Master Professionnel « Eaux Souterraines »
Cours d'hydrogéologie

Octobre 2007

François Renard

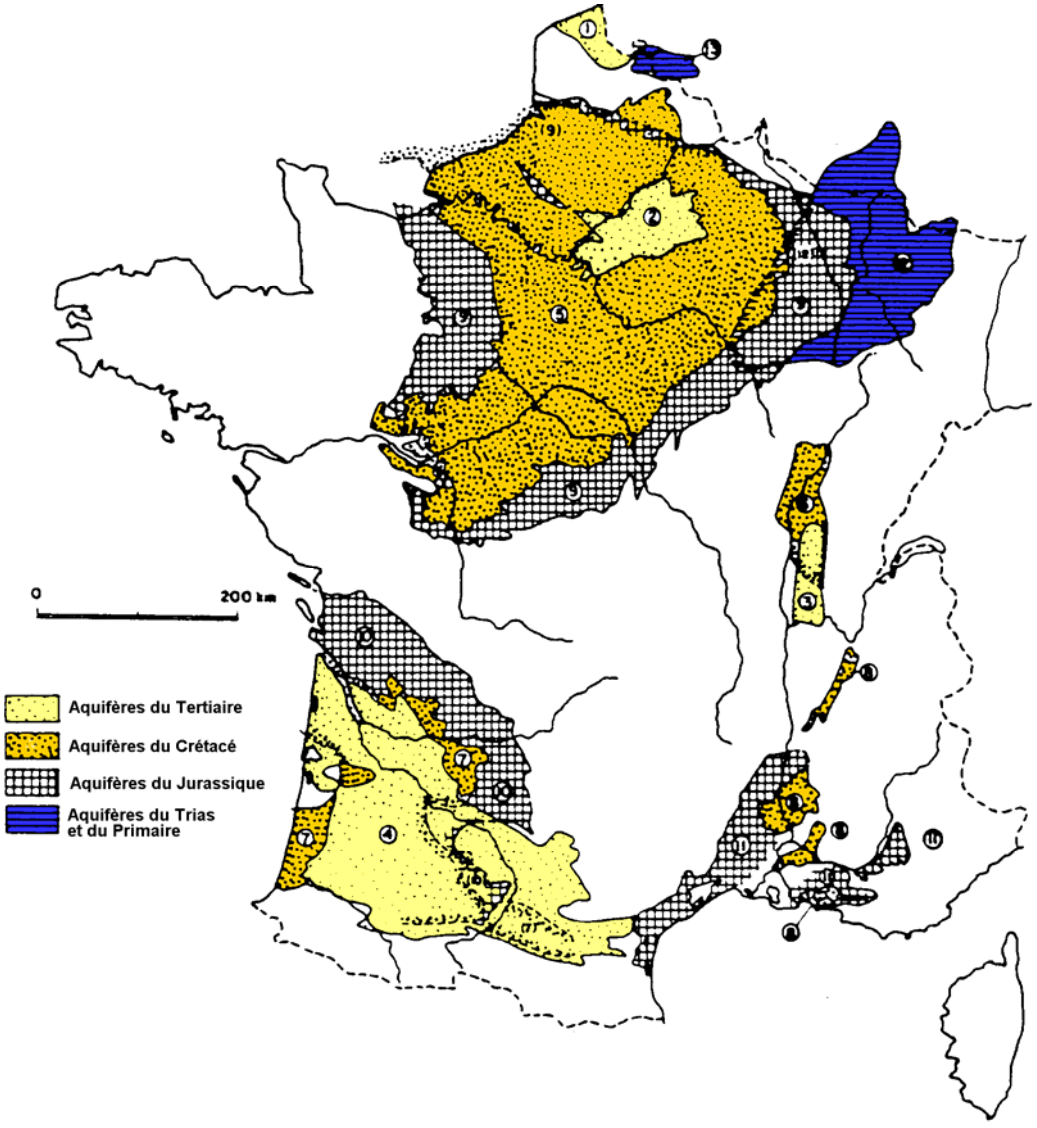


Table des matières

1 Hydrogéologie générale, cycle de l'eau : les différentes phases, volumes, flux, vitesses 4
1.1 Quelques chiffres sur l'eau 4
1.2 Propriétés de l'eau 4
1.3 Les différents types d'eau 4
1.4 Les origines des eaux souterraines 4
1.5 Les réservoirs d'eau à la surface du globe 5
1.6 Systèmes et temps de résidence 5
1.7 Le cycle hydrologique 6
2 Nappes et eaux souterraines 6
2.1 Notion d'aquifère 6
2.2 Aquifères fluviatiles 9
2.3 Ecoulements en milieux karstiques 11
2.4 Ecoulement dans les milieux fissurés 14
2.5 Cônes de déjection 15
2.6 Eboulis 15
2.7 Moraines glaciaires 16
2.8 Plis 16
2.9 Barrage naturel par éboulement 16
2.10 Formations du substratum et contrôle par la tectonique 17
3 Cartes et coupes hydrogéologiques 18
3.1 Hydroisohypses et surface piézométrique 18
3.2 Cartes hydrogéologiques: symboles importants 18
3.3 Axes d'écoulement 19
3.4 Interprétation des axes d'écoulement 19
3.5 Construction de cartes hydroisohypses 21
4 Propriétés pétrophysiques des roches 22
4.1 Porosité – Perméabilité 22
4.1.1 Porosité (n, ϕ) 22
4.1.2 Perméabilité (k) 23
4.1.3 Conductivité hydraulique (K) 23
4.1.4 Granulométrie et connectivité 24
4.2 Milieu isotrope - anisotrope 25
4.3 Conductivité hydraulique moyenne 25
4.4 Coefficient d'emmagasinement (S_s, S) 25
4.5 Eau gravitaire et eau de rétention 25
5 Transport d'un fluide en milieu poreux 27
5.1 Potentiel de l'eau 27
5.2 Expérience de Darcy 28
5.3 Mesures du gradient hydraulique 29
5.4 Diffusion et dispersion dans l'eau d'un aquifère 30
5.5 Application de la loi de Darcy 31
5.5.1 Calcul de la ligne piézométrique 31
5.5.2 Puits en nappe libre 32
5.5.3 Puits artésien ou en nappe captive 34
5.5.4 Évaluation de la transmissivité et de la perméabilité d'une nappe aquifère 34
5.5.5 Cas où la ligne piézométrique n'est pas horizontale 36
5.6 Ce que ces équations permettent de prédire 36
6 Exemples de grands aquifères 37
6.1 Le bassin de Paris 37
6.2 Le bassin du Sahara 40
6.3 Interface eau salée – eau douce 42
7 Détérioration de la qualité de l'eau 42
7.1 Vulnérabilité des nappes à la pollution. 43
7.2 Principaux types et origine des pollutions 43
7.2.1 Pollution temporaire et pollution chronique 43
7.2.2 Pollution ponctuelle et pollution diffuse 44
7.2.3 Origine de la pollution 44

7.2.4 La pollution minérale 45
7.2.5 La pollution organique 45
7.2.6 La pollution microbiologique 46
7.3 Défenses naturelles contre les pollutions 46
7.3.1 Rôle protecteur des sols 46
7.3.2 Rôle épurateur du couvert végétal et des organismes 46
8 Définitions 47
9 Bibliographie 47

Version téléchargeable à l'adresse: http://lgca.obs.ujf-grenoble.fr/perso/frenard/index.htm

L'hydrogéologie est la **science de l'eau souterraine**. C'est une discipline des sciences de la terre qui a pour objectifs l'étude du rôle des matériaux constituant le sous-sol et les structures hydrogéologiques (aquifères) et, par acquisition de données numériques par la prospection ou l'expérimentation sur le terrain, de permettre la planification des captages, ainsi que l'exploitation et la gestion de l'eau souterraine. L'hydrogéologie se spécialise dans la recherche et l'exploitation des eaux souterraines à usage domestique ou industriel et étudie comment les matériaux géologiques influencent la circulation et la qualité des eaux souterraines. Outre des connaissances géologiques, l'hydrogéologue doit posséder de bonnes connaissances en hydraulique. Il intervient en effet dans la recherche et l'exploitation du gisement de la nappe aquifère, dans l'étude de la qualité des eaux ainsi que dans leur protection. L'hydrogéologue doit être capable d'estimer la quantité et la qualité de l'eau et prédire son comportement dans les aquifères.

