

L'utilisation des ressources et des flux

Ghislain de MARSILY

Nous allons regarder ensemble le problème de l'utilisation des *ressources* et des *flux d'eau*. Mais, afin de mieux comprendre ces deux concepts et les questions qui leur sont inhérentes, il nous faut d'abord revenir un peu en arrière et tenter de voir ensemble les explications qu'on a imaginées pour comprendre ce phénomène un peu aberrant: *que les sources continuent à couler quand il ne pleut pas.*

D'où viennent les sources ?

Cette question a beaucoup troublé nos prédécesseurs et la première explication a consisté à dire que les sources sont alimentées par la mer; celle-ci se réinfiltré dans la terre et arrive, suivant certains auteurs (je pense aux auteurs grecs anciens, Platon par exemple),

à d'immenses cavernes desquelles l'eau ressort par les sources et continue ce cycle superficiel des eaux (figure 1.a).

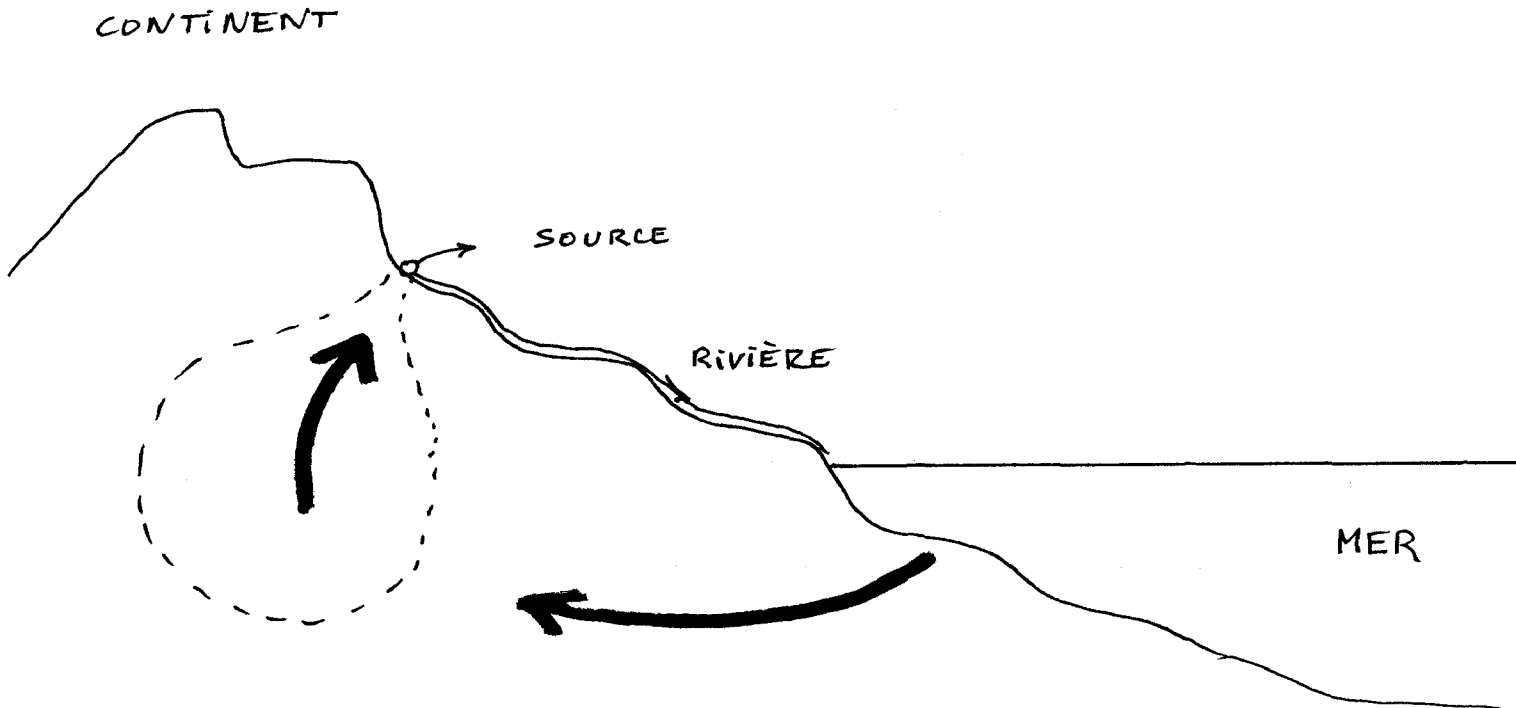


Figure 1.a - Le cycle de l'eau selon Platon

Les anciens avaient d'assez bonnes raisons de penser qu'il en était ainsi; la première étant que le niveau des mers ne varie pas, bien que les fleuves s'y jettent perpétuellement.

Vous allez me poser une question, que les anciens s'étaient posée, qu'en est-il alors du sel ? L'eau est salée, or les sources ne le sont pas. La théorie était simple : en circulant à travers des terrains l'eau se déssalait. Je vous rapporte ici une expérience, qui a eu lieu en 1715 en France où un chercheur a pris des pots de fleurs dans lesquels il a mis du sable et il a injecté, au sommet du premier pot, de l'eau salée, le flux sortant du premier rentrant dans le second et ainsi de suite; je crois qu'il y en avait 14; il espérait reproduire ce qui se passe dans la nature, c'est-à-dire obtenir de l'eau douce. Il se trouve que ce chercheur s'appelait Louis Ferdinand de Marsily, c'était un ancêtre, membre de l'Académie des Sciences qui a publié en

1715 le résultat de ses investigations qui, malheureusement, étaient négatives : l'eau est sortie colorée, sale... mais salée. Donc cette idée ancienne, imaginée par Platon, a été conservée jusqu'à Descartes. Elle a également été soutenue par Kepler.

D'autres idées ont vu le jour et je vais brièvement essayer de vous les exposer pour en arriver aux vraies, que vous connaissez. Il est parfois amusant de faire un petit peu d'histoire. La seconde idée, celle d'Aristote, est quand même plus proche de la réalité : c'est que la mer s'évapore et que les sources sont alimentées par la condensation (figure 1.b) mais Aristote ne voyait pas la pluie dans ce mécanisme : il ne voyait que la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique dans les cavités. Il y avait de nouveau une sorte de caverne, ou d'espace poreux dans le sol, dans lequel l'eau se condensait du fait des différences de température : elle s'évapore quand il fait chaud au bas des montagnes, l'air chaud remonte, arrive dans des endroits plus froids et recondense. Je n'insiste pas : le schéma réel vous le connaissez, c'est bien sûr le schéma des précipitations et infiltration des eaux de pluie vers le trajet souterrain, qui alimente ainsi les sources et les rivières (figure 1.c).

Ce schéma a été imaginé, je pense le premier par Léonard de Vinci, c'est lui qui a mis en cause les sources et la relation entre le débit des sources et la pluie. Bernard Palissy, également Pierre Perrot, qui a fait le premier le bilan du bassin de la Seine; il a regardé l'ensemble des précipitations sur quelques années autour des années 1668-1670 et il a montré que le débit de la Seine à Paris était à peu près expliqué par un ordre de grandeur du volume des pluies sur ces quelques années. Après lui, Halley l'astronome, auquel le nom d'une comète est attaché, a étudié le bilan de la Méditerranée et il a montré que les apports des fleuves dans la Méditerranée étaient probablement de l'ordre de l'évaporation sur cette surface.

