l'atmosphère).

L'air sec quand il ne pleut pas, le vent, et la chaleur apportée par les rayons du soleil dessèchent donc le sol.



- On peut comparer deux petits moules remplis de sols mouillés identiques, et constater que si l'un est gardé dehors à l'ombre, et l'autre au soleil, celui qui est au soleil se dessèche plus vite. Mais cette expérience ne suffit pas.
- Nous allons préparer trois moules à gâteau en aluminium, tous identiques. L'un contient le sol mouillé, comme décrit ci-dessus, les deux autres sont dépourvus de trous au fond. Dans le second, nous mettons seulement un poids connu d'eau ; le troisième contient une culture de lentilles, que nous avons fait germer quelques jours avant, sur une bonne épaisseur de coton, qui joue le rôle d'éponge. Ce troisième moule est aussi pesé, avec le coton bien humide. Tous les jours, nous pesons les trois moules. Nous constaterons que les deux moules contenant l'eau seule et les lentilles perdent du poids à peu près à la même vitesse, tandis que le moule qui contient le sol en perd moins vite.

L'eau s'évapore donc : directement quand elle est à la surface, comme dans une flaque qui reste après la pluie ; directement, à partir du sol nu mouillé, sur toute l'épaisseur du sol et pas seulement à la surface ; par l'intermédiaire de la végétation, qui « pompe » l'eau du sol par ses racines, comme les lentilles ont pompé l'eau du coton. Ce « pompage » de l'eau du sol par la végétation est fonction de la profondeur atteinte par les racines : du blé qui vient de germer a des racines d'un centimètre, mais qui atteignent un mètre quand il est bien développé ; certains arbres

peuvent envoyer des racines à dix mètres de profondeur, voire plus.

On appelle ÉVAPOTRANSPIRATION l'extraction de l'eau du sol par les effets cumulés de l'évaporation directe et de la transpiration par les feuilles de la végétation, qui extrait l'eau du sol grâce à ses racines.

Une très grande partie de l'eau qui s'est infiltrée dans le sol pendant la pluie est donc stockée temporairement dans le sol superficiel (en pratique, dans le premier mètre du sol sous la surface) et s'évapore ou sert à alimenter en eau la végétation.

Toute l'eau infiltrée dans le sol ne s'évapore pas, elle sert aussi à alimenter la « nappe »

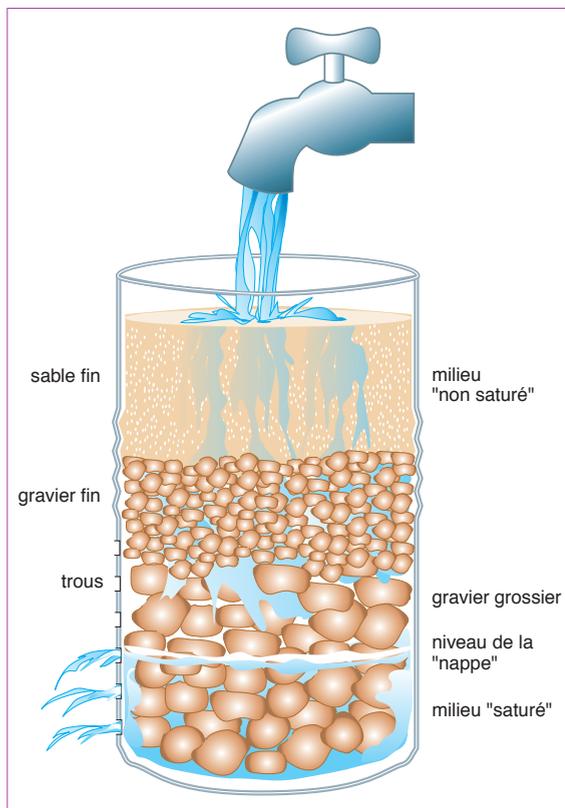


Si la pluie survient en saison chaude, en pratique entre avril et septembre, toute l'eau tombée se stocke dans le sol superficiel et retourne vers l'atmosphère par évapotranspiration. En revanche, entre octobre et mars, la température de l'air est plus faible, l'air est plus humide, le soleil chauffe moins et la végétation se met en dormance : elle a moins besoin d'eau. Le sol se charge alors de plus en plus d'eau, au fur et à mesure qu'il pleut. Nous avons vu que le sol, quand il s'est mouillé suffisamment, laisse passer l'eau. De proche en proche, l'eau descend donc, et s'infiltré plus profondément. On considère que quand elle a atteint quelques mètres, elle est – en l'absence d'une végétation à racines très profondes – « protégée » de la reprise par l'évapotranspiration.

Comment comprendre ce qui arrive alors à l'eau en profondeur ? Pour le voir, prenons une bouteille d'eau minérale transparente, dont nous coupons le goulot pour obtenir un cylindre vertical. Perçons une série de trous pas trop gros (plus petits que le diamètre d'une cigarette), disposés verticalement tous les centimètres à partir de la base de la bouteille, sur le côté (figure page suivante). Remplissons la bouteille avec des graviers et du sable : au fond, des graviers (d'un centimètre de diamètre environ, sur une hauteur de 12 cm), puis des graviers plus fins (d'un calibre de 5 mm, sur une hauteur de 5 cm), puis du sable fin (de 1 ou 2 mm de diamètre environ, jusqu'à 5 cm au-dessous du sommet de la bouteille). Versons lentement de l'eau sur le sable, de façon continue. Cette eau s'infiltré. Au bout d'un moment, nous voyons de l'eau dégouliner sur les graviers de la base de la bouteille, puis s'accumuler au fond. Le niveau d'eau monte lentement dans le gravier, puis il atteint le premier trou à 1 cm au-dessus du fond, et s'écoule latéralement. Plus le débit d'alimentation est fort, plus le niveau d'eau monte, et plus est grand le nombre de trous par lesquels l'eau s'écoule.

Nous venons de former une *nappe phréatique*. Le fond de la bouteille figure une couche dure, imperméable, faite de matériaux qui ne laissent pas passer l'eau, située en profondeur sous des matériaux perméables. Une telle couche peut se trouver à 10, 100 m ou parfois davantage sous la surface du sol. Le gravier grossier dans lequel on voit s'accumuler l'eau, c'est la nappe, encore appelée AQUIFÈRE. La surface de l'eau dans le gravier, à quelques centimètres au-dessus du fond, et en dessous de laquelle l'eau s'écoule à travers les trous, c'est la *surface libre* de la nappe. C'est à cette profondeur, si on faisait un puits ou un forage, que l'on rencontrerait l'eau dans la nappe. Le plus souvent, en climat tempéré, cette surface libre est située entre 1 et 10 m sous la surface du sol, parfois (sous les plateaux) jusqu'à 50 m. Nous avons disposé du gravier grossier dans la bouteille, à cette profondeur, uniquement dans le but de « voir » cette

surface de l'eau. Dans la nature, les roches en profondeur ne sont pas nécessairement constituées de graviers grossiers, mais cela ne change rien : l'eau s'accumule toujours à la base, sur une certaine épaisseur, dans la porosité de la roche, c'est-à-dire dans les trous entre les grains, ou dans les fissures. Le terme de *nappe phréatique* vient du grec *phreatos*, qui veut dire puits, et signifie simplement que cette nappe est la première que l'on rencontre sous la surface du sol. Nous verrons plus loin qu'il peut exister d'autres nappes, en profondeur, que nous appellerons NAPPES CAPTIVES ou parfois NAPPES ARTÉSIENNES. La nappe phréatique est aussi appelée *nappe libre*. Dans la partie du sable ou du gravier qui surmonte la surface libre (c'est-à-dire la surface de l'eau dans la bouteille), l'eau circule verticalement. La meilleure preuve en est que tous les trous que nous avons faits dans la bouteille, au-dessus



de la surface libre, ne coulent pas : seuls les premiers trous, en dessous de la surface libre, laissent s'écouler l'eau horizontalement.