1 Hydrogéologie générale, cycle de l'eau : les différentes phases, volumes, flux, vitesses

1.1 Quelques chiffres sur l'eau

Quelques chiffres : Tout d'abord, rappelons que l'eau douce ne représente que 3% des ressources en eau mondiale, dont l'eau salée constitue 97%. D'autre part, les eaux souterraines représentent 30% de ces réserves mondiales en eau douce. En France, 45% de l'eau potable est fournie par l'eau souterraine, l'autre partie provenant des eaux de surfaces (lacs, rivières). Enfin, dans ces 45%, les karsts en fournissent la moitié : ¼ de l'eau potable en France provient d'aquifères karstiques (Montpellier, Dijon, Besançon, Paris, …).
Aux Etats Unis, en moyenne, un américain utilise environ 105 gallons d'eau par jour (1 gallon = 3.5 litres environ). Ceci inclut l'usage personnel uniquement. Les utilisations d'eau les plus coûteuses sont les chasses d'eau, les douches et la consommation d'eau reliée à l'entretien des jardins (arrosage) et au lavage des voitures. Pour économiser l'eau de manière significative, on cherche à diminuer les arrosages des pelouses, à développer des pommes de douche à faible consommation et à réduire le volume des chasses d'eau sans réduire leur puissance.

1.2 Propriétés de l'eau

- Molécule rigide et liaison hydrogène
- Masse volumique de 999.8 km/m^3 à 0 degré Celsius et 958.4 km/m^3 à 100 degrés (maximale à 3,98 degrés, 999.972 kg/m^3)

substance	densité ρ (kg/m^3)	viscosité moléculaire μ (Ns/m)	vitesse typique u (m/s)
eau	1000	$1{,}15\ 10^{-3}$	5
air	1,3	$1{,}75\ 10^{-5}$	40
glace	917	10^{8} à 10^{15}	10^{-6}
roche	2500 à 3000	10^{17} (gypse)	10^{-9} (lithosphère)

1.3 Les différents types d'eau

Une roche contient de l'eau sous différentes formes :

- Eau de constitution entrant dans la structure cristalline des minéraux (le gypse par exemple a pour formule $CaSO_4$, $2H_2O$) ;
- Eau adsorbée à la surface des minéraux par des interactions électrostatiques ;
- Eau non libre située dans les pores fermés et inclusions fluides ;
- Eau libre circulant dans les pores et les fissures.

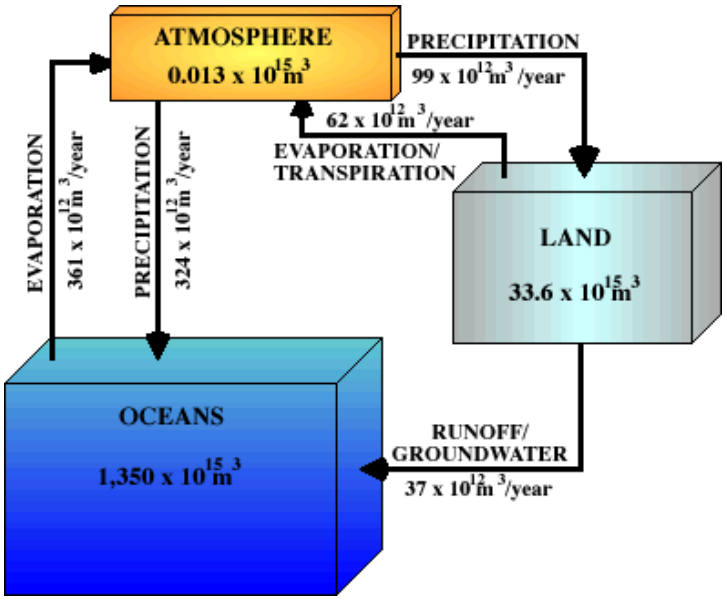
1.4 Les origines des eaux souterraines

Eaux météoriques : La plupart des eaux souterraines ont une origine météorique, c'est à dire proviennent des précipitations (pluie, neige) et de leur infiltration dans le sous-sol. Dans les aquifères de grande taille, l'eau peut provenir de périodes où le climat était différent et peut donc servir d'indicateur de paléoclimats.

Eaux connées : Les eaux que l'on trouve en profondeur dans la croûte terrestre (à partir de 1 à 2 km) sont dérivées de réservoirs d'eaux météoriques qui ont réagi avec les roches environnantes. Souvent ces eaux sont relativement salées. Les eaux connées peuvent contribuer à l'hydrologie de formations géologiques qui se sont enfouies très récemment (Gulf Coast aux USA) ou bien rester piégées dans des roches dont la perméabilité est très faible et dont toute l'eau n'a pas été expulsée. Souvent cette eau est présente depuis la formation de la roche.
Eaux juvéniles : Ces eaux sont libérées directement par des processus magmatiques en profondeur. Elles sont difficilement distinguables des eaux situées en profondeur, par exemple l'eau remplissant le forage profond (11 km) dans la péninsule de Kola en Russie. Les processus magmatiques peuvent relâcher, en plus de l'eau, des composés gazeux (CO_2) par exemple.

1.5 Les réservoirs d'eau à la surface du globe

Océans, 97.3%
Calottes polaires et glaciers, 2.14%
La fonte de l'Antarctique correspondrait à une montée des océans de 65 m. Cette hauteur serait de 6 m pour la fonte des glaces du Groenland et de 2 m pour la fonte de tous les autres glaciers.
Eaux souterraines, 0.61%
Eaux de surface, 0.009%
Lacs salés et mers intérieures, 0.008%
Humidité du sol, 0.0005%
Atmosphère, 0.001%



1.6 Systèmes et temps de résidence

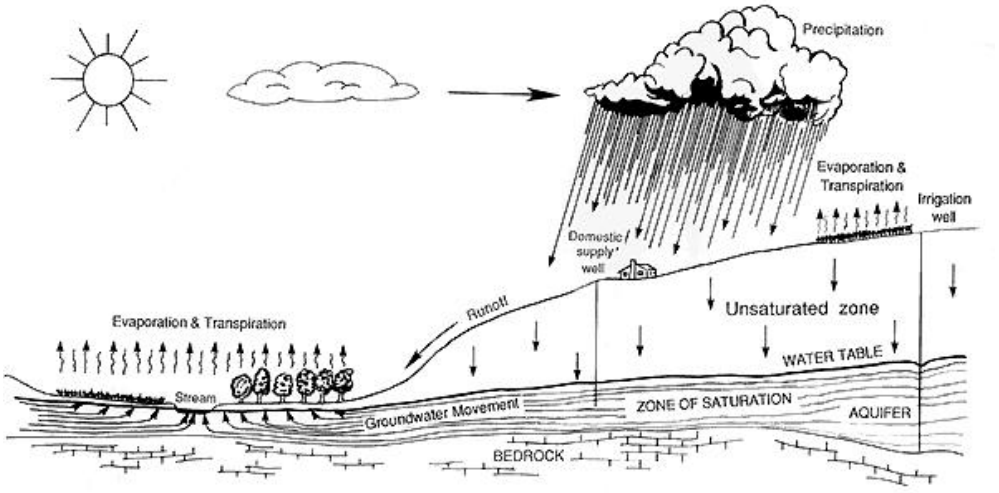
Un sous système est une partie discrète d'un système plus grand. Par exemple, un océan est un sous système du cycle hydrologique global. On parle généralement du temps de résidence de l'eau dans un sous système particulier. Si ce sous système est très grand et la vitesse d'échange de l'eau avec les autres sous systèmes est lente, le temps de résidence d'une molécule d'eau sera élevé. A l'inverse, si la vitesse d'échange est grande et le sous système petit ; le temps de résidence sera faible. On définit ainsi :

temps de résidence = volume du sous système / vitesse d'échange

Par exemple, le volume total des océans est d'environ 1.35×10^9 km^3. La vitesse d'échange avec l'atmosphère et les rivières est d'environ 3.7×10^4 km^3 par an. Le temps de résidence est donc de l'ordre de 36500 ans. Le volume de l'eau dans l'atmosphère est d'environ 1.3×10^4 km^3. Le flux moyen annuel d'évaporation est de 4.2×10^5 km^3. Cela donne un temps moyen de résidence de 0.031 an soit 11 jours.
Ce concept est important en hydrogéologie car un aquifère est souvent de grande taille et les flux vers d'autres aquifères ou vers la surface sont relativement faibles. Cela signifie que les eaux souterraines ont des temps de résidence variant entre quelques jours à plusieurs milliers d'années. En comparaison, les rivières et l'atmosphère ont des temps de résidence de quelques jours à quelques semaines. Ainsi il beaucoup plus facile et rapide de dépolluer une rivière qu'un aquifère où il faudra plusieurs années pour chasser les polluants.