Donnons quelques chiffres un peu plus précis : les chiffres ci-dessous ont été établis par un savant soviétique, M. BUDIKO, qui a donné en 1962 les chiffres moyens suivants pour la surface du globe: les lames d'eau tombées sur la terre ferme sont de l'ordre de 720 mm

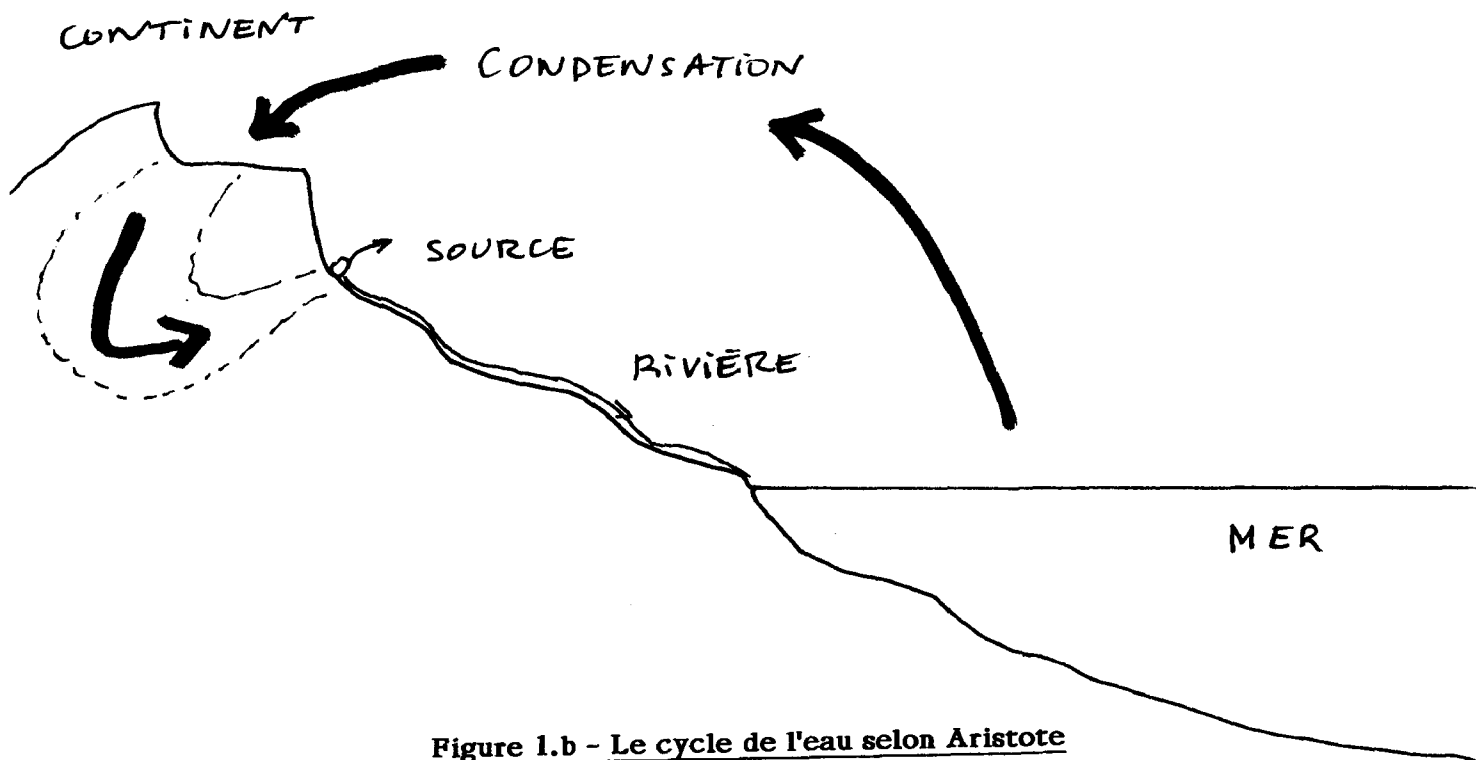


Figure 1.b - Le cycle de l'eau selon Aristote

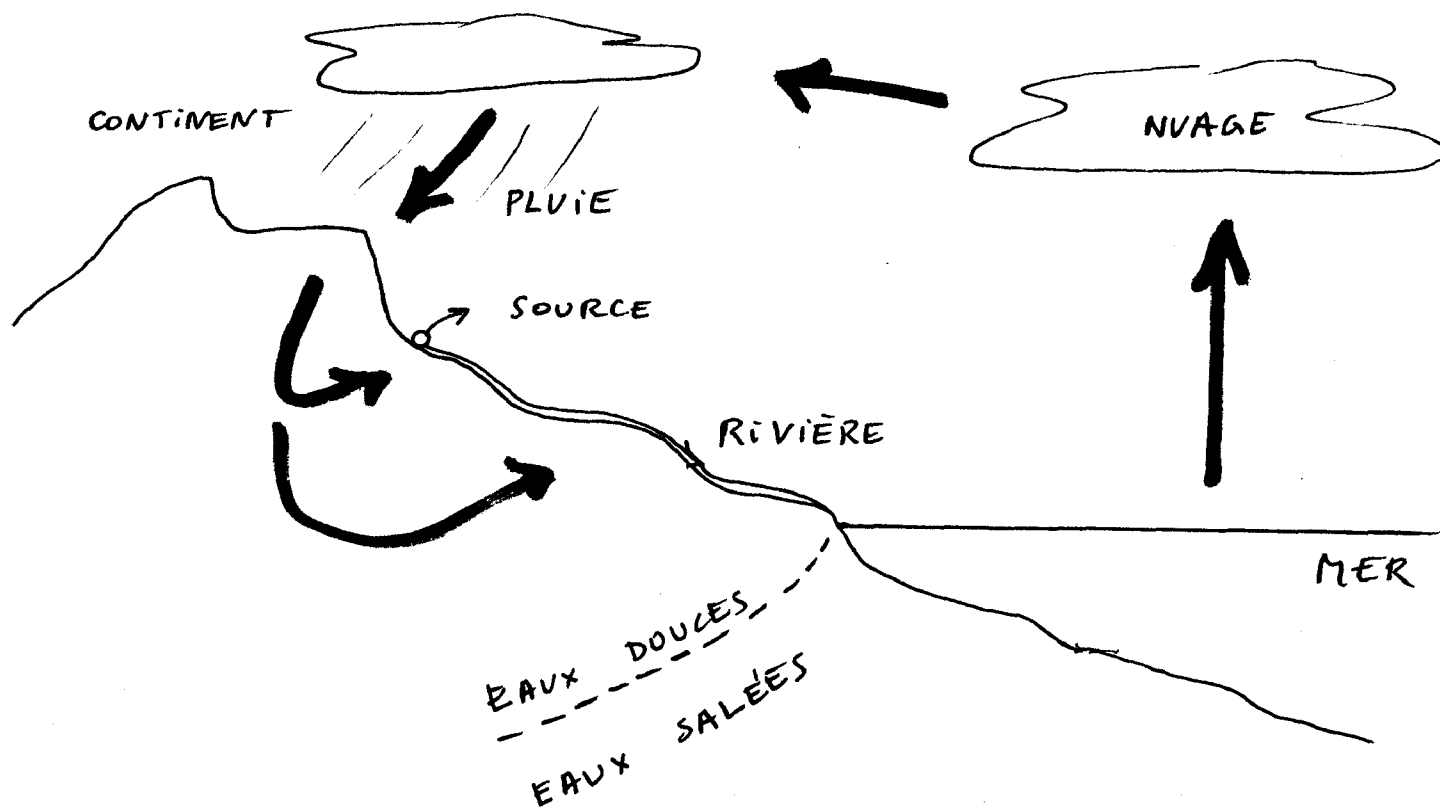


Figure 1.c - Le cycle de l'eau depuis Léonard de Vinci

par an; l'eau qui tombe ne ruisselle pas intégralement ou ne s'infiltré pas intégralement; une partie, supérieure à la moitié, 410 mm, s'évapore. On utilise, en fait, le terme d'*évapo-transpiration* qui cumule l'évaporation directe, donc l'eau qui se repasse en phase vapeur, et la transpiration de l'eau par les végétaux qui, du point de vue du climatologue, reviennent au même. Ces deux termes cumulés représentent plus de la moitié de l'eau tombée sur le sol. Le reste, la différence, soit 310 mm, est la somme des écoulements superficiels, ce que l'on appellera le ruissellement, et de l'écoulement souterrain, qui alimente les sources et les fleuves quand il ne pleut pas. Si l'on fait le même bilan sur les océans, on s'aperçoit que l'évaporation directe sur les océans est plus élevée : 1250 mm et la lame d'eau tombée en pluie sur les océans est évidemment un peu plus faible. C'est cette différence là, l'excès d'évaporation par rapport aux précipitations sur les océans, qui alimente l'excès de précipitation sur la terre ferme par rapport à l'évaporation. Si l'on sait que la surface des océans constitue environ 70 % de la surface du globe et la surface des continents, 30 %, on voit que le bilan est à peu près équilibré.