On appelle *milieu non saturé* la portion du terrain entre la surface du sol et la surface libre, où l'eau circule essentiellement verticalement, et *milieu saturé* la portion sous la surface libre, où l'eau s'écoule surtout horizontalement. Dans le milieu non saturé coexistent de l'eau et de l'air, que l'on peut voir à travers la paroi de la bouteille. Dans le milieu saturé, il n'y a que de l'eau, c'est d'ailleurs pourquoi on l'appelle ainsi : il est saturé en eau car celle-ci remplit tous les pores.

Le niveau de la surface libre d'une nappe varie au cours de l'année. Il monte en période d'infiltration : l'écoulement horizontal est alors plus important ; il diminue en été : l'écoulement horizontal se tarit alors lentement.

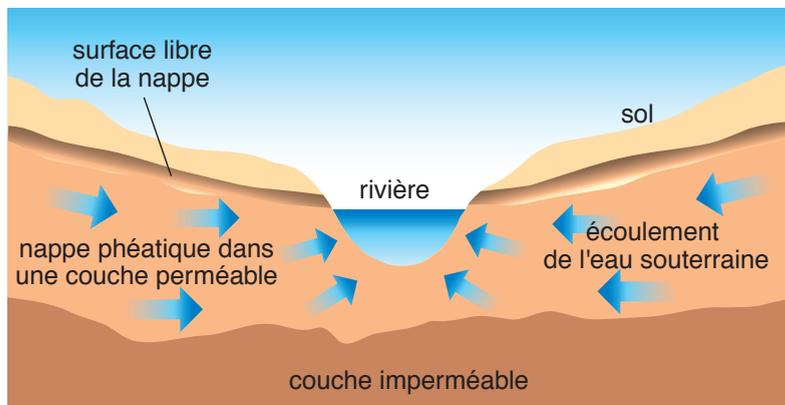
Où va l'eau de la nappe ?

L'eau de la nappe se dirige vers les points bas de la topographie, c'est-à-dire les rivières. Elle « sourd » parfois en des points précis, faisant naître alors des sources ; ailleurs, elle suinte simplement le long des berges des ruisseaux et rivières, et remonte, de façon cachée, par leurs fonds. C'est cet apport constant d'eau par la nappe qui fait que le débit des ruisseaux augmente régulièrement de l'amont vers l'aval, et aussi que les rivières coulent quand il ne pleut pas. Dans les pays tempérés, l'altitude de la surface libre de la nappe est toujours plus élevée que celle de la cote de l'eau dans la rivière (il en va autrement dans les pays arides).

L'eau de la nappe phréatique s'écoule toujours dans le sens de la pente de sa surface libre, comme sur la figure ci-contre, de la même façon que l'eau d'une rivière s'écoule toujours dans le sens de la pente de sa surface, indépendamment de la morphologie de son fond. Sous le bassin versant d'une rivière, que nous avons délimité plus haut, il existe donc un second bassin versant, souterrain, constitué par la surface libre de la nappe, qui possède elle aussi une pente dirigée vers la rivière. En général, les deux bassins versants, superficiel et souterrain, sont à peu près superposés. Quand on arrive à la limite de bassin, les eaux souterraines, comme les eaux de surface, s'écoulent vers d'autres rivières ou exutoires.

Existe-t-il d'autres nappes ?

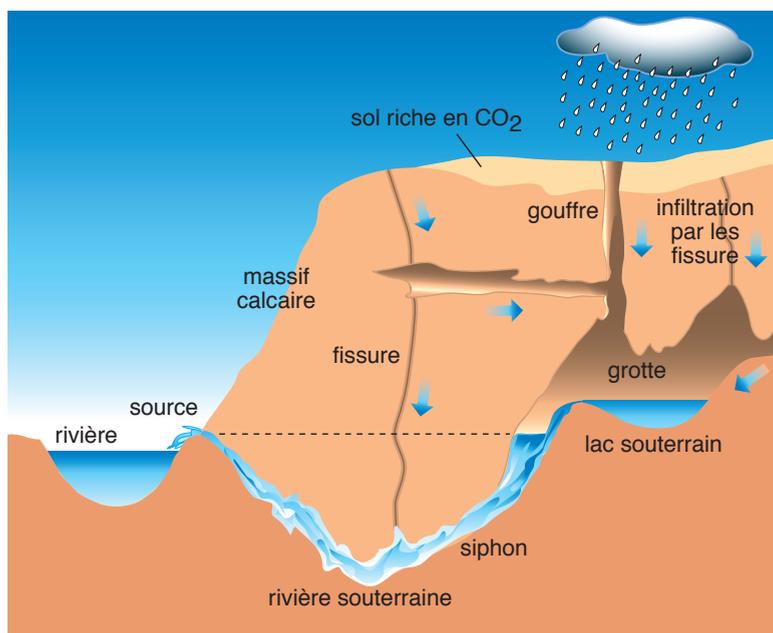
Oui, il existe d'autres types d'écoulements souterrains. Les plus familiers sont les écoulements « karstiques », que l'on rencontre dans les terrains calcaires. Le mot KARST vient de Serbie, où ce genre d'écoulement pullule en raison de la présence d'une grande



quantité de roches calcaires. La circulation karstique est plus compliquée que celle que l'on rencontre dans les terrains plus sableux ou gréseux. En effet, le calcaire a la propriété de se dissoudre lentement dans l'eau, qui s'est chargée en gaz carbonique (CO_2) lors de son passage dans l'atmosphère, et plus encore lors de son passage dans la frange superficielle des sols, à l'endroit où se développent les racines (l'air y est riche en CO_2 du fait de la dégradation microbienne de la matière organique naturelle des sols – les résidus de la végétation). Cette eau, rendue légèrement acide par la dissolution du CO_2 , s'écoule dans les roches calcaires présentes sous le sol ; ces roches, qui en général sont dures, sont fréquemment fissurées du fait des déformations tectoniques de l'écorce terrestre. L'eau circule de préférence dans ces fissures, et, par dissolution, les élargit. On aboutit, au terme de quelques milliers (ou millions) d'années, à la formation de vides très importants (mesurant parfois de un mètre à plusieurs dizaines de mètres) qui prennent la forme de conduits, créent des « rivières souterraines » ou des grottes immenses, hérissées de

stalactites et de stalagmites. Les spéléologues parviennent parfois à s'introduire dans ces conduits, dont certains débouchent en surface (gouffres, avens), ou y pénètrent en plongeant dans les sources. L'eau coule dans ces systèmes karstiques : d'abord verticalement,