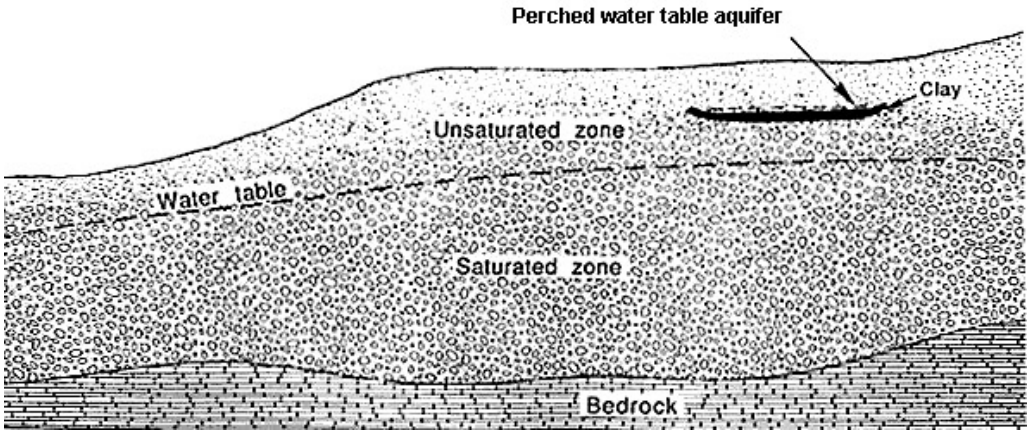
1.7 Le cycle hydrologique

Le cycle hydrologique décrit le constant mouvement de l'eau sur et sous la surface de la terre. L'eau passe des états solides, liquides et gazeux dans ce cycle. La condensation, l'évaporation et la solidification se produisent lors de variations climatiques. L'énergie solaire est la source d'énergie du cycle qui permet une évaporation intense à la surface des océans et à moindre niveau à la surface des continents. La gravité complète le cycle en ramenant les précipitations sur la surface puis dans les ruissellements.



Quand elle s'infiltre dans le sol, l'eau rencontre différentes régions :

- **La zone non saturée** (ZNS) où les pores sont remplis partiellement d'eau et partiellement d'air.
- **La frange capillaire** où l'eau remonte de la zone saturée vers la zone non saturée. Cette région correspond à la partie inférieure de la zone sous saturée.
- **La zone saturée** (ZS) (phréatique)

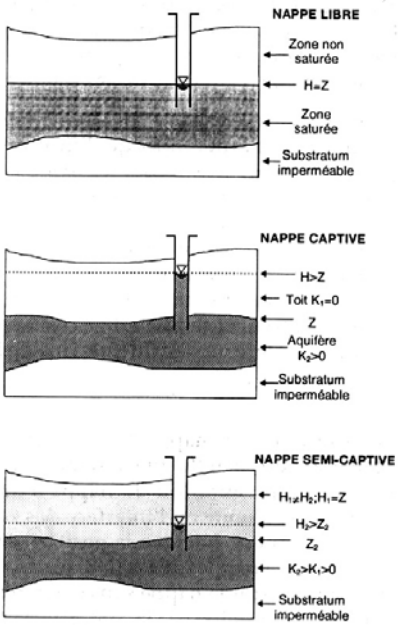


2 Nappes et eaux souterraines

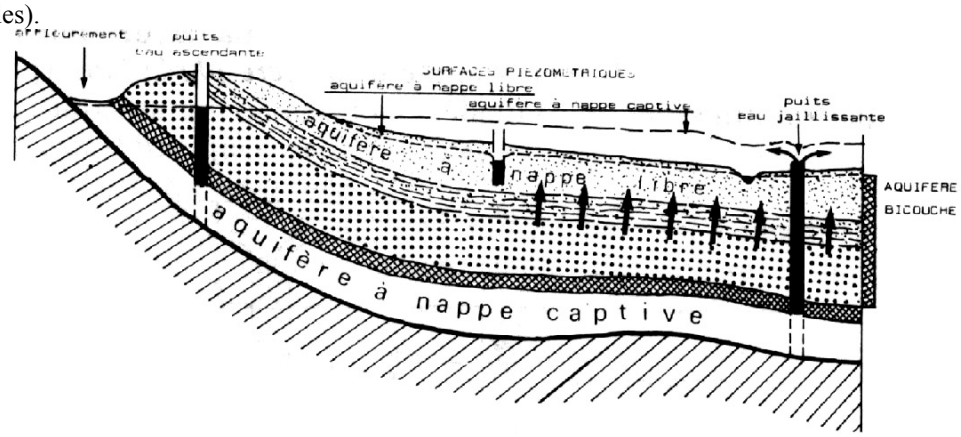
2.1 Notion d'aquifère

On appelle **nappe aquifère** l'ensemble 3D de l'eau circulant dans un milieu perméable et surface piézométrique sa surface supérieure d'équilibre. Cette limite est réelle dans le cas de nappes libres et virtuelles dans le cas de nappes captives. Une nappe est dite libre quand aucun niveau imperméable ne la recouvre. Elle est dite captive lorsqu'elle est recouverte par un horizon imperméable à une cote inférieure à celle de la surface piézométrique. La notion de «gisement» ou de «réservoir» d'eau souterraine implique son exploitation possible (par exemple par pompage) en vue de l'alimentation en eau d'une usine ou d'une agglomération.

Typologie des nappes : (a) libre ; (b) captive ; (c) semi-captive

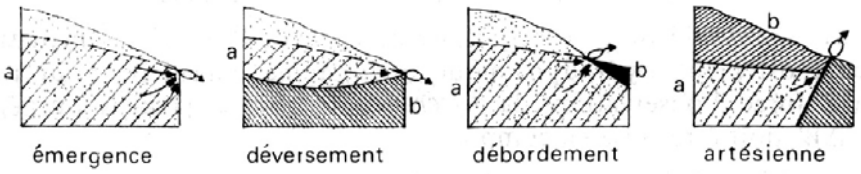


La surface piézométrique correspond à la pression hydrostatique de la colonne de l'eau. La limite supérieure de l'aquifère peut également être recouverte par une couche moins perméable: on parlera alors du **toit** de la nappe. La limite inférieure d'un aquifère est donnée par une formation géologique à relativement faible perméabilité. Si le corps même de l'aquifère est de nature particulaire (sable, gravier, cailloux...) et le fond est formé par une masse rocheuse massive on appellera ce fond «substratum imperméable». Il est important de noter que le terme «aquifère» peut être associé à n'importe quelle formation géologique selon l'intérêt hydrogéologique et pratique. La formation rocheuse massive peu perméable désignée auparavant «substratum imperméable» peut devenir l'aquifère d'intérêt dans un contexte diffèrent (par exemple absence d'autres formations plus perméables).



Types hydrodynamiques d'aquifères dans un bassin hydrogéologique.

Dans les aquifères plus profonds, les eaux souterraines peuvent être emprisonnées dans des formations hydrogéologiques perméables, entre deux formations imperméables fixes: le substratum à la base et le toit au sommet. La surface piézométrique se situe alors généralement au-dessus de la ZS de cet aquifère, il s'agit d'une nappe captive. S'il s'agit d'un aquifère peu profond, cet aquifère affleure probablement à un niveau plus élevé, et c'est le niveau de l'affleurement qui déterminera la pression hydrostatique de la colonne d'eau (surface piézométrique). S'il s'agit d'un aquifère profond, la pression exercée sur les eaux contenues dans les pores sera contrôlée par la pression exercée par le poids des couches superposée, voir l'exemple du bassin de Paris. Un toit imperméable se trouve donc au-dessus de la nappe, la nappe est contrainte par cette couche imperméable. L'eau est au niveau du toit imperméable et ce niveau est inférieur à celui de la pression hydrostatique (surface piézométrique); la nappe est contrainte de rester «en bas» vu l'impossibilité de passer à travers la couche imperméable.

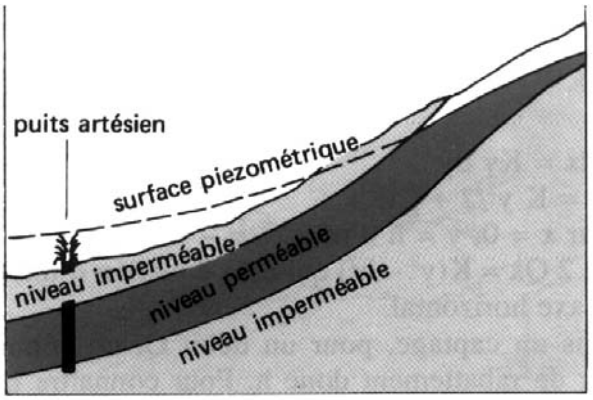


Principaux types de sources. D'après J. Bodelle et J. Margat (1980).
a, aquifère ; b, formation hydrogéologique imperméable.