Les réserves d'eau

Puisque nous devons ici parler de l'utilisation des ressources en eau et des flux, donnons déjà quelques chiffres concernant les réserves :

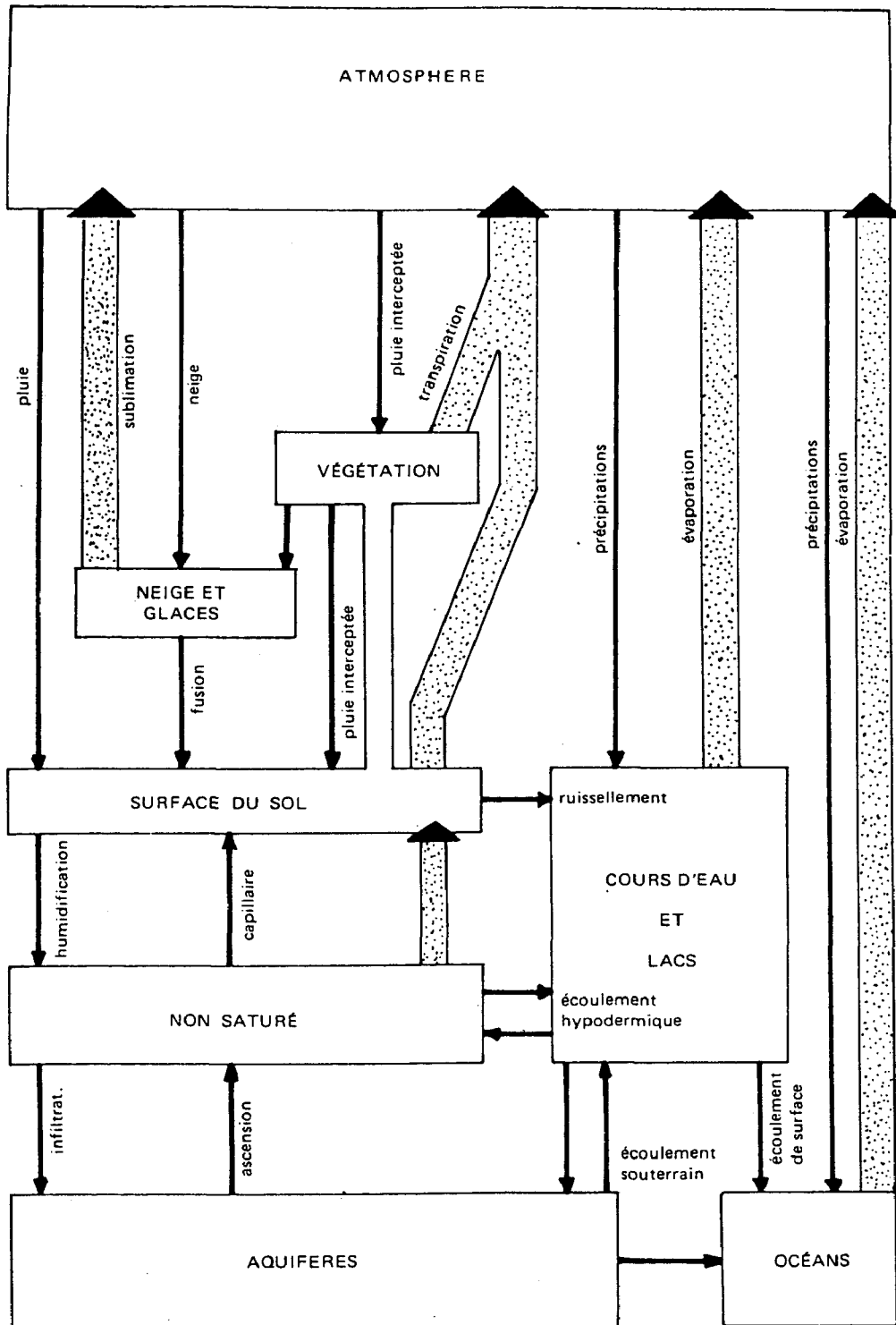
- la majorité des eaux sur terre (97 %) sont évidemment contenues par les océans; ce sont donc des eaux salées;
- les neiges et glaces viennent ensuite avec 2 % environ;
- les eaux souterraines qui nous intéressent représentent moins de 1 % et le reste est extrêmement négligeable. Un chiffre quand même intéressant est la vapeur d'eau atmosphérique, qui représente un millième de %.

Si l'on regarde le volume des précipitations annuelles, c'est-à-dire la somme des pluies sur les océans et sur les terres, qui est estimé à un demi million de km³ et qui représente 4 centièmes de % de

la réserve moyenne globale, nous voyons qu'il pleut chaque année environ 40 fois la vapeur d'eau contenue à un instant donné dans l'atmosphère. Si nous divisons 360 par 40, nous obtenons un chiffre moyen de 9, ce qui veut dire que la vapeur d'eau séjourne en moyenne 9 jours dans l'atmosphère. C'est peu; cela a une conséquence importante : si, pour une raison ou une autre, l'évaporation vient à être perturbée par un phénomène naturel, les temps de réponse sont extrêmement brefs. Je pense à l'éruption du volcan de la montagne Sainte Hélène, qui a envoyé une quantité assez importante de cendres dans l'atmosphère réduisant ainsi l'insolation de la surface de la terre, donc l'évaporation. La conséquence d'un événement comme cela, même lointain, sur les pluies peut être très rapide et perturber de façon très notable le fonctionnement général du schéma. Cela a été mis en évidence, ou au moins estimé, pour l'éruption volcanique du Krakatoa, au siècle dernier, qui a été beaucoup plus importante que tout ce que l'on a eu de comparable depuis le début du siècle et a certainement modifié pendant à peu près trois ans les précipitations sur la totalité de la surface de la terre.

La figure suivante (n° 2) a pour seul but de résumer ce que l'on appelle ce cycle de l'eau. Partons du sommet, donc : l'atmosphère: ce qui est en pointillé c'est ce qui remonte vers l'atmosphère et ce qui est en trait gras c'est ce qui descend. On a donc des précipitations qui cumulent la pluie et les précipitations sous forme solide : neige et glace; une première interception à la surface du sol, qui va engendrer le ruissellement, un transfert en profondeur vers les aquifères à travers ce que l'on appellera le milieu non saturé, et, bien sûr, les cours d'eau superficiels, le tout arrivant aux océans et repartant par le cycle que j'ai montré tout à l'heure.

Pour commencer nous allons nous intéresser au problème des écoulements souterrains, qui sont ceux de ma spécialité. Si je dessine un profil usuel de teneur d'eau, on trouve des teneurs en eau relativement faibles en surface et qui augmentent au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans le sol, puis, à un niveau à partir duquel la teneur en eau ne varie plus. Si l'on fore à partir de la surface du sol un puits, un forage, un trou, tout dépendra de la technique d'accès et de la profondeur qu'il faut atteindre, on s'aperçoit que c'est à ce niveau-là, où la variation de la courbe de teneur en eau est très rapide, que se



- CYCLE DE L'EAU
(D'APRES EAGLESON, 1970)

IN MARSILY, G.-de
Hydrogéologie Quantitative
Masson, Paris 1981

situe le *niveau phréatique*, c'est-à-dire le niveau de la nappe. On parle de nappe souterraine, d'eau dans les puits; c'est le moment où le sol, qui sera dit saturé, contient une teneur en eau constante au fur et à mesure que l'on descend. Elle est saturée par opposition à la partie superficielle du sol, qui contient quand même de l'eau. Il est erroné de croire que les nappes, les réserves souterraines, sont uniquement contenues au-dessous du niveau de l'eau dans les puits; il y a comme vous le voyez ici une certaine quantité d'eau qui est contenue dans le non-saturé et qui constitue la continuité entre la surface et le milieu souterrain.