empruntant un réseau de fines fissures pas encore élargies, un peu comme dans les sables de la bouteille de notre expérience. Lorsqu'elle aboutit dans un conduit élargi, l'eau y circule comme dans une rivière (souterraine), empruntant parfois des siphons (ci-dessous). Il est très difficile de trouver de l'eau dans ces systèmes karstiques en faisant des forages, car si l'on implante un forage au hasard, il est fort probable que ce dernier ne rencontre aucun conduit dans lequel l'eau circule, et soit donc « sec ». Cette vision des écoulements souterrains sous forme de conduits karstiques est très répandue



dans le public, mais ne correspond pas à la majorité des cas : le plus souvent, dans les pays non calcaires, on rencontre des nappes phréatiques continues, présentes partout sous le sol, dans les petits interstices entre les grains de sable ou dans des fissures fines,

qui ne sont pas élargies par la dissolution, comme c'est le cas dans les pays granitiques. En France, les principaux karsts se trouvent dans les plateaux calcaires des Causses, du Jura, le long de la Côte d'Azur, dans le Nord, dans la région de Caen, dans les Pyrénées...



Nous allons fabriquer ensemble un petit système karstique. Nous prenons des glaçons en forme de cubes, que nous posons côte à côte, « à touche-touche », sur une plaque de bois plane et en pente, d'où l'eau peut s'écouler. Quelques clous empêchent les glaçons de glisser. Au bout d'un moment, les glaçons se collent plus ou moins les uns contre les autres, formant un « massif rocheux » rigide, mais il reste des « fissures » entre les glaçons, car ils n'adhèrent pas parfaitement les uns aux autres. Nous versons sur le « massif » de l'eau très chaude : elle s'infiltré dans les « fissures » et les élargit par fonte (fusion) de la glace. Plus la fonte est importante, plus l'eau chaude peut s'infiltrer dans la fissure, et plus la fonte s'accélère, formant des fissures très larges. Sous les glaçons, l'eau qui s'est infiltrée s'écoule sur la plaque en bois et crée des vides et conduits dans la glace au contact de la plaque, par lesquels l'eau s'écoule latéralement... C'est un petit karst !

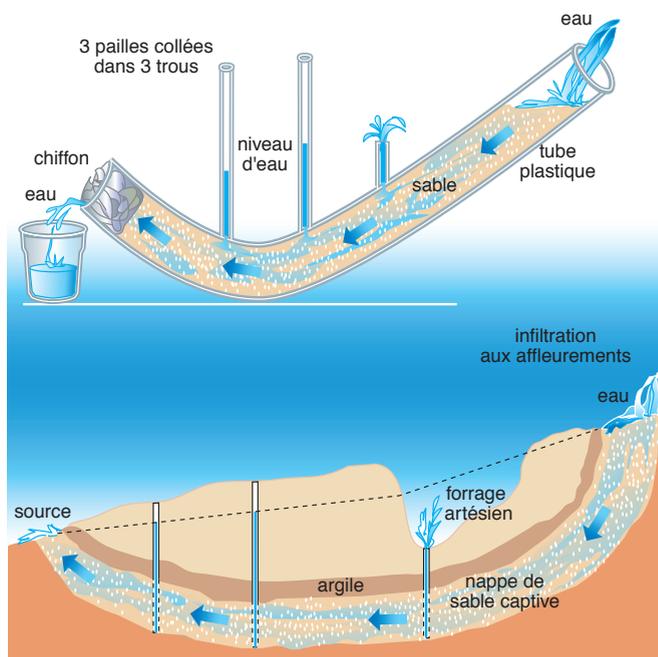
Attention, la manipulation n'est pas très facile : l'eau ne doit pas s'accumuler sur la plaque, car la glace flotterait et fondrait de tous côtés ; il ne faut pas prendre une plaque en métal, qui s'échaufferait et ferait aussi fondre la glace sur toute sa base. Il faut enfin examiner le résultat très rapidement, avant que tout ne soit fondu !

On peut aussi vérifier que l'eau chargée en CO_2 dissout le calcaire. On prend un petit morceau de calcaire, par exemple un coquillage si on n'a pas de calcaire sous la main (je pense à la Bretagne, dont les sols ne sont pas calcaires), que l'on met dans un verre d'eau Perrier (qui est très gazeuse, riche en CO_2). Le calcaire est attaqué. Il ne se dissout pas instantanément, mais la surface du coquillage, si elle était brillante, devient mate.

Il existe aussi en profondeur d'autres nappes, dites *captives*. Nous allons en construire une ensemble.



Nous nous procurons un tube en plastique transparent et souple, de 1 m de long, de diamètre le plus gros possible, 5 cm seraient très bien, mais on trouve le plus couramment 1 ou 2 cm. Nous remplissons le tube de sable fin. Nous mettons du côté aval un bouchon fait de tissu, qui retient le sable mais laisse passer l'eau. Puis nous perçons trois petits trous verticaux alignés et espacés dans le tube et nous y enfonçons (ou collons) trois pailles verticales transparentes (figure ci-contre). Le gros tube est légèrement courbé pour prendre vaguement une forme de siphon. Nous versons de l'eau en continu avec un entonnoir par l'extrémité la plus haute du tube, ou avec un petit tuyau d'arrivée d'eau, et laissons cette eau traverser le tube puis ressortir



à l'autre extrémité – celle qui porte le bouchon en tissu –, que nous maintenons un peu plus basse. Ce tube simule une couche de sable qui affleure à l'amont, s'enfonce au centre dans une forme synclinale, puis remonte vers l'aval. Aux affleurements amont, l'eau versée dans l'entonnoir représente l'infiltration de la pluie, comme dans une nappe phréatique ; mais celle-ci s'écoule dans ce cas vers la profondeur, à cause de la géométrie de la couche de sable, et non parallèlement à la surface. La couche de sable, en profondeur, doit être recouverte par une couche imperméable, une roche en général argileuse, qui forme un écran et empêche l'eau emprisonnée dans la nappe de remonter vers la surface. C'est la paroi supérieure du tuyau qui joue ici ce rôle. Si nous regardons maintenant le niveau de l'eau dans les trois pailles que nous avons collées sur le tube, et qui représentent des forages, nous remarquons que ce niveau est plus haut que la paroi du tube plein de sable : l'eau « remonte » dans les forages par un effet de siphon, à cause de la pression exercée dans le milieu par l'eau qui s'infiltré à l'amont. Le niveau n'est cependant pas le même dans les trois pailles, la paille la plus proche de l'amont ayant un niveau plus élevé que celle qui est proche de l'aval. Ceci s'explique simplement : les forces de frottement de l'eau contre les grains de sable « consomment » l'énergie de pesanteur apportée par l'altitude de la zone dans laquelle s'infiltré l'eau de pluie. Quand on arrive à l'exutoire (le bouchon de chiffon), toute cette énergie a été consommée, et le niveau de l'eau dans une paille y serait égal à la cote de l'exutoire. Si nous coupons l'une des pailles à mi-hauteur, par exemple, nous remarquons que l'eau coule par la paille et « jaillit ». Le forage représenté par cette paille est dit *artésien* ou *jaillissant*.