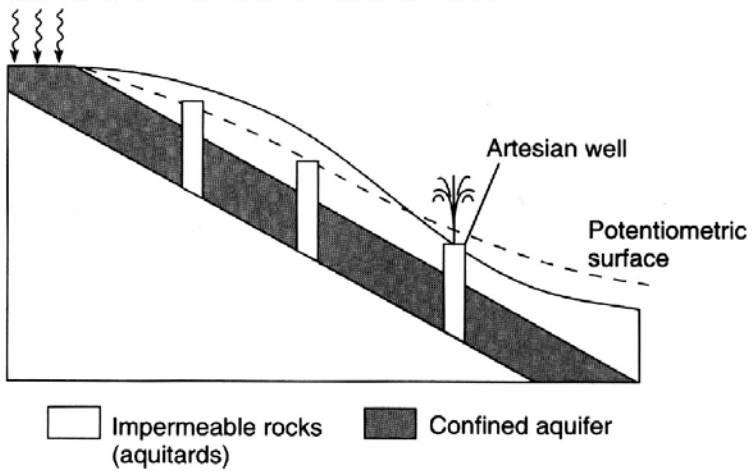
De manière générale il est à noter que la notion d'aquifère est relative, voir arbitraire. Elle est fonction des caractéristiques hydrogéologiques (perméabilité, étendue, exploitabilité...) d'une couche particulière plus favorable que les couches environnantes. Ainsi, un aquifère s'écoulant dans les alluvions d'une rivière pourrait avoir comme substratum imperméable des grès micacés. Ces mêmes grès, relativement peu perméables comparés aux alluvions, peuvent être désignés comme aquifère d'intérêt cas d'absence de formation plus favorables (sable graviers...) et/ou exploitables. Les réserves d'un aquifère ainsi que les débits de pompage admissibles varient donc fortement en fonction de la nature de 1'aquifère.
On distingue:

- **La zone de ruissellement:** Ecoulement de l'eau non canalisé en surface ou en sous-sol. Les eaux de ruissellement atteignent finalement une nappe phréatique, un cours d'eau ou un plan d'eau
- **La zone d'infiltration** de l'aquifère où l'eau percole à travers la ZNS vers la ZS.
- **La zone d'alimentation** est identique à la zone d'infiltration sauf s'il s'agit d'une alimentation souterraine d'une nappe phréatique.
- **Les zones d'émergences** de l'aquifère où celui-ci atteint la surface du sol (sources de trop plein ou sources artésiennes...) et
- Les **zones de mélange** avec d'autres aquifères, eaux de lac, eaux salées...

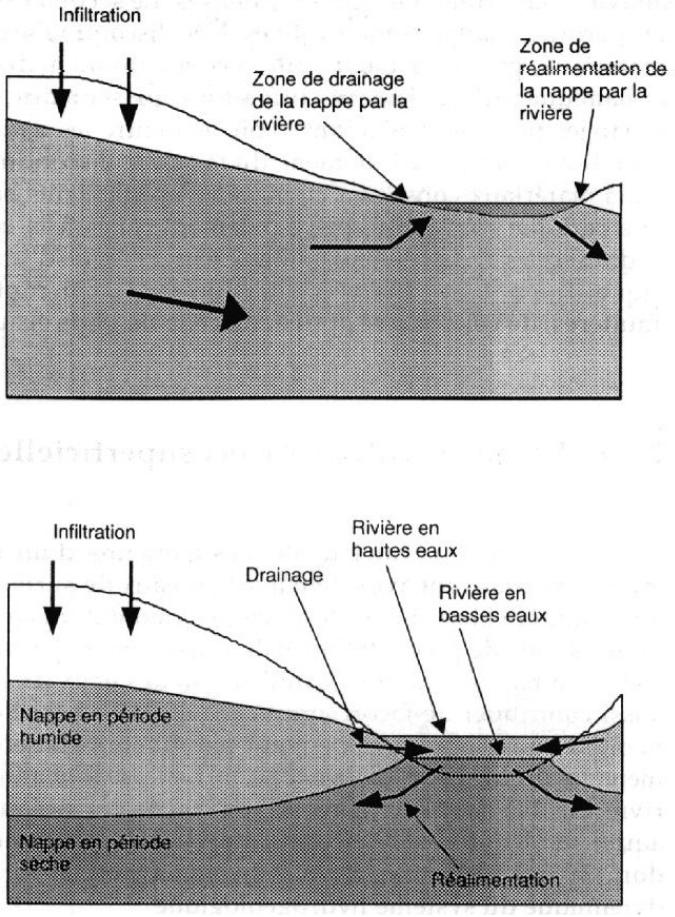
Généralement l'eau contenue dans l'aquifère s'écoule vers une zone plus profonde ou un déversoir (source). Il faut donc introduire des notions tenant compte des directions et des vitesses d'écoulement.



Exemple schématique d'une nappe libre devenant captive sous recouvrement imperméable.



Échanges entre les eaux superficielles et souterraines :
(a) variation spatiale du sens des échanges ; (b) variation temporelle du sens des échanges



2.2 Aquifères fluviatiles

L'eau s'écoule dans les matériaux déposés par un cours d'eau ancien ou actuel (généralement alluvions). Le substratum imperméable en dessous de ces matériaux est formé :

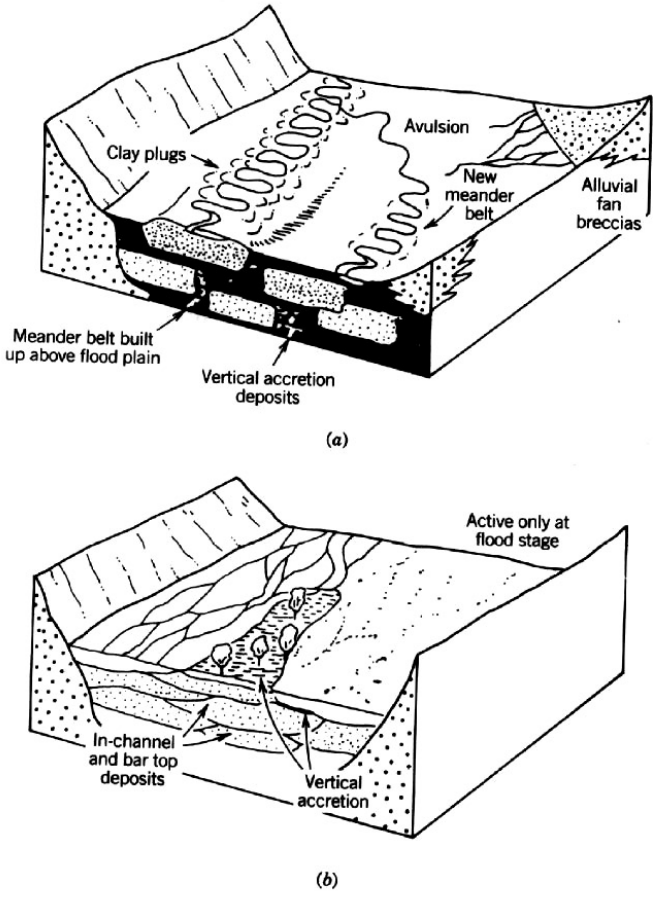
- soit par la roche compacte en dessous de la formation alluviale perméable.
- soit par des dépôts d'argile dans les alluvions sous forme de lentilles. Il y a possibilité d'étagement de lentilles, sans échange d'eau entre les compartiments. Dans ce cas on aura plusieurs aquifères superposés, avec des caractéristiques chimiques (charge ionique) et surtout physiques (charge hydrostatique) différentes (aquifère «bicouche» ou «multicouche»).