Il est intéressant d'examiner comment ce profil évolue au cours de l'année : supposons qu'il pleuve à la surface du sol : on va voir la teneur en eau augmenter en surface, c'est-à-dire que l'on va voir le profil se déplacer au bout d'une heure ou deux de pluie : on a une humidité plus importante en surface. Cette humidité ne pénètre que très lentement dans le sol. Si vous grattez le sable devant chez vous, au bout de deux ou trois heures de pluie, vous voyez que l'eau n'est descendue que de quelques centimètres, de 5 à 10 cm pas plus; le temps de descente est assez long et, si la pluie continue, on va arriver à un moment où l'on va avoir une saturation en surface. A partir du moment où la saturation en surface est à peu près égale à celle que nous avons en profondeur, c'est-à-dire que tous les vides du sol sont pleins d'eau, le sol ne peut plus absorber l'excès d'eau qui tombe et le ruissellement se déclenche, c'est-à-dire que l'eau va commencer à courir à la surface du sol et être drainée par les rivières.

Quand la pluie s'arrête, que va-t-il se passer ? Si nous sommes en été, cette humidité importante en surface va être rééaporée par l'atmosphère ou par les végétaux. Les plantes sont capables d'absorber cette eau à la surface du sol et donc, petit à petit, le profil qui était arrivé à cette saturation se déforme : un peu d'eau continue à descendre, mais, en même temps qu'elle descend, l'humidité est asséchée par le haut par l'évaporation, et au bout de quelques semaines, le profil revient à l'état initial ou peu s'en faut.

Ceci a une conséquence très grave : c'est que les pluies qui tombent après le mois de mars ne descendent jamais alimenter le milieu

profond. En revanche en hiver, à partir du mois de septembre, en octobre, novembre, le profil arrive de même à saturation au départ; mais l'évaporation est trop faible à la surface du sol pour lui faire subir le schéma que je vous ai représenté et on constate cette fois-ci que l'eau descend. Elle met un certain temps, mais l'eau circule le long du profil, et, au bout d'un certain temps, le profil s'est entièrement décalé, et on constate que le niveau dans les puits est remonté.

Nous avons donc deux mécanismes différents d'évacuation par le sol, celui d'été, qui finalement sert à la végétation mais n'alimente pas le système souterrain, et celui d'hiver qui, seul, alimente les systèmes souterrains.

Vous vous souvenez peut-être des difficultés que nous avons eues en 1976 dans le nord de la France pendant la fameuse sécheresse. La sécheresse de 76 a essentiellement été connue du public à partir du mois de mai, c'est là que, notamment en Normandie, les sources étant séchées, les problèmes se sont véritablement posés. En fait pour l'hydrologue la sécheresse de 76 s'est passée avant, pendant l'hiver 75-76 : il a très peu plu et ce processus, que je viens de décrire, de recharges des nappes n'ayant pas eu lieu, on pouvait, dès mars 1976, s'attendre à des difficultés hydrologiques importantes qui n'ont pas manqué de se produire.

Y a-t-il d'autres origines possibles de l'eau à l'intérieur du sol ? On en cite au moins deux : celle d'Aristote, c'est-à-dire la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique : cela existe, c'est ce que l'on appelle la *rosée* : vous voyez le matin dans les champs de la rosée qui est déposée à la surface du sol ou sur les végétaux ; en fait, elle se dépose également à l'intérieur des pores du sol. Une expérience a été faite dans les années 1930 à Montpellier pour mettre en évidence les quantités mises en jeu par ce phénomène. Le volume recueilli était d'environ 2 litres par jour pour un volume de roche de l'ordre de 5m³; c'est un débit qui n'est pas négligeable mais très petit par rapport au flux principal que je vous ai décrit tout à l'heure, celui du transit par le milieu non saturé. On estime que dans les pays tempérés, celui-ci est en effet compris entre 1 et 10 l/s.km² en débit fictif continu ou,

si on préfère une autre unité, une lame d'eau infiltrée de 30 à 300 mm par an.

Une autre origine réelle des eaux que l'on rencontre dans le sol est celle de ce que l'on appelle les *eaux juvéniles*, qui sont produites quand des roches venues de la profondeur, on appelle cela un magma, arrivent à proximité de la surface et se refroidissent. Ces roches viennent des profondeurs du manteau, mais il ne s'agit pas d'une éruption volcanique; c'est la mise en place d'une zone chaude sur des surfaces et des épaisseurs très importantes, qui petit à petit se refroidit. Ces masses contiennent naturellement jusqu'à 5 % d'eau. Cette eau est expulsée en plusieurs dizaines de milliers d'années du fait du refroidissement très lent de ces volumes magmatiques. Il a été estimé que, au mieux de leur refroidissement, le flux qui serait ramené à la surface du sol est de l'ordre de 25 l/min km² à comparer aux 10 l/s km² de l'eau représentant le cycle atmosphérique, que l'on appelle les *eaux vadoses*. Ce terme d'eaux vadoses est utilisé pour décrire le cycle général que je vous ai présenté : évaporation de l'eau des mers, la précipitation et l'infiltration ainsi que l'eau de condensation. Ces eaux juvéniles ne sont pas des eaux vadoses. Pour vous donner les définitions, ce que l'on appelle les eaux géothermales sont des eaux vadoses, c'est-à-dire des eaux habituelles, qui sont descendues suffisamment profondément dans le sol pour s'y réchauffer; les eaux fossiles sont des eaux vadoses infiltrées dans des périodes plus humides du quaternaire ou du tertiaire, des âges qui nous ont précédé, et les eaux *données* sont les eaux qui se sont déposées en même temps que les sédiments : quand un sable se dépose au fond de la mer, par exemple, il emprisonne une certaine quantité d'eau et on appelle celles-ci les *eaux données*. Ces eaux sont généralement salées. L'essentiel des eaux qui vont nous intéresser maintenant sont les eaux vadoses.

L'utilisation des ressources

Les systèmes aquifères

Ce que l'on appelle l'hydrologie consiste à étudier le devenir des précipitations, de l'évaporation, du ruissellement en surface, des écoulements superficiels, de l'infiltration et des écoulements souterrains. Il existe malheureusement dans nos pays une maladie que l'on

appelle l'hydroschizophrénie et qui consiste à dissocier ce qui se passe à la surface du sol de ce qui se passe en profondeur, c'est-à-dire les écoulements superficiels et souterrains. C'est certainement une erreur puisque ces deux systèmes sont en fait connectés, comme vous l'avez vu. Cette dissociation est très commode, et je dirai qu'elle est traduite dans la législation française : les eaux souterraines sont de la compétence du Ministère de l'Industrie et du Service des Mines et il n'est pas, je crois, tout à fait un hasard que cette conférence soit donnée par un enseignant de l'Ecole des Mines, alors que la précédente conférence organisée par le MURS a été donnée par un ingénieur des Ponts et Chaussées, M. LEFROU, qui vous a parlé des problèmes d'aménagement des eaux de surface, qui sont de la compétence du Ministère de l'Équipement. Ces concepts un peu administratifs, qui sont la séparation des eaux souterraines et des eaux de surface, se retrouvent non seulement dans la législation mais aussi dans l'aménagement. Il est rare que l'on prenne en considération en même temps ce qui se passe dans le sous-sol et dans la partie superficielle. Nous allons le voir au cours de quelques exemples.