Sur le terrain, le sommet de la paille coupée représente la surface du terrain : ainsi, quand celle-ci est basse (dans une vallée, par exemple), les forages qui atteignent la couche de sable coulent d'eux-mêmes, sans qu'il soit nécessaire de pomper.

Il existe de nombreuses nappes captives en France, principalement dans les grands bassins sédimentaires (Bassin parisien, Bassin aquitain, bassin du Sud-Est, région Nord...). Certaines nappes sont superposées, et séparées par des couches imperméables, comme l'aquifère captif du Trias gréseux à la base du bassin de Paris, surmonté par les argiles du Lias, puis par l'aquifère captif calcaire du Dogger, etc., puis par les sables captifs de l'Albien, surmontés par les argiles du Gault, et enfin par la nappe de la Craie, nappe libre dont la base est constituée des mêmes argiles du Gault. La forme de ces nappes captives est souvent de type synclinal, mais pas toujours : il suffit que la couche

s'enfonce en profondeur pour devenir captive aussitôt qu'une couche imperméable la surmonte. Si la couche captive ne remonte pas vers la surface, à l'inverse de ce qui est dessiné sur la figure de la page 148, l'eau qu'elle contient peut avoir beaucoup de mal à se frayer un chemin vers la surface, et être presque immobile en profondeur. Dans le Trias du bassin de Paris, par exemple, qui remonte mais n'affleure pas, on estime que les eaux ont un âge de plusieurs millions d'années... Si la couche remonte et affleure vers l'aval, comme sur la figure, l'eau s'écoulera vers les points les plus bas de ces affleurements.

La pollution des nappes

Nous reprenons notre bouteille pleine de graviers et de sable, munie de ses trous au-dessus du fond, par lesquels l'eau s'écoule. Nous la plaçons toute une nuit sous un robinet ouvert d'eau potable, pour bien la laver. Le matin, nous coupons l'eau et nous disposons une bonne couche de sel de cuisine sur le sable, qui représente le sol superficiel (assez pour qu'on ne voie plus le sable). Nous ouvrons l'eau à nouveau.

- Le sel se dissout et pénètre avec l'eau dans les profondeurs de la bouteille. Au bout d'un moment, nous constatons (en la goûtant) que l'eau qui sort de la bouteille est salée. Il faut toutefois veiller à ce que le sable et le gravier placés dans la bouteille soient propres, pour ne pas se rendre malade en goûtant l'eau.
- Dans le doute, on peut les stériliser en versant de l'eau de Javel dans la bouteille, puis en rinçant toute la nuit avec de l'eau potable du robinet, qui éliminera les traces de Javel.

Nous avons ainsi montré que tout produit répandu en surface du sol, comme les engrais, les pesticides utilisés en agriculture, ou les déchets jetés ici et là, est dissous par l'eau, transporté vers le bas, et se retrouve dans la nappe et dans l'eau

des puits. Contrairement aux idées reçues, le sable ne « filtre » pas les polluants... En revanche, il peut filtrer les petites particules en suspension, certaines grosses bactéries, mais pas les virus.



- On peut par exemple faire l'essai en versant dans la bouteille de l'eau « sale », dans laquelle nous aurons déposé de la terre pour qu'elle devienne boueuse, ou prélever directement de l'eau boueuse d'une rivière, s'il y en a une à proximité. On constate que l'eau infiltrée est trouble, mais que l'eau qui sort de la bouteille est, elle, claire. Le sable fin filtre bien les particules en suspension. Si l'expérience n'est pas concluante, c'est que le sable du sommet de la bouteille est trop grossier...

Le bilan hydrologique

Regroupons toutes nos expériences, et décrivons ainsi le cycle continental de l'eau. Nous allons indiquer pour cela des chiffres moyens, valables pour un climat tempéré, comme en France, et d'ailleurs valables aussi, à titre de moyenne, pour le monde entier.

Précipitations sur les continents
(pluie ou neige) : 840 mm/an 100 %

L'unité que nous employons ici, le mm/an, correspond à la hauteur d'eau qui s'accumulerait dans un tube ou un bac, par exemple de 1 m de haut, qui recueillerait la pluie ou la neige, mais ne la laisserait pas s'évaporer. Le diamètre du tube ou du bac importe peu : il s'accumule partout la même hauteur. Si l'on veut convertir cette hauteur en volume d'eau, on multiplie par la surface du tube ou du bac. Si, par exemple, le bac fait 1 m², le volume d'eau accumulé dans le bac serait de $1 \times 0,84 = 0,840 \text{ m}^3$, soit 840 l. Nous allons utiliser cette même unité pour tous les autres termes du bilan, tels l'évaporation, le

ruissellement, l'infiltration, et donner aussi le pourcentage des précipitations.

Évapotranspiration : 540 mm/an 65 %

Ceci signifie que 65 % de l'eau de pluie s'est infiltrée dans le sol, y a été stockée, puis est repartie vers l'atmosphère par dessèchement du sol, des flaques d'eau et prélèvement par les racines et transpiration par la végétation.

Ruissellement : 190 mm/an 23 %

C'est la part de la pluie qui arrive directement dans la rivière quand il pleut, pendant les crues. Ce chiffre est très variable d'une région à l'autre, en fonction de la nature du sol. Si le sol est très perméable, le ruissellement peut être très faible, inférieur à 10 %. En revanche, si le sol est très argileux ou peu absorbant, le ruissellement peut atteindre 40 ou 50 %.

Infiltration dans les nappes et écoulement souterrain : 75 mm/an 9 %

Cette eau souterraine rejoint les rivières, ce qui fait que celles-ci coulent même quand il ne pleut pas ; elle peut aussi s'écouler directement en mer, pour les nappes situées près de la côte. Ce chiffre est aussi très variable en fonction de la nature du sol.

La différence entre l'entrée (la pluie, 100 %) et ces trois sorties ($65 + 23 + 9 = 97$ %) est de 3 %, soit 25 mm/an. Ceci représente, au niveau global, le flux d'eau sous forme de glace, des continents aux océans, par la dérive et la fonte des icebergs.

D'où vient toute cette eau ?

La pluie provient de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique. L'origine de la vapeur d'eau dans l'atmosphère est l'évaporation : celle qui se produit sur les continents, que nous avons chiffrée à 540 mm/an, mais aussi celle qui se produit sur les océans, évaluée à 1 250 mm/an. Mais la majeure partie de l'eau évaporée sur les océans retombe en pluie sur la mer : il pleut en moyenne 1 120 mm/an sur les océans. Si l'on fait le bilan, et compte tenu que la Terre est faite pour un tiers environ de continents et pour deux tiers d'océans, 65 % du volume de la pluie sur les continents a pour origine l'évaporation continentale, et seulement 35 % l'évaporation océanique. Il est donc faux de croire que la pluie provient uniquement de l'évaporation sur la mer... Ces chiffres ne sont cependant exacts qu'en bilan global. En effet, une partie de l'eau évaporée sur les continents retombe en pluie en mer (quand, par exemple, le vent balaye les nuages depuis les continents vers les océans). En revanche, quand le vent apporte les nuages des océans vers les continents, la pluie qui tombe sur le continent proche de la côte provient en fait de l'évaporation sur la mer. Mais le chiffrage exact en est difficile.