Il est à noter qu'en tête d'une rivière, la pente est généralement plus faible et par conséquent l'écoulement est plus lent, ce qui induit le dépôt des fines particules (limons, argiles). Il y a donc accumulation de fines particules (argiles, limons, …), suivi du colmatage des cavités en surfaces, ce qui forme finalement une barrière plus ou moins étanche à l'infiltration. Par conséquent, les matériaux constituant les plaines sont généralement peu perméables, et les niveaux piézométriques des nappes souterraines ont par conséquent tendance à s'approcher de la surface avec affleurements possibles de la nappe. Ce phénomène est à l'origine des remontées d'eau dans la plaine du Drac au confluent de l'Isère et du Drac en dessous de la ville de Grenoble. Les caves du cours Berriat sont souvent inondées par les eaux de la nappe en période de crue. Le dépôt de fines particules est un processus lent impliquant l'historique des différents cours d'eau anciens avec des écoulements plus ou moins importants et donc des dépôts d'épaisseur variable de couches d'argiles.

Le passage de l'eau à travers les alluvions mélangées à des sables et des limons implique une bonne filtration de l'eau naturelle. L'eau sortant après un trajet suffisamment long est donc exemptes de particules— matière organique, bactérie, particule minérales et même virus — et le contact avec la surface (adsorption-désorption) implique un retard de la «pollution dissoute», le «retard» (correspondant à une série d'étape d'adsorption désorption le long du trajet) est une fonction de l'affinité entre les surfaces minérale constituant l'aquifère et la molécule polluante dissoute, et la granulométrie de l'aquifère (surface de contact). L'absence de lumière, le long séjour, et le passage oxique-anoxique accentuent l'élimination des microorganismes. Les eaux des nappes d'aquifères fluviatiles sont donc en moyenne plutôt «propre». La ville de Grenoble est alimentée par les puits de Rochefort située dans la nappe du Drac (anciennement COGESE, maintenant REG) et la plupart des communes avoisinantes dans les plaines sont alimentées par le SIERG (Syndicat Intercommunal de la Région Grenobloise) qui pompe son eau dans la nappe de la Romanche et dans l'Eau d'Olle. Dans les deux cas un traitement des eaux pompées n'est pas nécessaire. Grenoble est une des rares villes de grande taille profitant d'une eau d'une excellente qualité sans traitement quelconque.

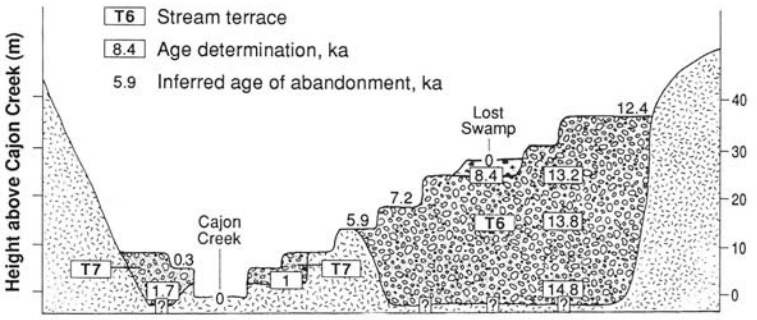
Types de sources en milieu fluviatile :

- **Sources de débordement** (ou sources de trop plein). La nappe libre affleure aux endroits où sa surface atteint le niveau du sol.
- **Sources artésiennes:** Existent uniquement en cas de nappe captive sous charge. La surface piézométrique (et donc la pression hydrostatique) se situe ***au-dessus du sol.*** L'eau est contrainte de circuler en sous-sol vu la présence d'un toit imperméable (argile, limons...). Une conduite traversant la couche imperméable implique donc une source jaillissante.



Contrasting the geometry of meandering (*a*) and braided (*b*) rivers (from Walker and Cant, 1984). Reprinted with permission of the Geol. Assoc. of Canada.

Dans les aquifères fluviatiles, on distingue facilement les zones de ruissellement, les zones d'infiltration (accumulation), les zones de captivités ainsi que les zones sous charge. Il s'agit d'aquifères pouvant être décrits par la loi de Darcy avec des limites ZS - ZNS bien définies, des directions d'écoulement et des effets de pompage relativement facilement prédictibles vu l'homogénéité de l'aquifère ainsi que sa porosité élevée. C'est tout à fait différent pour les aquifères en milieu karstique et en milieu fissuré. Ces milieux se caractérisent par des porosités très faibles (la roche compacte ne présente que peu de fissures) et la présence d'eau à différents étages.

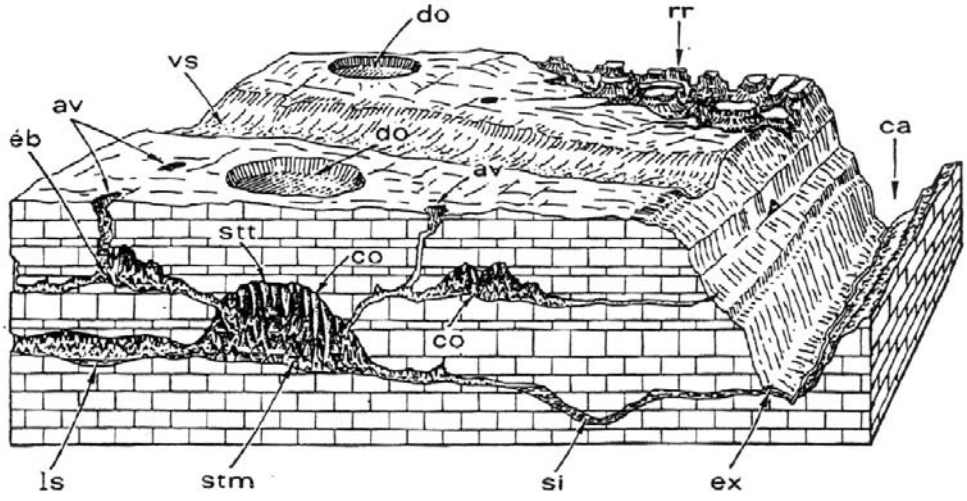


Cross section through the inner gorge of Cajon Creek showing radiocarbon-dated fill and cut terraces and inferred times of terrace-tread abandonment.

2.3 Ecoulements en milieux karstiques

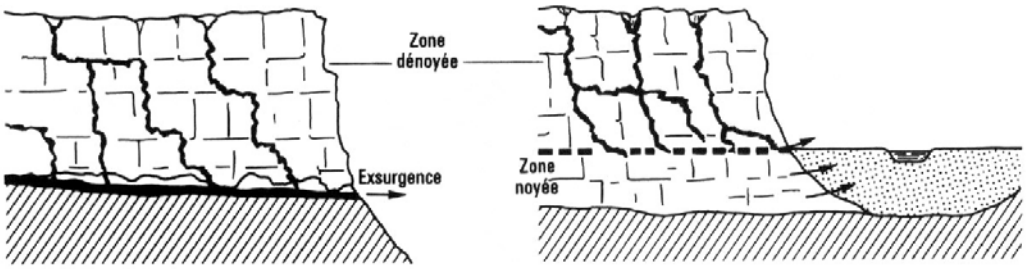
Les régions karstiques possèdent une géomorphologie caractéristique : rareté ou faible épaisseur des sols, présence de gorges, dolines, grottes, gouffres, pertes, résurgences, mais surtout, existence d'un réseau de vides souterrains plus ou moins développé. Le drainage des eaux est géré en majeure partie par ces derniers, ce qui explique souvent la quasi-absence du réseau de drainage superficiel : ruisseaux, rivières, etc.

La dissolution de la calcite $CaCO_3$, constituant principal des formations calcaires est «facile» et dépend du gradient de CO_2 dans le sol. Il en résulte une dissolution de la roche principalement en sous-sol ce qui conduit à la formation de cavités et grottes souterraines. Généralement, la majorité de l'eau s'écoule dans les cavités de grande taille (qui peuvent atteindre plusieurs mètres) ce qui implique une mauvaise filtration de l'eau. Dans les régions correspondantes (Vercors, Chartreuse...) l'infiltration à partir de terrains cultivés produit des eaux chroniquement polluées, surtout au niveau bactériologique (matière fécale des bestiaux, engrais, fuite des réseaux d'eaux usées). L'eau est donc nécessairement traitée (chloration, rayons UV...). La dureté de ces eaux est généralement élevée. Dans la région grenobloise, les communes situées sur les flancs des massifs karstiques s'alimentent souvent dans les résurgences du karst.



modelé karstique

av : aven – ca : canyon – co : colonne – do : doline – éb : éboulis – ex : exsurgence – ls : lac souterrain alimenté par une rivière souterraine – rr : relief ruiniforme – si : siphon – stm : stalagmite – stt : stalactite – vs : vallée sèche.