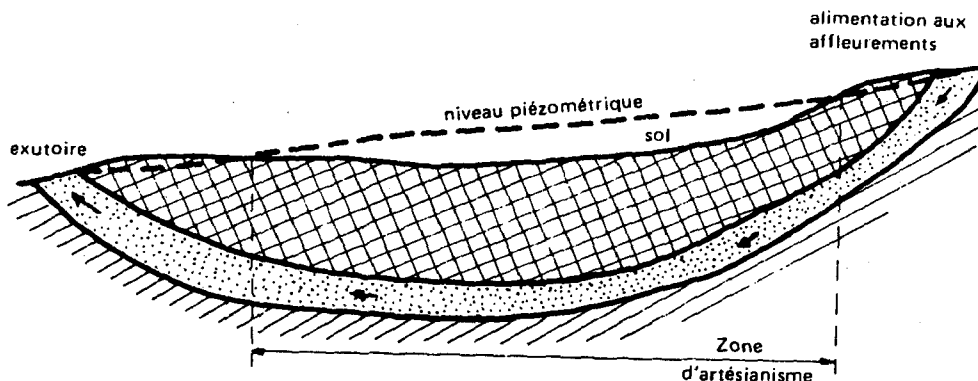
Systemes libres et systemes captifs

Je vais donc me livrer à un peu d'hydroschizophrénie et examiner avec vous le problème des eaux souterraines. Nous avons vu que l'eau qui tombe à la surface du sol traverse une zone, que nous avons appelé le *milieu non saturé*; puis, à partir d'une certaine profondeur, on observe un milieu que nous avons appelé *saturé* et dont le sommet correspond à la hauteur de l'eau dans les puits. Si nous faisons des expériences, et forons des ouvrages les différents points où l'on rencontre l'eau sont aussi proches de la surface topographique que du sol (à quelques mètres ou dizaines de mètres près). C'est ce que l'on appellera le niveau phréatique et les écoulements qui sont engendrés dans ces nappes superficielles, nappes libres ou nappes de vallée, sont en fait des écoulements qui vont des points hauts vers les points bas. On y trouve reproduit dans le sous-sol un peu ce que font les rivières dans les vallées, c'est-à-dire que l'eau s'écoule depuis les points hauts vers les points bas; cette circulation peut cependant avoir des parties descendantes et des parties remontantes; ce sont ces mécanismes qui

font que les rivières, même quand il ne pleut pas et quand on ne peut pas identifier leurs sources, sont alimentées par la base, par ces eaux souterraines qui participent à l'écoulement général. Ici la surface redescend, ce qui veut dire que les eaux s'écoulent vers une rivière située un peu plus loin et allant se drainer vers une autre vallée : c'est ce que l'on appelle une *nappe libre*, libre parce qu'elle est proche de la surface et de vallée parce qu'elle est drainée vers des cours d'eau.

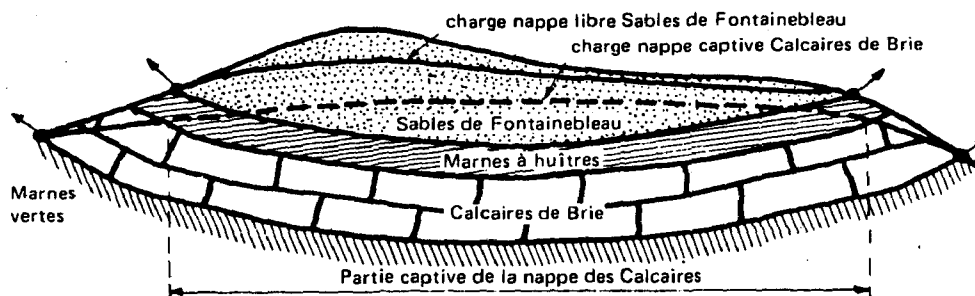
Ce n'est pas le seul type de nappes que l'on rencontre dans la pratique. Nous avons ici un système aquifère que nous appellerons *captif* (figure 3).

Nappes captives des sables éocènes en Gironde (schéma) :



Nappes superposées :

Dans l'exemple des sables de Fontainebleau sur les calcaires de Brie, la nappe de ces derniers peut souvent être captive par endroits.

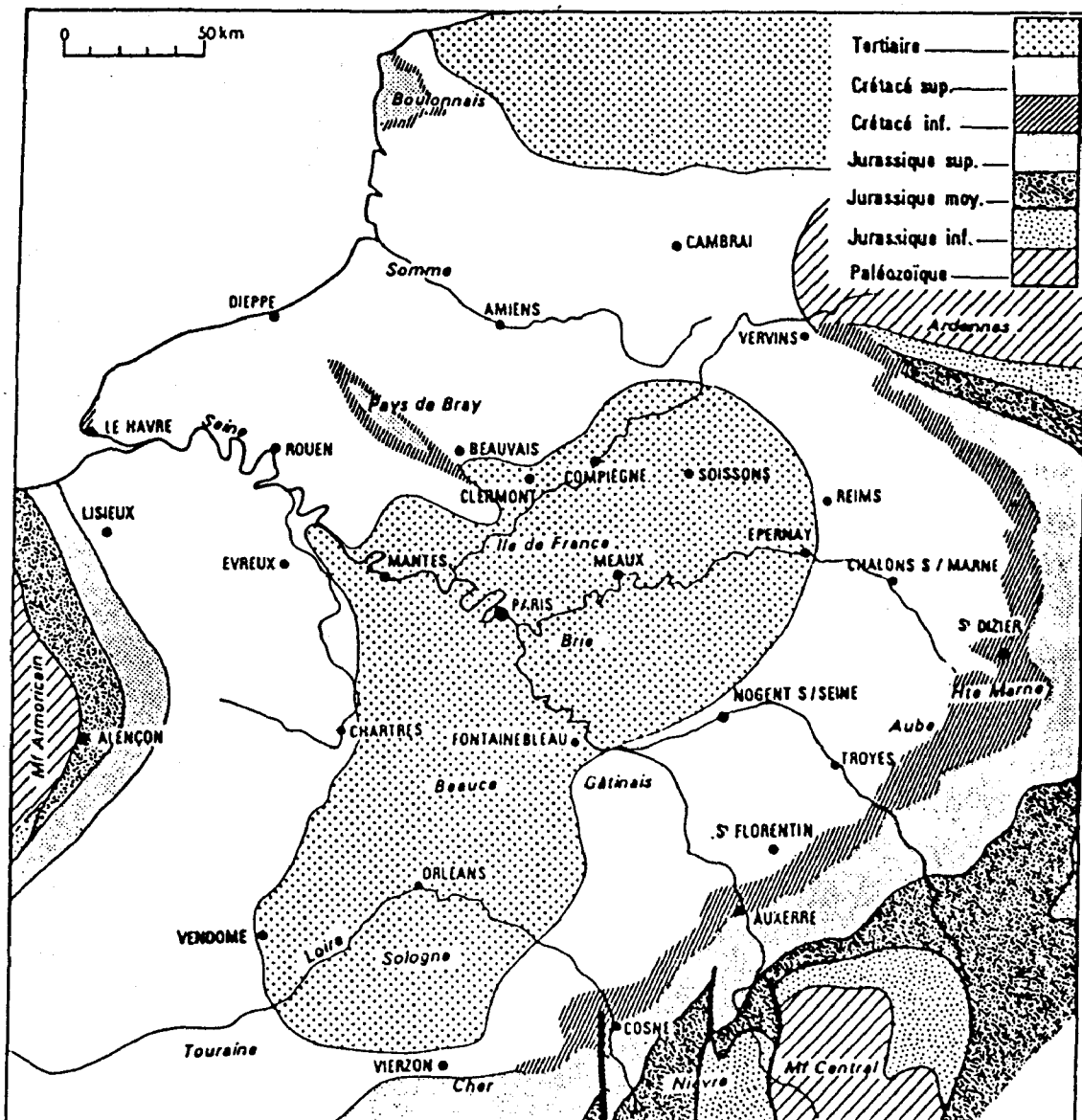


Ceci est une coupe du sol. Supposons que sur cette surface du sol une butte de sable perméable affleure encadrée par des terrains imperméables par exemple des argiles ou des marnes, et que cette couche de sable perméable s'enfonce et puis remonte vers la surface du sol: on constate que les eaux qui s'infiltrent à l'amont (on aurait probablement une nappe à surface libre à l'aplomb de l'affleurement) transitent à l'intérieur de cette couche et, après un passage en profondeur, ressortent dans des sources.

Ce schéma peut être représenté par celui du tube en U; ceci ressemble assez fort à ce que nous appellerions en hydraulique un siphon. Il se remplit par sa surface s'il y arrive de l'eau par la pluie et cette eau s'écoule dans le siphon et ressort à sa surface libre. Ce mécanisme hydraulique assez classique du tube en U et du siphon se reproduit quand les conditions géologiques lui sont favorables; je vous rappelle que si l'on perceait un trou dans la partie basse du siphon, on engendrerait une fuite, dont la pression permettrait à l'eau de remonter pratiquement jusqu'à la hauteur moyenne comprise entre les hauteurs de remplissage amont et aval.