On peut ajouter que le temps de séjour moyen de la vapeur d'eau dans l'atmosphère n'est que de neuf jours et demi, il n'y a donc aucun « volant » d'eau stockée dans l'atmosphère, qui pourrait alimenter la pluie si l'évaporation venait à diminuer. Ce phénomène se produit par exemple lors des très grosses explosions volcaniques, qui projettent dans la haute atmosphère des quantités énormes de poussières, ce qui réduit la pénétration des rayons du soleil, et donc diminue l'évaporation. L'éruption du Tambora, en Indonésie, en 1815, aurait envoyé dans l'atmosphère 80 km^3 de poussières, engendrant une « année sans été » et réduisant très fortement les précipitations.

Sur les pôles, les précipitations sont très faibles, mais la glace qui s'accumule finit par retourner à l'océan, en s'écoulant lentement et en fondant.

Le bilan est bouclé : toute l'eau qui ruisselle ou s'écoule dans les nappes sur les continents finit par retourner aux océans. C'est donc toujours la même eau qui circule. Ce n'est que lors des grandes glaciations, comme il y a 100 000 ans, que le bilan n'est pas bouclé : l'eau des précipitations s'accumule sous forme de glace sur les continents, et le niveau des mers descend (jusqu'à moins 120 m) lors de la dernière glaciation dont le maximum s'est produit il y a environ 20 000 ans. Inversement, dans la période chaude actuelle, par effet de serre, l'eau des glaciers polaires est en train de fondre, la mer se dilate et le niveau des mers remonte, il sera de un à deux mètres plus haut dans cent ans...

De façon globale, le temps de séjour de l'eau dans les différents compartiments du cycle est estimé de la façon suivante :

- océans : 3 000 ans,
- nuages dans l'atmosphère : 9,5 jours,

- glaciers : de 2 500 à 200 000 ans,
- eaux souterraines : 1 500 ans,
- humidité des sols : 1,8 ans,
- lacs d'eau douce : 30 ans,
- rivières : 17 jours,
- eau des cellules vivantes : quelques heures.

Et pour aller plus loin, quelques questions d'enseignants

À quel moment les nappes phréatiques se remplissent-elles ?

L'eau de pluie s'infiltré en profondeur en hiver (octobre à mars), quand il pleut et que l'évaporation est faible. Mais l'eau qui s'infiltré dans le sol peut mettre longtemps à arriver jusqu'à la nappe, si celle-ci est profonde : environ six mois pour une nappe dont la surface libre est à 50 m sous le sol, par exemple. Si la nappe est à quelques mètres sous le sol, l'eau y arrive plus vite, en une à plusieurs semaines...

Quelle est l'influence de la fonte des neiges sur l'infiltration ?

Les précipitations qui tombent sous forme de neige restent sur le sol tant qu'il fait froid. Quand la température se radoucit, la neige fond et se sublime également (c'est-à-dire qu'elle passe directement de l'état solide à l'état de vapeur). L'eau fondue s'infiltré dans le sol, s'il n'est pas gelé, et ruisselle également. Si la fonte de la neige est lente et si le sol est bien perméable, l'infiltration est favorisée et le ruissellement limité. Les nappes sont alors bien rechargées.

D'où vient l'eau sur Terre ?

La Terre s'est formée par l'agglomération de poussières interstellaires, qui se sont assemblées en nuage froid autour du Soleil lors de la formation de celui-ci, par attraction gravitationnelle. Ces poussières, dont certaines contenaient déjà de l'eau, se sont d'abord regroupées en petits objets appelés *planétésimaux*, d'un kilomètre de rayon environ. Ces planétésimaux, en se percutant les uns les autres pour s'assembler en planètes, se sont échauffés grâce à l'énergie cinétique produite par la collision et ont amené les planètes formées à fondre. Cette fusion a entraîné une différenciation de la matière dans les planètes : sur la Terre, le fer et le nickel fondus se sont accumulés au centre, tandis que les éléments plus légers comme les roches et l'eau s'accumulaient à la surface. On pense cependant qu'il reste, dans le manteau de la Terre, c'est-à-dire entre 70 et 2 900 km de profondeur, un volume d'eau de l'ordre de 0,3 % en poids des roches (en semi-fusion) qui le constituent. Ce volume d'eau, qui est du même ordre que le volume contenu dans tous les océans du monde, est totalement inexploitable...

On pense aussi que l'eau sur Terre a une seconde origine : une fois la Terre formée, elle aurait été bombardée à la fois par des comètes, venues de la ceinture située au-delà de Pluton, faites pour l'essentiel de glace, et par des météorites ferreuses contenant un peu d'eau. Une grande partie de l'eau actuellement connue sur Terre pourrait venir de ces comètes et météorites, dont le rythme de percussion avec la Terre s'est maintenant ralenti. Notons qu'une telle comète est tombée en 1994 sur Jupiter (la comète Shoemaker-Lévy, du nom de ses découvreurs) et qu'une autre a pu tomber sur Terre, en Sibérie, en 1909...

D'où vient le sel de la mer ? La salinité de la mer a-t-elle augmenté au cours des temps géologiques ?

C'est une question difficile, encore imparfaitement comprise. Le sel proviendrait simplement de la dissolution des sels contenus dans les roches sur lesquelles l'eau ruisselle ou dans lesquelles

elle s'infiltrer. L'eau étant un puissant solvant, elle dissout toujours quelque chose ; inversement, les chlorures sont des éléments très solubles, ils sont donc dissous très facilement. Pour les roches sédimentaires, la grande majorité d'entre elles se sont formées en milieu marin, il est donc normal qu'elles contiennent du sel de mer. Il faut savoir qu'il existe aussi des roches entièrement faites de sel : on les appelle *évaaporites*. Ces roches se forment par évaporation de l'eau de mer en climat aride, dans des bassins fermés en communication épisodique avec la mer (pour y amener l'eau à évaporer) ou simplement alimentés en eau de rivière peu chargée en sel, mais qui, en s'évaporant, laisse tout son sel sur place. Ces bassins fermés où l'eau s'accumule dans des cuvettes et s'évapore s'appellent *systèmes endoréiques*, ou, en arabe, *Chott* ou *Sebkhas*. Il y a cinq millions d'années, par exemple, le détroit de Gibraltar s'était fermé, la Méditerranée s'est asséchée, et l'eau de tous les fleuves qui s'y écoulait s'est évaporée au fond, formant de nombreuses couches de sel qui sont maintenant enfouies sous la mer (et protégées par des couches d'argile), car cet assèchement n'a duré que 500 000 ans, et Gibraltar s'est réouvert. Notez que Gibraltar va probablement se refermer d'ici 500 000 ans, du fait de l'avancée de la plaque africaine vers la plaque eurasiennne ! En France, certaines couches de sel remontent près de la surface et y sont exploitées, comme en Lorraine, près de Nancy. En Alsace, les couches de sel sont exploitées en profondeur, et l'on en extrait de la potasse (mines de potasse d'Alsace). Dans les bassins du Sud-Est, du Sud-Ouest, en Camargue, on trouve des dômes de sel en profondeur... Toutes ces couches salées perdent un peu de leur sel chaque année au contact des eaux souterraines, qui l'emportent vers les rivières et vers la mer. Pour les roches cristallines (granites, roches volcaniques, roches métamorphiques), le sel vient de la dissolution de certains minéraux qui s'altèrent, comme les micas.