KARST PERCHÉ ET KARST A BASE NOYÉE

Types de sources en milieu karstique :

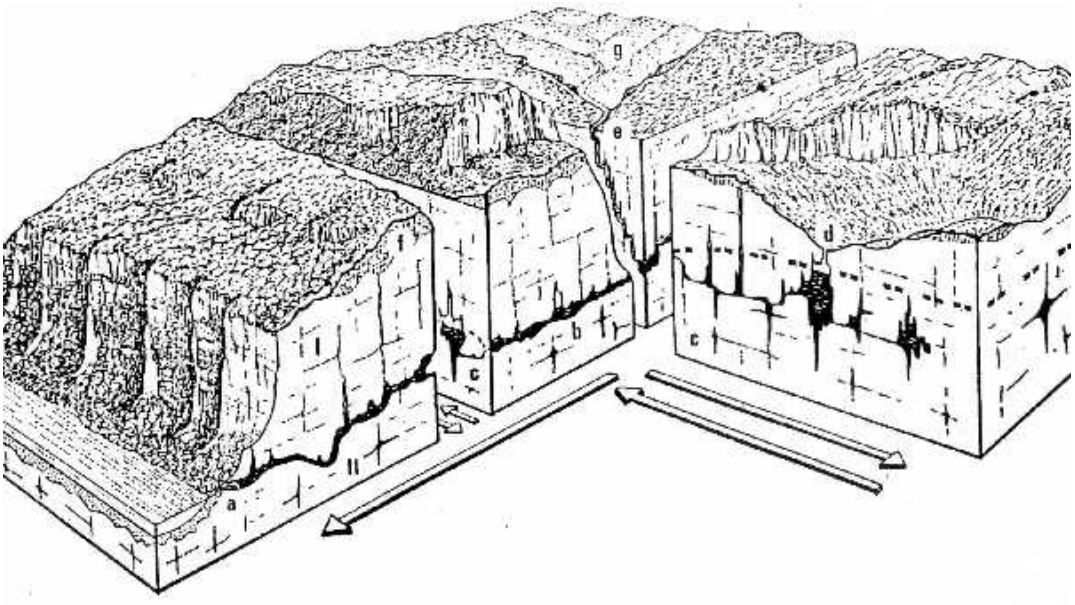
Les eaux circulant dans le massif peuvent émerger par des sources à fort (résurgences) ou faible (sources) débit, à n'importe quelle hauteur par rapport au niveau géographique. Des cascades spectaculaires, des cuves à hauteur modérées, voir des alimentations souterraines (invisibles) des nappes alluviales s'écoulant au fond des vallées parfois profondément entaillées (canyons) sont possibles. A l'extérieur des falaises calcaires, on distingue souvent des «trous» dans les roches correspondant à d'anciens cours d'eau ou à des résurgences asséchées. Les «Cuves de Sassenage» sont un exemple-type d'une résurgence du milieu karstique. L'eau des cuves de Sassenage était captée, traitée et alimentait les localités environnantes.

Le terme "karst" recouvre aussi bien les différents processus à l'origine de ces caractéristiques que les paysages où ceux-ci ont leur siège. Notons que l'origine étymologique du mot germanique "karst" réside dans le mot indo-européen "kar" signifiant rocher et le mot slovène "kras", nom d'une région de Yougoslavie où ces phénomènes karstiques sont particulièrement spectaculaires.

Répartition géographique :

Le karst est présent sur tous les continents. Les principales régions karstiques connues se trouvent :

- dans le bassin méditerranéen, essentiellement en Algérie, à Chypre, en Espagne, en France, en Grèce, en Italie, au Maroc, en Tunisie, en Yougoslavie et au Liban ;
- en Amérique du Nord et en Amérique centrale, ainsi que dans le bassin des Caraïbes : entre autre aux Bahamas, à la Barbade, au Belize, à Cuba, aux Etats-Unis, au Guatemala, en Haïti, à la Jamaïque, au Mexique, à Porto Rico et en République dominicaine ;
- en Asie du Sud et du Sud-est, en particulier en Chine, au Cambodge, au Laos et Viêt-nam ;
- en Océanie : Australie, Indonésie, Java et Papouasie-Nouvelle-Guinée;
- en Afrique subsaharienne : de rares phénomènes karstiques sont signalés dans des formations carbonatées, telles les formations du Katangien (Katanga, Congo-Zaïre).



Importance économique et ressources en eau :
Economie et développement : L'importance des ressources du karst et le contexte actuel économique, de gestion et de protection des ressources en eau, placent l'étude de ces aquifères comme une priorité. En France, l'exploitation des aquifères karstiques a tout d'abord été raisonnée et réservée aux besoins locaux sans engendrer de problèmes de tarissement des points d'eau. La principale préoccupation des organismes de contrôle était de recenser les sources et de définir leur provenance afin de mettre en place des périmètres de protection. A partir des années 80, du fait notamment de l'intensification de l'agriculture, une exploitation anarchique des ressources a vu le jour, entraînant aussi la contamination des eaux souterraines. Il s'ensuit aujourd'hui une politique de recherche du fonctionnement de ce milieu afin d'en évaluer les possibilités maximales d'exploitation et ses conséquences. Au niveau national par exemple, de nombreux bureaux d'étude et organismes de recherche (BRGM, IRD) sont impliqués dans l'étude de ces aquifères. Au niveau international, notons au passage l'importante extension du karst en Chine (environ 500000 km^2) où de nombreux efforts sont faits pour mettre en valeur cette ressource (réseaux d'alimentation en eau potable, irrigations, barrages souterrains hydroélectriques…). Néanmoins, dans de nombreux pays, l'exploitation du karst demeure souvent empirique, du fait d'une connaissance encore incomplète des phénomènes. Le nombre de forages profonds de reconnaissance précédant l'exploitation d'aquifères karstiques, ou encore les problèmes de simulation hydrologiques en sont de bons exemples.

Nous allons maintenant regarder quels sont les mécanismes qui déterminent le comportement de ces aquifères complexes et quelles sont les méthodes pour les étudier.

- *Les mécanismes de karstification* : Le processus est basé sur la dissolution de la roche par l'eau circulant dans ses interstices. Regardons donc tout d'abord quelle est la nature du milieu siège de cette karstification. Les roches solubles les plus communes sont le calcaire et la dolomie, qui sont essentiellement composés de carbonate de calcium ($CaCO_3$) et de magnésium ($Ca,Mg)(CO_3)_2$. On trouve à un degré moindre, des traits karstiques dans d'autres roches solubles : les marnes (mélange d'environ un tiers de calcaire et deux tiers d'argile), le gypse ($CaSO_4$, $2H_2O$), le sel gemme (NaCl) et même dans certaines roches ignées ou volcaniques (basaltes). Les roches carbonatées, qui constituent environ 15% des roches sédimentaires, se distinguent des autres roches par leur solubilité relativement élevée, propice à l'apparition des caractéristiques à la fois superficielles et souterraines propres au karst. Paradoxalement, ces roches sont à l'origine peu perméables. Par exemple, pour le calcaire, la conductivité hydraulique est d'environ 10^{-8} $m.s^{-1}$ avec une porosité faible. Le calcaire étant une roche compétente (cassante), les contraintes infligées à la roche au cours de son histoire géologique génèrent de nombreuses déformations (plis, failles, chevauchements…). Ces dernières donnent naissance à une conductivité hydraulique dite de fissure de l'ordre de 10^{-6} $m.s^{-1}$. L'eau s'écoulant dans ces fractures va alors pouvoir dissoudre la roche.

Le mécanisme de dissolution
Rappels:
Pour dissoudre le calcaire, l'eau a besoin d'un caractère agressif. Celui-ci dépend de la teneur en CO_2 dissout dans l'eau. D'autre part, la phase gazeuse du sol est très enrichie en CO_2 par rapport au gaz atmosphérique. Quelques ordres de grandeur de saturation de la phase liquide (l'eau) vis-à-vis de la calcite ($CaCO_3$) :

- Eau pure : 12 $mg.l^{-1}$ de $CaCO_3$,
- Eau en équilibre avec l'atmosphère : 50 $mg.l^{-1}$ de $CaCO_3$
- Eau en équilibre avec le gaz du sol : 300 $mg.l^{-1}$ de $CaCO_3$.