L'eau ici est maintenue en pression et peut, si on fait un trou, monter jusqu'à la hauteur comprise entre les deux hauteurs extrêmes du système. C'est précisément ce qui se passe dans les systèmes que nous appelons les nappes captives : on constate, si l'on perce le sol en traversant cette couche imperméable qui isole le siphon, que le niveau des eaux est en général une moyenne entre la cote des alimentations amont et des exutoires aval. Si cette cote est supérieure à la surface du sol, les forages qui atteignent ces nappes sont dits *artésiens*. C'est simplement un phénomène de tube en U avec niveau de l'eau dans le forage supérieur, à la cote du sol. Si nous avons fait un forage dans cette même nappe à un point où le niveau n'atteint pas la cote du sol, le forage ne serait pas *artésien*. C'est une question de topographie relative du niveau de la nappe et du niveau du sol.

Voici l'exemple de la nappe des sables *albiens*, les sables verts du bassin de Paris. Sur la carte géologique du bassin de Paris (figure 4), au sommet du crétacé inférieur, il y a une couche sableuse, les fameux sables verts, qui se retrouve sous Paris et vient affleurer

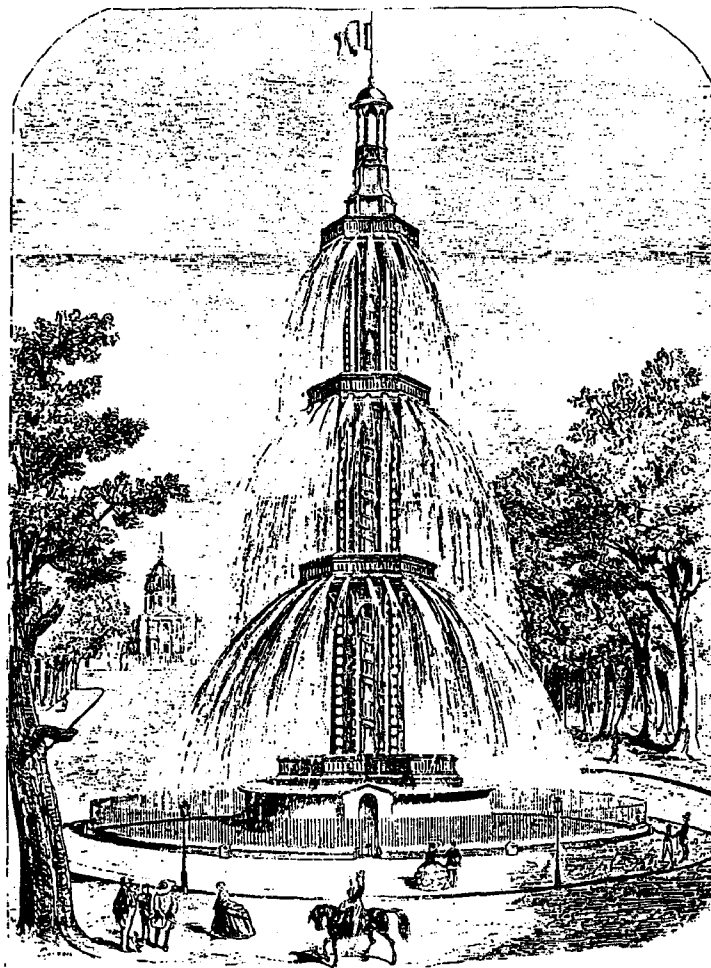


— Carte géologique schématique du bassin de Paris.

(in Sarocchi et Levy-Lambert)
(chronique d'hydrogéologie, 1967)

à l'aval dans la vallée de la Seine, on en voit un petit morceau ici près du Havre, et à l'amont dans une couronne qui passe par l'Yonne. Ceci a été constaté, en 1841 par ARAGO, qui était conseiller municipal de Paris et qui a dit : "cette couche de sable que j'observe ici doit passer à Paris à une profondeur de 400 m," ARAGO a engagé le conseil municipal à réaliser un forage, qui a été réalisé à Grenelle, pour at-

teindre cette nappe de l'albien dans laquelle il espérait trouver des ressources considérables. Ces travaux de forage ont pris environ 4 ans, les techniques de forage étaient très lentes à l'époque. ARAGO s'était trompé : l'eau n'était pas à 400 m mais à 600 m, mais à l'époque on avait le temps et on a continué jusqu'à ce que l'on trouve ces sables. Au moment où les sables ont été atteints, le phénomène d'artésianisme a été observé; l'eau, qui était en pression, s'est mise à jaillir; elle est passée au-dessus du niveau de l'appareil de forage et coulait en cascade dans les ruisseaux. Ceci était un très beau succès. La fontaine de Grenelle a été construite pour exploiter cette pression de l'eau dans le sol qui lui permettait de monter à une hauteur qui a été estimée à environ 120 mètres au-dessus de la surface du sol.



IN LAUVERJAT, 1967

La fontaine de Grenelle

Il existe d'autres réalisations analogues, plus anciennes. Les nappes de l'Oued-R'hir en Algérie, ont à peu près les mêmes conditions géologiques c'est-à-dire une couche de sable contenant de l'eau qui est alimentée, comme les sables de l'albien, pas ses côtés. Cette couche est isolée par une petite couche de calcaire qui joue le rôle de sommet du siphon et emprisonne l'eau.

On considère que, depuis le 10ème siècle à peu près, les puisatiers de l'Oued-R'hir savaient construire des ouvrages dont la profondeur est estimée à près de 80 m.

Les puisatiers travaillaient à sec sur les 80 premiers mètres jusqu'au moment où ils arrivaient à cette fameuse couche calcaire qui est la paroi qui préserve le siphon. La paroi était en calcaire rigide, et le plus vieux puisatier de la corporation était chargé de casser la dalle. Il restait tout seul au fond du puits et, au moment où il cassait la dalle, se déclenchait le mécanisme que nous avons vu à Grenelle, c'est-à-dire le jaillissement de l'eau qui remontait sous des pressions très fortes par les fissures. Une fois sur deux, le puisatier était tué ayant accepté ce risque pour le bien de la collectivité, et il remontait avec l'eau jaillissante. Mais le puits se colmatait; ce trou de pic qui ouvrait la voie à l'eau n'était souvent pas suffisant, il fallait améliorer. Les puisatiers se lestaient les pieds avec des pierres et descendaient, évidemment sans aucun équipement de plongeur dans le noir, à 80 m de profondeur, en apnée pour aller enlever un peu de sable et remettre le puits en circulation. Ils étaient ensuite remontés par des cordes par leurs collègues et ceci a duré à peu près depuis le 10ème siècle jusqu'à environ le début de ce siècle. Ensuite on a utilisé des techniques plus modernes de forage.

Un autre exemple d'utilisation des ressources est donné, en Algérie toujours, dans ce que l'on appelle les palmeraies du Souf. Le Souf se situe dans le sud algérien, dans la partie nord du Grand Erg Oriental. Quand on s'approche du Souf, on ne voit rien et puis, en se rapprochant encore plus des palmeraies, on aperçoit d'immenses trous qui ont été excavés par des populations, dont on pense qu'elles remontent au 10ème siècle, pour que leurs palmiers puissent atteindre le niveau de l'eau. Là on a une sorte de démonstration d'une variation climatique importante, qui se produit depuis environ quelques milliers d'années.

Le Sahara n'est sec que depuis environ 5.000 ans; il y a 5.000 ans, le Sahara était fertile : il y avait de l'eau de pluie qui tombait. Le niveau des nappes y était alors très proche du sol, à quelques mètres. Les habitants ont planté des palmiers au moment où les pluies ont commencé à baisser et ces palmiers avaient les pieds dans l'eau puisqu'ils s'alimentent directement dans l'eau si leurs racines peuvent y descendre. Avec la sécheresse du Sahara et avec l'exploitation que constitue la prise d'eau des palmiers, l'eau a baissé peu à peu. Les habitants ont alors excavé un tout petit peu la surface du sol de façon à pouvoir l'abaisser et remettre leurs palmiers les pieds dans l'eau. Ils en sont arrivés, quelques siècles plus tard, à ces monuments qui consistent en des palmeraies enterrées, dont on ne voit rien depuis la surface, parce que la hauteur du palmier, qui est d'environ 20-30 m, est égale à la profondeur du trou qui a été creusé dans le sol autour de lui. Evidemment, le vent travaille contre l'homme : le sable est entraîné par le vent dans les trous et la plupart des habitants passent leur vie, une hotte sur le dos, à remonter le sable qui descend dans les palmeraies.