La raison pour laquelle la salinité de la mer est constante est plus complexe. On pense en effet qu'elle est la même depuis quelques centaines de millions d'années, car certains organismes marins qui y vivent aujourd'hui sont très proches de ceux que l'on retrouve comme fossiles dans les roches anciennes, et qui n'existeraient pas si la mer avait été plus salée ou moins salée. Pourtant, si l'on fait le bilan de la quantité de sel qui arrive par les rivières à la mer, il apparaît que la salinité de la mer devrait doubler tous les 200 000 ans environ. Pour expliquer que la salinité reste constante, il faut donc que du sel disparaisse de la mer. On pense que cette disparition de sel se produit dans les zones de subduction : quand une plaque lithosphérique « plonge » sous une autre, elle entraîne avec elle de l'eau de mer et du sel, contenus dans les anfractuosités des roches, par exemple les interstices entre les grains, les espaces ouverts dans les fractures. Du sel disparaît ainsi vers le manteau... Mais ceci reste aujourd'hui une hypothèse.

Quel sera l'influence de l'effet de serre sur le cycle de l'eau ?

L'élévation de la température de la Terre due à l'effet de serre aura, dit-on, une influence notable sur le cycle global de l'eau : il pleuvra en moyenne sur le globe plus qu'aujourd'hui. Mais la répartition de la pluie sera affectée : il pleuvra davantage sous les tropiques, moins sous les latitudes moyennes, comme autour de la Méditerranée, et de nouveau plus sous les hautes latitudes. Le problème est de savoir où se situeront les limites entre ces zones. Pour la France, on pense que la limite passera à peu près au centre de la France, vers Lyon. Il pleuvrait donc plus au nord de Lyon, moins au sud. Le « hic », c'est qu'il y a une très grande incertitude sur la position de cette limite : c'est la latitude de Lyon, plus ou moins 1 000 km ! Mais les effets pourraient être très significatifs. Les Espagnols se plaignent déjà que, à cause de l'effet de serre, la pluie chez eux a diminué en trente ans de 5 %. Mais on pourrait aller jusqu'à des variations de 20 %, ce qui est énorme... L'Australie est depuis quelques années en très fort déficit de pluie.

Qu'en est-il du paradoxe entre la fonte annoncée des icebergs et le manque d'eau douce ? Serait-il possible de les utiliser ?

Avec ou sans effet de serre, les icebergs fondent naturellement : ce sont des morceaux de la banquise qui se détachent, et s'éloignent des pôles, en dérivant par les courants, tout en fondant. L'effet de serre va simplement accélérer cette fusion. On a pensé à les utiliser, en les entourant d'une « jupette » de plastique (sans fond) qui séparerait la glace de l'eau salée. On les tirerait ensuite vers un pays aride, avec des remorqueurs. Comme les icebergs sont parfois très gros, ce remorquage pourrait prendre plusieurs mois, voire plusieurs années. Une fois sur place, ce qui n'a pas fondu pourrait être utilisé et on récupérerait l'eau douce entre la glace et la jupette : l'eau de mer, plus lourde, restant en bas, l'eau douce, plus légère, en haut, il suffirait de pomper l'eau douce en haut de la jupette. C'est donc techniquement possible ; il faut cependant couvrir la glace pour empêcher les oiseaux de venir se baigner dans l'eau douce, car ils la souilleraient de leurs excréments. Le seul problème est le coût : l'énergie dépensée par les remorqueurs pour tirer l'iceberg ne doit pas être plus importante que celle qu'il faudrait dépenser pour dessaler l'eau de mer. Or le prix du dessalement est en train de baisser (par osmose inverse ou par évaporation-condensation). Il est aujourd'hui de l'ordre de 0,70 euro le m³, ce qui est beaucoup moins cher que le coût d'une eau douce obtenue par un éventuel remorquage d'icebergs. L'énergie nécessaire pour le dessalement est de l'ordre de 3 kWh par m³, celle pour tirer un iceberg plutôt de 10 à 100 kWh par m³ selon la distance et la vitesse. Ceci dit, on trouve aujourd'hui à New York des bouteilles d'eau de boisson produite par fusion de la glace polaire... qui coûtent 30 dollars la bouteille !

Comment pallier, au niveau mondial, l'inégalité de la répartition de l'eau ?

Question difficile. Le manque d'eau, inéluctable, tant en quantité qu'en qualité, vient pour l'essentiel de l'augmentation de la démographie. La majeure partie de l'eau dont on aura besoin servira à l'irrigation, pour produire la nourriture nécessaire à nourrir tout le monde. Or, est-ce une malchance ou un lien de cause à effet, l'augmentation démographique se produit pour l'essentiel dans des pays déjà pauvres en eau, et aussi pauvres en moyens financiers. Techniquement, si on y met le prix, on pourrait par exemple dessaler l'eau de mer, et la transporter par conduites là où on veut. On pourrait aussi éventuellement construire des barrages dans les pays bien arrosés, et transporter l'eau par conduites ou canaux vers les pays arides. Mais qui payerait ? Alternativement, on pourrait produire plus de nourriture là où il y a de l'eau, et l'exporter là où les populations ont faim. On appelle d'ailleurs ce type d'échange de l'« eau virtuelle ». Ce serait à la limite moins cher, car il faut transporter par exemple 1 000 tonnes d'eau pour produire une tonne de blé... Dans l'avenir, on développera probablement des cultures moins consommatrices en eau, les agronomes y travaillent déjà. On peut aussi utiliser des techniques d'irrigation plus économes, comme le goutte-à-goutte. Mais qui va payer ? Le problème de l'eau est un problème de démographie et d'économie, pas de technique.

Une autre menace pèse sur la qualité de l'eau. En 2025, on comptera probablement vingt-cinq villes de plus de dix millions d'habitants, alors qu'il n'y en avait que trois en 1950. La majorité sera dans des pays en voie de développement. Alimenter en eau de bonne qualité ces populations, et surtout construire le réseau d'égouts nécessaire à son assainissement, suppose d'y consacrer des sommes considérables. On a estimé qu'il faudrait investir en dix ans dans le monde une somme de 160 milliards de dollars US pour venir à bout des problèmes d'eau, soit 16 milliards par an. La moitié de cette somme seulement est dépensée. Mais qui va payer la différence ? En France, depuis le 9 février 2005, la loi Oudin-Santini autorise les collectivités locales et les Agences de l'eau à affecter jusqu'à 1 % de leur budget eau et assainissement à l'aide internationale pour l'eau. Si cette possibilité était utilisée à plein, elle pourrait monter à 100 millions d'euros par an.