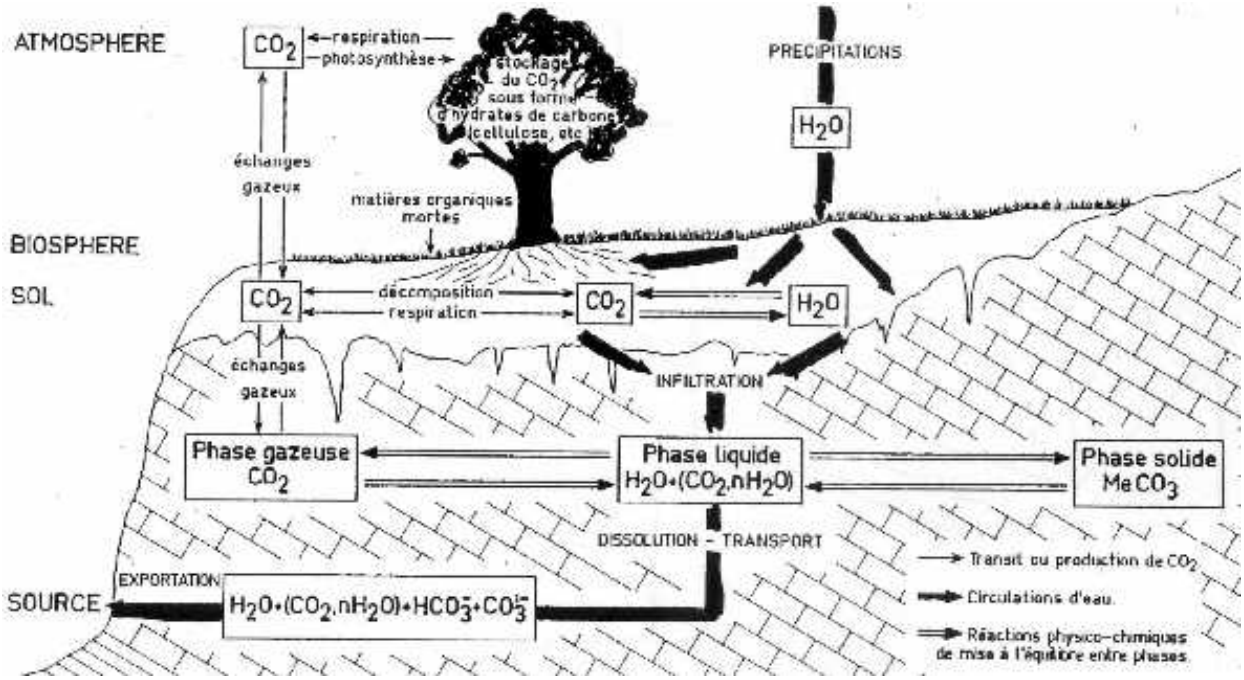
Le processus chimique de dissolution est tri-phasique : phase gazeuse avec le CO_2 dissout, liquide avec l'eau et solide avec la matrice rocheuse carbonatée. Tout d'abord, l'eau s'enrichit en CO_2 au cours de son transit à travers le sol.

$$CO_2(d) + H_2O \Leftrightarrow H_2CO_3 \Leftrightarrow H^+ + HCO_3^-$$

C'est l'acide carbonique H_2CO_3 qui procure à l'eau son pouvoir de dissolution. La solution attaque le calcaire et l'équilibre global de la réaction est le suivant :

$$CaCO_3 + H_2O + CO_2 \Leftrightarrow Ca^{2+} + 2\left(HCO_3^-\right)$$

L'eau acquiert rapidement son équilibre chimique vis-à-vis de la calcite (saturation). Par conséquent, pour que la dissolution du massif calcaire soit efficace, il est nécessaire que la solution soit renouvelée, autrement dit, que l'écoulement soit suffisant. Si c'est le cas, la dissolution élargit les fissures drainantes où l'eau peut alors s'y écouler de manière préférentielle. Le phénomène est alors autoentretenu. Ceci donne naissance à des conduits karstiques de grande dimension.



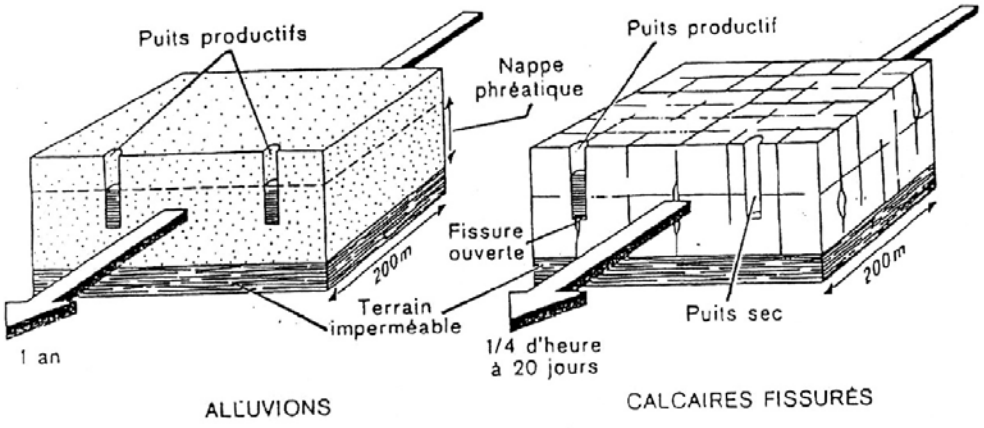
La porosité moyenne d'un massif calcaire ayant été le siège de ce processus de karstification est de l'ordre de 10 à 20%. La perméabilité des drains ou rivières souterraines peut aller jusqu'à 1 $m.s^{-1}$.
Les processus de karstification atteignent leur maximum d'intensité dans les zones présentant les caractères suivants :

- calcaires durs et compacts présentant de nombreux joints ;
- précipitations suffisantes pour apporter d'importantes quantités d'eau ;
- température suffisamment chaude pour permettre la croissance d'une abondante végétation qui produira, par décomposition, le gaz carbonique nécessaire à la dissolution des roches carbonatées ;
- différence d'altitude suffisante entre les zones d'alimentation et les exutoires du réseau pour maintenir le gradient hydraulique nécessaire à la circulation de grandes quantités d'eau.

2.4 Ecoulement dans les milieux fissurés

Il s'agit de distinguer deux types d'écoulement dans les milieux fissurés:

- *Systèmes à fissures courtes (courtes par rapport à l'échelle d'intérêt) et interconnectés, avec un nombre statistiquement important des fissures à grande ouverture.*
  En ce cas, les systèmes sont «homogènes» tels que définis préalablement, et répondent donc, tels les aquifères fluviatiles, à la loi de Darcy. Les ZS et ZNS peuvent être bien définies, les effets de pompage et les directions d'écoulement sont prévisibles. Les bancs de calcaires de grande étendue, fissurés tels qu'on les trouve dans le nord de la France (plusieurs centaines de km de large et de long) sont un exemple pour ce type d'écoulement.
- *Fissures longues par rapport à l'échelle d'intérêt, que partiellement interconnectés et / ou présence de rares grands chenaux.* Ce genre de milieu fissuré est plus complexe et des moins prévisible. Les écoulements ne peuvent être prédits que très difficilement vu qu'on ne connaît généralement pas les chenaux principaux ou passe la majorité de l'eau. Elle peut s'écouler sur plusieurs niveaux dans des directions différentes. La recherche d'eau (puits de forage) ainsi que la réalisation de projets géotechniques implique des «surprises» difficilement prédictibles et parfois dangereuses (chutes d'eau lors de creusement de tunnels).
  On rencontre ce genre de fissuration souvent dans les massifs cristallins. Ces roches (granites, gneiss, amphibolites, micaschistes) ne forment pas de grottes souterraines par dissolution préférentielles en profondeur comme les calcaires. Les fractures résultent donc principalement des contraintes tectoniques et sismiques. Les prédictions des écoulements peuvent être facilitées par la détermination des directions privilégiées des fracturations, des fissurations, des directions d'érosions par étude géologique et/ou analyse d'image satellites.