Nous avons donc deux systèmes aquifères principaux : les aquifères libres, c'est-à-dire ceux qui sont proches de la surface et drainés par les vallées et les aquifères captifs qui descendent en profondeur et peuvent donner lieu à ces phénomènes d'artésianisme.

Systemes karstiques et de roches fissurées

Je voudrais très brièvement parler de deux autres systèmes aquifères, d'une part les systèmes karstiques, d'autre part les systèmes de roches fissurées.

Le système karstique est le système classique d'alimentation en eau dans le sud de la France, dans les pays calcaires. J'ai voulu prendre comme exemple deux vallées isolant un plateau calcaire, comme le plateau des causses ou du Larzac, lesquels sont isolés entre des vallées profondes qui les drainent. Ces plateaux calcaires sont parcourus d'un nombre important de fissures dont l'origine est tectonique.

Les roches calcaires sont cassantes; sous l'effet de la déformation, ces fissures se créent naturellement dans l'histoire géologique des matériaux. Le calcaire est également une roche soluble et dans la mesure où les précipitations atmosphériques contiennent une certaine quantité de gaz carbonique, celui-ci a la propriété de se transformer en acide carbonique, et donc de dissoudre le calcaire.

Le résultat est que les fissures, qui au départ étaient fermées s'élargissent par dissolution et donnent lieu à ce que l'on appelle le *système karstique*, c'est-à-dire un ensemble de conduits qui peuvent être très fins, ou parfois devenir ces fameuses rivières souterraines, dont vous avez probablement entendu parler, et qui donnent de la science des eaux souterraines une vision très néfaste dans la mesure où ces rivières souterraines n'existent que dans les pays calcaires et ont une localisation qui est extrêmement difficile à trouver. De plus elles sont rares : il y a une rivière souterraine tous les 10 ou 20 km et, malheureusement, en général, le grand public a comme image de la circulation de l'eau dans le sol ces fameuses rivières et pense que la prospection de l'eau dans le sous-sol consiste à localiser l'endroit, le passage où se situe cette rivière d'où l'on pourra extraire de l'eau. Ceci est vrai en pays calcaire, mais cela ne représente qu'un très faible pourcentage du territoire et une très faible part des problèmes d'alimentation en eau. Ces systèmes calcaires sont complexes dans la mesure où on constate que, bien souvent, les cours d'eau de surface eux-mêmes peuvent emprunter parfois des trajets souterrains et on peut avoir ce que l'on appelle des *pertes*, c'est-à-dire que la rivière se perd dans une ou plusieurs fissures et on aura inversement, vers l'aval, des *résurgences*, c'est-à-dire une remontée vers la surface de cette eau qui s'est déjà infiltrée dans le sol. Il en résulte que l'eau dans les pays calcaires est très généralement de mauvaise qualité bactériologique, puisque, dans son trajet souterrain, elle circule dans de grosses fissures où elle est très peu épurée.

Dernier système dont nous parlerons : les systèmes fissurés. Les roches de socle, c'est-à-dire par exemple les granits, occupent une certaine partie de la France, de la Bretagne, du Massif Central, mais surtout une partie très importante du continent africain; tous

les pays de l'Afrique de l'Ouest sont situés sur l'affleurement de ces roches cristallines anciennes qui sont elles-mêmes suffisamment compactes pour ne pas - ou presque pas - contenir d'eau : les fissures existent, de même qu'elles existent dans le calcaire, mais elles ne sont pas ou très peu élargies; le granit est une roche beaucoup plus résistante et son altération est très lente et ne conduit pas à ces fameux conduits karstiques dont nous avons parlé.

Dans les pays cristallins il y a quand même un peu d'eau que l'on peut capter par des puits, si ces puits sont implantés dans les zones où la densité de fissures est un peu supérieure à la normale.

Le problème de l'eau souterraine dans les pays d'Afrique, ou en Bretagne, est de trouver l'emplacement où la densité de ces fissures est plus forte et de forer des puits qui ont chacun un débit tout petit, de l'ordre de quelques m³ par jour, mais suffisant pour faire une alimentation en eau potable d'une collectivité locale.

L'écoulement des flux

Je vous ai dit qu'au départ la pression à Grenelle était de 120 m au-dessus du sol. De 120 m on était passé à 100 m en une vingtaine d'années, et puis petit à petit et, en particulier, au moment où les débits se sont mis à augmenter très considérablement, dans les années 1930, on est passé à quelque chose comme 20 m, c'est-à-dire pratiquement l'altitude de Paris. Le jaillissement naturel des puits albiens a peu à peu tari et on a considéré que la ressource était en train de se dilapider. Ce n'était pas tout à fait exact, mais devant cette augmentation très importante des prélèvements et cette chute corrélée de la pression dans les nappes, le Service des Mines, chargé de la protection des eaux souterraines, a pris des mesures devant l'utilisation croissante des ressources et a soumis, à partir de 1935, l'exploitation des eaux souterraines en région parisienne à une autorisation, c'est le fameux décret de loi de 1935, qui s'appelle le décret pour la défense du franc et qui interdit à tout exploitant, ou à tout particulier, de faire un prélèvement nouveau dans les nappes du sous-sol situées à plus de 80 m de profondeur sans autorisation. On a considéré que les nappes en surface

étaient libres d'accès et, en fait, le seul objectif visé était la protection de la nappe albienne. La création de nouveaux ouvrages est interdite si le Service des Mines n'autorise pas leur exploitation.

Depuis 1935 aucune autorisation n'a été donnée. Le service était habilité à donner ces autorisations mais n'en a donné aucune. Du fait du vieillissement des forages le débit prélevé a lui-même diminué, si bien que la pression dans la nappe a cessé de chuter, et les niveaux de l'eau se sont à peu près stabilisés et ont même, depuis les années 1970, commencé à remonter un tout petit peu.

Comment explique-t-on ce phénomène ? Il faut remarquer que, lorsque les puits albiens ont été faits à Grenelle en 1841, on ne possédait pas de vision claire et de compréhension de la façon dont s'écoulaient les eaux dans le sol. En effet, les premiers travaux scientifiques corrects de calcul de l'écoulement de l'eau dans le sol remontent à l'année 1856; c'est un ingénieur municipal de la ville de Dijon, Monsieur le chevalier Henri DARCY qui a établi la façon dont l'eau s'écoule à travers un milieu naturel. L'expérience de Darcy comportait un tuyau rempli de sable et deux bacs remplis d'eau à hauteur différente de façon à créer un écoulement. Le débit circulant à travers le sable montré par Darcy dépend d'un coefficient K , de la section A du tuyau et du rapport H/L H/L étant la différence de hauteur d'eau entre les réservoirs amont et aval et L étant la longueur du tuyau de sable. H/L est ce que l'on appelle le gradient hydraulique, la perte de charge par unité de longueur, dans le sable. Le coefficient K a été baptisé la *perméabilité* et c'est ce qui caractérise la facilité avec laquelle l'eau peut s'écouler à travers le sable; ce coefficient de perméabilité est extrêmement variable en fonction de la nature de la roche considérée.

Muni de cette première loi, qui donne la relation entre le débit et les hauteurs, on peut se targuer de deux principes qui sont, d'une part le principe de LAVOISIER, conservation de la masse, que l'on appelle mathématiquement l'équation de continuité et, d'autre part, d'un deuxième principe appelé équation d'état et dans le détail duquel je ne m'étendrai pas, il fait appel à la compressibilité de l'eau et du sol. A partir de ces trois lois : loi de Darcy, qui est une loi expérimentale, et principes généraux de la physique, on arrive à écrire

une équation qui s'appelle l'équation de la *diffusivité*, dont la forme est égale ou analogue à l'équation de la chaleur, c'est-à-dire l'équation de conduction dans les milieux solides ou encore analogue à l'équation de l'électricité, c'est-à-dire le transfert de l'électricité dans les milieux conducteurs.

Donc petit à petit, à partir de 1900 environ, il y a eu des travaux, en particulier ceux d'un mathématicien qui s'appelait DUPUIS, qui ont combiné ces notions et ont construit ce que nous appelons aujourd'hui un modèle de représentation de la circulation de l'eau dans le sol.