Ces pronostics scientifiques sombres sont-ils pris en compte par les politiques ? Rien n'est moins sûr. Un bon exemple en a été le gigantesque Cinquième Forum mondial de l'Eau, qui s'est tenu à Istanbul, en mars 2009, avec plus de 20 000 participants, et qui s'est conclu par une Conférence ministérielle réunissant les représentants de plus de soixante pays. On s'attendait à des décisions, à des déclarations généreuses, les pays riches auraient pu annoncer qu'ils décidaient de consacrer une aide significative pour s'attaquer au problème de l'eau dans les pays défavorisés. Or qu'en a-t-il été ? La déclaration finale de la Conférence ministérielle a consisté à dire, outre quelques généralités... que l'on organiserait une autre forum mondiale de l'Eau en 2012...! Une motion sur le droit universel à l'eau a même été repoussée. La démographie apporte annuellement actuellement soixante-dix millions d'individus de plus à une planète Terre qui en compte déjà six milliards sept cent millions... Même si la croissance démographique semble se ralentir, les prévisions pour 2050 s'échelonnent entre huit et douze milliards d'habitants. Il est à craindre que les problèmes techniques et économiques de l'eau et de la nourriture soient les premiers facteurs de risque du XXI^e siècle.

Peut-on dépolluer les nappes phréatiques contaminées ?

On peut le faire, mais c'est très lent, très cher et très difficile. De plus, on n'arrive jamais à éliminer toute la pollution. On arrête la dépollution lorsqu'on juge que des seuils de contamination « acceptables » ont été atteints. Les techniques classiques de dépollution consistent à pomper l'eau de la partie polluée de la nappe, à la traiter pour en extraire les polluants, et à la réinjecter soit dans le milieu naturel (par exemple dans les rivières), soit dans la nappe. Pour les pollutions par les hydrocarbures, on extrait les vapeurs d'hydrocarbures du sol en aspirant l'air du sol dans des forages (*venting*). Pour les nitrates et les pesticides, omniprésents, on ne peut rien faire, si ce n'est cesser d'en répandre (ou tout au moins en réduire les applications), et attendre que l'eau polluée s'écoule toute seule vers les exutoires, les rivières ou la mer. Comme les vitesses de l'eau dans les nappes sont très faibles (de l'ordre du mètre à la dizaine de mètres par an), cela peut prendre des décennies, et même des siècles. En pratique, on déplace souvent les captages qui fournissent des eaux polluées vers des zones plus propres, ou l'on traite les eaux pompées pour en extraire la pollution (pesticides, nitrates), bien que cela coûte cher.

Quelle alternative existe-t-il aux captages traditionnels d'eau douce en nappe et en rivière ?

Il n'y en a pas vraiment. On pourrait collecter l'eau de pluie dans des citernes, comme on le faisait autrefois, mais vu la pollution atmosphérique, il n'est pas certain que la qualité des eaux soit excellente. Quand les agriculteurs utilisent des pesticides dans les champs, par exemple, une partie importante se volatilise, et on retrouve dans l'eau de pluie, même à plusieurs dizaines de kilomètres, des concentrations en pesticides qui dépassent la concentration maximale admissible dans l'eau de boisson, qui est de 0,5 microgrammes par litre. De plus, l'eau en citerne se contamine facilement et doit être traitée par stérilisation.

Une autre alternative serait de ne plus boire l'eau du robinet, et de s'alimenter pour la boisson et la cuisson des aliments uniquement avec des eaux en bouteille ou en bonbonne. L'eau du réseau public servirait à la toilette et au lavage. Cela se fait déjà dans plusieurs pays, mais coûte évidemment assez cher.

Il existe enfin des nappes captives profondes qui sont bien protégées des contaminations superficielles, et donnent donc des eaux naturellement d'excellente qualité. Mais les débits disponibles dans ces nappes ne sont en général pas suffisants pour couvrir tous les besoins en eau. Ainsi, sous Paris, existe à 600 m de profondeur une nappe captive, dite *de l'Albien*, qui pourrait au plus satisfaire à quelques pour cent des besoins. Pour l'instant, on la conserve sous

nos pieds, peu exploitée, pour y faire appel en cas de crise (par exemple une grave pollution de la surface, comme un accident de type Tchernobyl ou Seveso). On envisage aussi de la commercialiser en bonbonnes.

Peut-on réellement avoir confiance en l'eau embouteillée ?

Il faut d'abord bien définir ce qu'on appelle « eau embouteillée ». Il peut s'agir d'une eau dite *minérale*, qui est une eau souterraine naturelle déclarée bénéfique à la santé par l'Académie de médecine. Elle est donc (ou devrait être) considérée comme un médicament. Les eaux minérales ne sont en principe pas traitées, c'est pourquoi on les appelle *naturelles*. En réalité, il est permis d'en extraire les éléments dits *instables*, c'est-à-dire les gaz dissous, ainsi que le fer et le manganèse dissous, qui précipitent quand on aère les eaux. Depuis peu, il est permis d'en extraire aussi les éléments dits « indésirables » comme l'arsenic, le fluor, etc., s'ils sont en excès. On peut ensuite réintroduire du gaz dans l'eau, pour en faire de l'eau gazeuse : il s'agit le plus souvent du gaz carbonique déjà présent dans l'eau et que l'on récupère lors de l'aération (lorsque l'eau se dégage), ou de gaz carbonique naturel collecté dans des forages voisins. On peut aussi introduire du CO₂ industriel, mais il faut le déclarer. Les eaux minérales doivent posséder une composition chimique très constante, ce qui implique, aux yeux du législateur, qu'elles sont d'origine profonde et donc bien protégées des pollutions superficielles.

Les eaux de source sont des eaux souterraines « ordinaires », non labellisées par l'Académie de médecine, qui doivent donc être naturellement potables. Elles ne peuvent pas non plus être traitées, sauf par l'élimination des éléments instables et indésirables, comme pour les eaux minérales. Elles ne doivent pas contenir de polluants au-delà des normes de potabilité des eaux des réseaux de distribution publics.

Il existe enfin une troisième catégorie d'eaux embouteillées, à vrai dire très peu courante en France, mais prisée aux États-Unis et en Angleterre. Ce sont des eaux d'origine quelconque, qui ont été rendues potables par traitement. Aux États-Unis, plus le traitement est sévère, plus le client semble satisfait. On trouve ainsi sur les étalages des eaux qui ont été traitées par deux ou trois osmose inverse successives, au point qu'elles contiennent tellement peu de sels que le fabricant en ajoute artificiellement, car des eaux distillées, par exemple, ne contenant rien, ne sont ni bonnes pour la santé ni bonnes au goût. On a donc un cocktail entièrement artificiel d'eau traitée et de sels ajoutés, qui semble plaire aux Anglo-Saxons...

Maintenant, faut-il avoir confiance dans ces eaux ? Oui, et non. Oui, parce qu'elles sont très contrôlées, et que les analyses dans les usines d'embouteillage sont très complètes et fréquentes. Oui, parce que s'il y avait un défaut, il serait repéré avant que l'eau n'arrive chez le consommateur. Entre la mise en bouteilles et l'arrivée chez le distributeur, il se passe en effet plusieurs jours, ce qui permettrait, en cas de problème, de retirer un lot de la vente. *A contrario*, une eau de réseau, même si elle est analysée très fréquemment, surtout dans les grandes villes, arrive chez le consommateur dans l'heure qui suit sa production. Si le problème éventuel n'a pas été détecté immédiatement, on ne peut plus rien faire. Oui, parce que les eaux souterraines mises en bouteilles sont, pour nombre d'entre elles, d'origine profonde et protégées. Oui enfin, parce que les eaux naturelles non traitées contiennent un cortège de bactéries naturelles non pathogènes, qui ont deux avantages : elles participent à la flore bactérienne naturelle qui fait l'environnement de l'homme (alors que les eaux stérilisées ne contiennent plus aucune bactérie, ni les pathogènes, ni les « bonnes »). De plus, on a montré que ces « bonnes » bactéries s'opposent à la prolifération des bactéries pathogènes : si une eau stérile vient à être contaminée par un germe, celui-ci va se développer ; tandis qu'une eau naturelle avec son cortège bactérien normal va empêcher les bactéries pathogènes de se développer.

Mais... non, car certaines eaux minérales sont en fait dangereuses, et contiennent trop d'éléments minéraux. Ce sont en fait des médicaments. Et non, enfin, car certaines eaux

embouteillées sont quand même polluées par les activités humaines. On a retrouvé un peu de nitrates dans les eaux de Vittel (ce qui a entraîné dans cette société un gros effort de retour à une agriculture plus respectueuse de l'environnement sur le bassin d'alimentation des sources, que l'on appelle *impluvium*). On a retrouvé en 2000 (analyse de la revue *Que Choisir ?*) des traces de pesticides dans deux eaux minérales françaises de renom. On est bien en dessous des normes de potabilité, mais ceci constitue une preuve que, contrairement à ce que pensait le législateur, la constance des propriétés des eaux minérales ne constitue pas une garantie suffisante de protection contre les pollutions.

On est ici devant un réel problème. Pour protéger de façon définitive les eaux de source ou minérales, il faudrait pouvoir protéger contre les activités polluantes anthropiques l'*impluvium* des sources, c'est-à-dire la zone où la pluie qui alimente la nappe captée s'infiltré. Les embouteilleurs lancent des actions de protection des nappes en passant des accords avec les communes ou les agriculteurs, ou en achetant des terres qu'ils protègent.

Bibliographie

L'eau, un trésor en partage, Ghislain DE MARSILY, Dunod, 2009.

Eau, M. CAMDESSUS *et al.*, Robert Laffont, 2004.

Les eaux continentales, Académie des sciences, EDP sciences, 2006 et www.academie-sciences.fr

Le surprenant cycle de l'eau, Vazken ANDRÉASSIAN et Julien LERAT, Le Pommier, «Les minipommes », 2007.

La Seine en son bassin, M. MEYBECK, G. DE MARSILY et E. FUSTEC, Elsevier, 1998.

L'avenir de l'eau, petit précis de mondialisation II, Erik ORSENNA, Fayard, 2008.

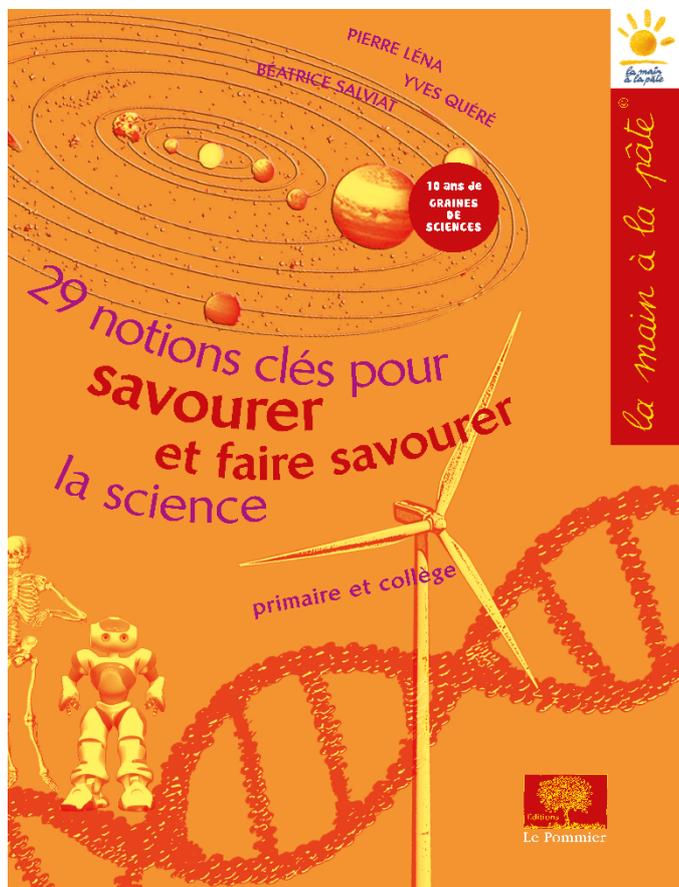
Allons-nous manquer d'eau ?, Vazken ANDRÉASSIAN et Jean MARGAT, Le Pommier, « Les Petites Pommes du savoir », 2006.

Nourrir la planète, Michel GRIFFON, O. Jacob, 2006.

Remerciements

Je tiens à remercier *La main à la pâte* pour son invitation à venir parler de l'eau à des enseignants, la Fondation des Treilles pour son accueil chaleureux et l'aide reçue des cuisines pour monter les expériences d'hydrologie, l'ensemble des enseignants pour leur intérêt, leurs commentaires et leurs questions et, plus particulièrement, Rachel Boidé, Jean-Marie Bouchard, Chantal Cloix, Anne Flamant pour leur lecture critique de ce texte.

Cette ressource est issue de l'ouvrage *29 notions clés pour savourer et faire savourer la science*, paru aux Éditions Le Pommier.



Le meilleur des Graines de sciences

Vous êtes enseignant, parent, éducateur... et vous manquez parfois de « munitions » pour répondre aux questions des enfants...

Or, en classe, à la maison, au centre de loisirs, celles-ci fusent : « Le Soleil va-t-il s'éteindre ? » « Est-ce qu'il y a des tremblements de terre sous la mer ? » « Où va l'eau qui tombe du ciel ? » « Pourquoi le ciel est-il bleu le jour ? » « Qu'est-ce que l'effet de serre ? » « Pourquoi les animaux migrent-ils ? » « C'est quoi le clonage ? »

Cet ouvrage de référence va vous aider à répondre à ce bombardement de curiosité... en toute connaissance de cause !

Fruit d'une rencontre entre des scientifiques et des enseignants, désireux de partager savoir et expérience, il est précisément conçu pour vous permettre d'acquiescer ou d'approfondir une culture scientifique, si précieuse pour appréhender le monde qui nous entoure... et pour l'expliquer !

Du Soleil à la cellule, du cycle de l'eau aux énergies renouvelables, de l'origine de l'homme au nanomonde, les 29 notions réunies dans ce volume constituent le bagage indispensable pour pérégriner, avec les enfants, en sciences, et ce, de la maternelle au collège. On les retrouve d'ailleurs dans le Socle commun de connaissances et de compétences, qui définit ce que l'école puis le collège doivent, en France, s'imposer de transmettre à tous les enfants.



Fondation *La main à la pâte*

43 rue de Rennes
75006 Paris
01 85 08 71 79
contact@fondation-lamap.org

Site : www.fondation-lamap.org

 FONDATION
La main à la pâte
POUR L'ÉDUCATION À LA SCIENCE