Je ne décrirai pas ce modèle; je vous donnerai un aperçu de l'évolution de son utilisation. A partir des années 1900, où ce modèle a été conçu, les travaux scientifiques ont essentiellement été de nature analytique, c'est-à-dire résolution d'équations aux dérivées partielles ou d'équations différentielles par les méthodes des mathématiques classiques, c'est-à-dire que le mathématicien intègre les équations et fournit de belles intégrales pour prévoir des comportements.

Il se trouve que les méthodes mathématiques les plus utilisées ont été des transformations, que l'on appelle des transformations conformes, en particulier la transformation JOUKOWSKI, et l'école Russe est encore aujourd'hui, je crois, celle qui a produit le plus de travaux remarquables sur la résolution mathématique de ces équations pour prévoir les écoulements.

A partir des années 1950 des travaux ont eu lieu que l'on appelle analogiques. Je vous ai dit que l'équation de circulation de l'eau dans le sol est analogue, c'est-à-dire a la même forme que les équations de circulation de l'électricité dans les milieux conducteurs. On a donc conçu des modèles que l'on appelle analogiques, auxquels on a fait subir des écoulements d'électricité en mesurant le débit de l'électricité ou la tension de l'électricité : on avait ainsi de façon analogue l'équivalent du débit de l'eau et de la pression de l'eau. Ces méthodes ont connu leur apogée au début des années 1970, et puis ont cessé d'être utilisées à partir des années 1975 avec cependant un regain d'intérêt vers les années 1972 dans ce que l'on appelait les

modèles digitaux couplés, dans lesquels on couplait un calculateur analogique à un calculateur digital.

Enfin, depuis les années 1960 à peu près, les méthodes numériques c'est-à-dire l'utilisation des ordinateurs pour résoudre les problèmes d'écoulement, ont connu un développement considérable.

La vulnérabilité des eaux

Les eaux superficielles sont en général de qualité bactériologique médiocre, polluées par les activités humaines, par les activités des animaux domestiques (le bétail en batterie pollue beaucoup) et, jusqu'au moment où on a su installer des méthodes de traitement par chloration des eaux, il est certain que, dans l'esprit collectif, s'est installée la notion : eau superficielle = eau sale, risques de pollution, risques d'épidémies; eau souterraine = eau propre, eau de qualité ne donnant pas de problèmes d'épidémies.

Ceci était vrai, et c'est toujours vrai, pour les pollutions d'origine bactérienne. Depuis que la France est industrialisée, des problèmes de rejets d'eau sale dans les rivières ou dans les nappes se sont posés. M. Lefrou, je pense, vous parlera la prochaine fois de la protection des rivières et de la dégradation éventuelle de la qualité des eaux superficielles.

En France, actuellement, les eaux de distribution publique sont fournies pour moitié par les eaux de rivières et pour moitié par les eaux souterraines.

Les eaux souterraines ne sont pas, au moins quand elles sont proches de la surface, exemptes de dangers de pollution. L'eau qui s'infiltré à la surface du sol est filtrée, c'est exact; nous avons vu que, contrairement à ce que croyaient les anciens, les sels, au moins certains sels, ne sont pas retenus. Les bactéries sont en général bien éliminées par des trajets souterrains relativement réduits. Une étude qui a été faite par le Service Géologique National a consisté à essayer de voir

comment protéger ce système et, dans le cas qui nous intéresse, à construire un mur en béton à voile étanche pour arrêter la propagation ainsi qu'une série de puits pour retirer les eaux polluées.

Aujourd'hui les problèmes se situent essentiellement au niveau des nitrates. Vous savez, que les pratiques agricoles entraînent, soit par l'utilisation d'engrais, soit par les méthodes de culture, un lessivage plus important qu'il ne l'était autrefois des nitrates, et un grand nombre de nappes superficielles en France connaissent des problèmes de potabilité à cause de cette pollution des nappes superficielles par des nitrates.

D'autres polluants industriels posent des problèmes; ce sont en particulier ce que l'on appelle les organo-halogènes volatils, c'est-à-dire les produits comme le trichloréthylène, les détachants industriels et domestiques, qui, on s'en aperçoit maintenant, ne sont absolument pas filtrés par les sables et par le sol et se retrouvent, en teneur plus ou moins grande, dans les eaux souterraines, aussi bien que dans les eaux superficielles.

Les eaux profondes évidemment, l'albien par exemple, sont beaucoup mieux protégées. Je crois qu'actuellement les philosophies sont en train de changer. Autrefois eau superficielle = eau polluée, eau souterraine = eau propre. Aujourd'hui il faut se rendre compte que les traiteurs d'eau, les distributeurs d'eau savent extraire l'essentiel des produits polluants se trouvant dans les eaux, et les qualités d'eaux de surface qui sont finalement amenées chez l'utilisateur, après traitement, sont en général bonnes.

Les eaux souterraines superficielles posent des problèmes de dégradation de la qualité qu'il faut résoudre. C'est actuellement là-dessus que se porte l'essentiel des efforts de recherche, au moins dans nos pays. Dans les pays en voie de développement, il est certain que le premier problème est de trouver l'eau. Dans les pays industrialisés, le premier problème est de protéger la qualité de nos sources. Ici je voudrais citer une chose : la ville de Paris intra-muros s'alimente en eaux exclusivement souterraines et a, depuis le début du siècle,

été chercher ses ressources en eaux soit à l'albien, mais assez peu, soit à des sources relativement éloignées comme les sources de la Vanne qui se situe dans l'Yonne, à environ une centaine de kilomètres de Paris. Le fameux aqueduc de la Vanne, qui traverse la forêt de Fontainebleau et arrive jusqu'à Paris, distribue ces eaux de source d'excellente qualité. La ville de Paris, déjà à la fin du siècle dernier, a pris la précaution d'acheter la forêt d'Ott, ou de se faire attribuer au moins la forêt d'Ott pour que les sources de la Vanne qu'elle capte ne soient en aucun cas polluées. Elle a donc interdit toute activité industrielle et toute activité agricole de façon à protéger l'aire dans laquelle les eaux souterraines se rechargent et s'infiltrent et arrivent à alimenter ces sources, ce qui a maintenu, bien sûr, dans ces fameuses sources de la Vanne une qualité d'eau absolument remarquable.

Je crois que le problème se pose aujourd'hui en ces termes: est-ce que nous saurons réserver un certain nombre d'espaces géographiques pour produire dans les nappes superficielles des eaux souterraines de qualité tout à fait irréprochable ou faudra-t-il que chacun des captages souterrains soit également dépollué, d'une façon ou d'une autre, industriellement comme les eaux de surface, pour éviter ces problèmes dont je vous ai parlé ?

Le dernier point que je voudrais aborder est celui de la nappe albienne. Depuis longtemps, on s'interroge sur les raisons qui ont conduit les Pouvoirs Publics à empêcher tout nouveau prélèvement dans la nappe albienne. Il y a eu un certain nombre de discussions, de propositions qui ont été faites pour utiliser cette ressource, qui est quand même très belle, parce que c'est de l'eau de parfaite qualité. Les parisiens connaissent probablement la fontaine du square Lamartine, dans le 16ème arrondissement, qui est alimentée par cette fameuse nappe albienne et que certains considèrent comme de l'eau à mettre en bouteille; certains parisiens vont s'alimenter toutes les semaines à cette fameuse source pour avoir de l'eau tout à fait irréprochable. Mon opinion personnelle est que cette eau est mise de côté pour l'avenir.

Pour mettre en clair : si Tchernobyl s'était passé en France, que ce serait-il passé ? La surface du sol serait contaminée par les

retombées radio-actives; ces retombées se trouveraient lessivées et tout d'abord en partie dans les rivières. Il est inévitable que certains radionucléides se retrouveraient dans les eaux superficielles (l'iode, par exemple, est lessivable) et au bout d'un certain temps se retrouveraient dans les eaux souterraines peu profondes. Mon point de vue est qu'actuellement l'Administration souhaite conserver cette eau pour un avenir lointain, mais pas complètement inimaginable, où un accident considérable pourrait rendre problématique l'alimentation en eau de Paris.

GHISLAIN DE MARSILY
PROFESSEUR A L'ÉCOLE DES MINES DE PARIS