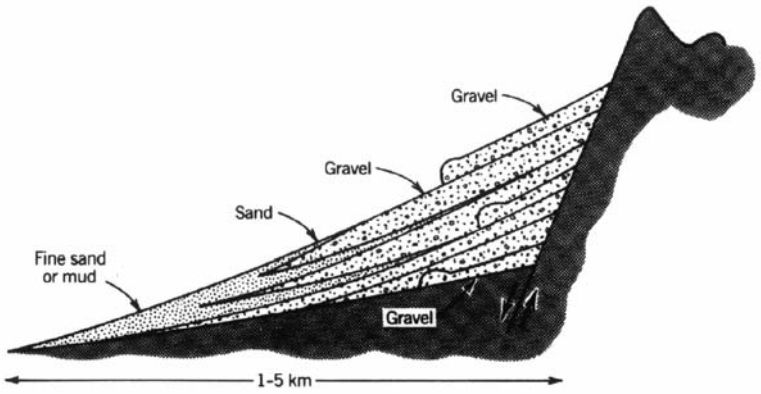
Vitesse d'écoulement des eaux souterraines

Les flèches représentant des productions égales

avec indication du temps nécessaire pour leur obtention

2.5 Cônes de déjection

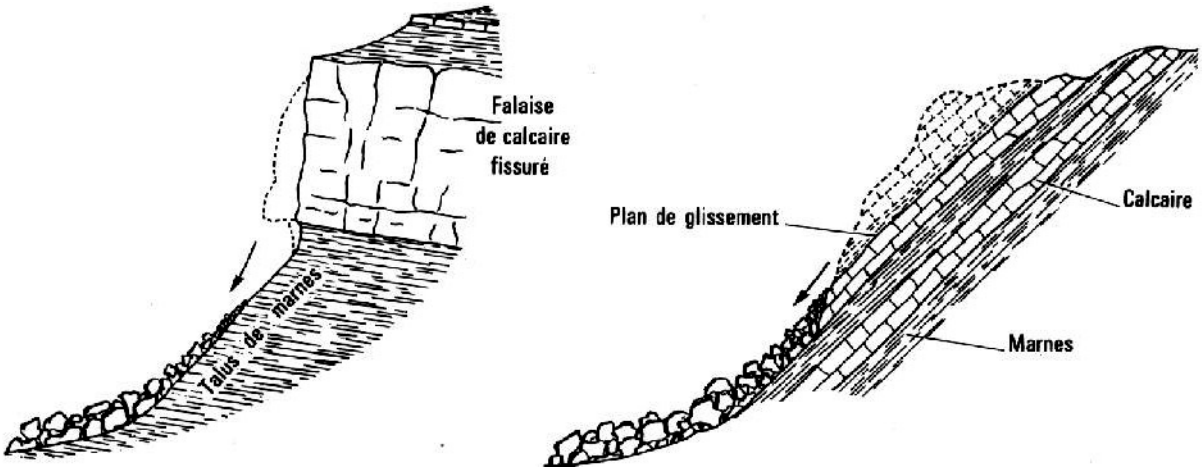
Partie la plus basse d'un torrent où s'accumulent les débris arrachés en amont. La diminution de la pente et donc de la vitesse d'écoulement de l'eau vers la base ainsi que son infiltration dans le cône implique un tamisage naturel avec dépôt des éléments grossiers en haut du cône et des éléments fins en bas du cône. Il y a par conséquent possibilité de rétention de l'eau et existence de sources dans un cône de déjection.



Diagrammatic cross section of an alluvial fan (from Rust and Koster, 1984). Reprinted with permission of the Geol. Assoc. of Canada.

2.6 Eboulis

Accumulation de fragments rocheux déplacés par gravité, pouvant former des talus. Les grands blocs forment la base, et les cailloutis plus fins recouvrent généralement la partie haute des éboulis. Par rapport au cône de déjection, la situation granulométrique est donc inversée. L'eau s'infiltre d'abord lentement en haut pour s'écouler après très rapidement à travers les blocs grossiers vers l'aval. Il n'y a donc pas de retenue d'eau; ce genre de formation ne se prête donc pas au stockage de l'eau (et à la recherche de sources...). De plus la filtration y est très mauvaise.

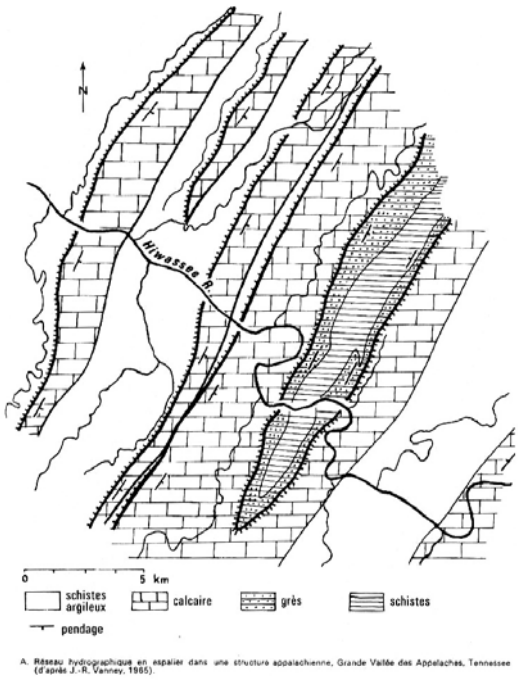


2.7 Moraines glaciaires

La moraine de fond d'un glacier correspond à une colline allongée suivant l'écoulement de la glace. Elle est principalement formée d'argiles et donc imperméable. Inversement, les ***moraines latérales*** regroupent toute la granulométrie, de l'argile à des blocs de diamètre métrique. *L 'arrangement des blocs est désordonné, et il n'y a pas de litage.* Des sources émergent souvent au pied de ces formations perméables.

2.8 Plis

Synclinal *:* Par leur forme correspondant à des cuvettes allongées, les plis synclinaux forment des axes privilégiés d'accumulation et de circulation d'eau.
Anticlinal : Inversement, les plis anticlinaux, dos allongés et érodés, sont des zones d'infiltrations préférentielles.

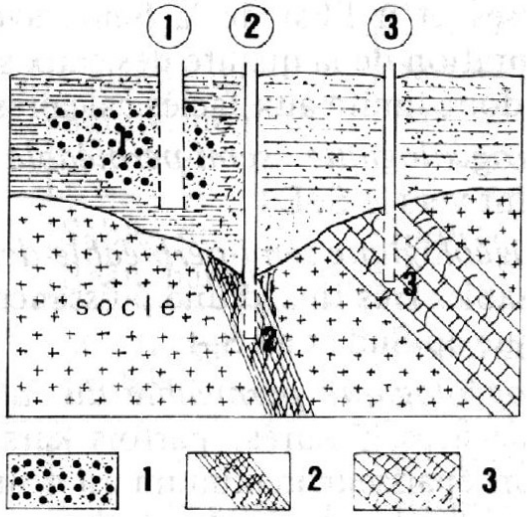


A. Réseau hydrographique en espalier dans une structure appalachienne, Grande Vallée des Appalaches, Tennessee (d'après J.-R. Vanney, 1965).

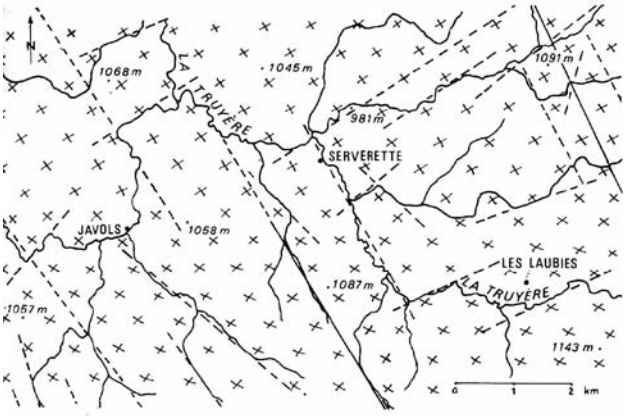
2.9 Barrage naturel par éboulement

Les éboulis et cônes de déjection peuvent provoquer des retenues d'eau importantes et former des barrages d'eau naturels. Il y a environ 800 ans, les cônes de déjection des torrents Infemet et Vaudaine, situés vis-à-vis en rive gauche et droite de la Romanche ont oblitéré son passage ce qui a conduit à la formation du lac Saint Laurent. La rupture du barrage a causé l'inondation de la plaine de Grenoble au Moyen-Age.

2.10 Formations du substratum et contrôle par la tectonique

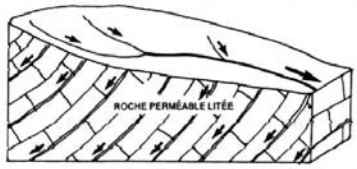


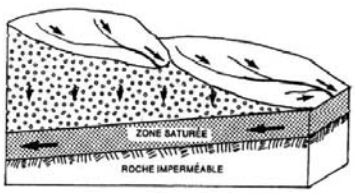
Localisation des aquifères dans les massifs anciens.
1, formations superficielles perméables ; 2, zone de fractures du socle ; 3, rocl compactes fracturées du socle.



B. Réseau hydrographique et fracturation dans une plate-forme granitique, Margeride, (Massif Central)

Exemples de bassins versants superficiels et souterrains disjoints ; les dimensions des bassins versants et les sens d'écoulement des eaux sont différents





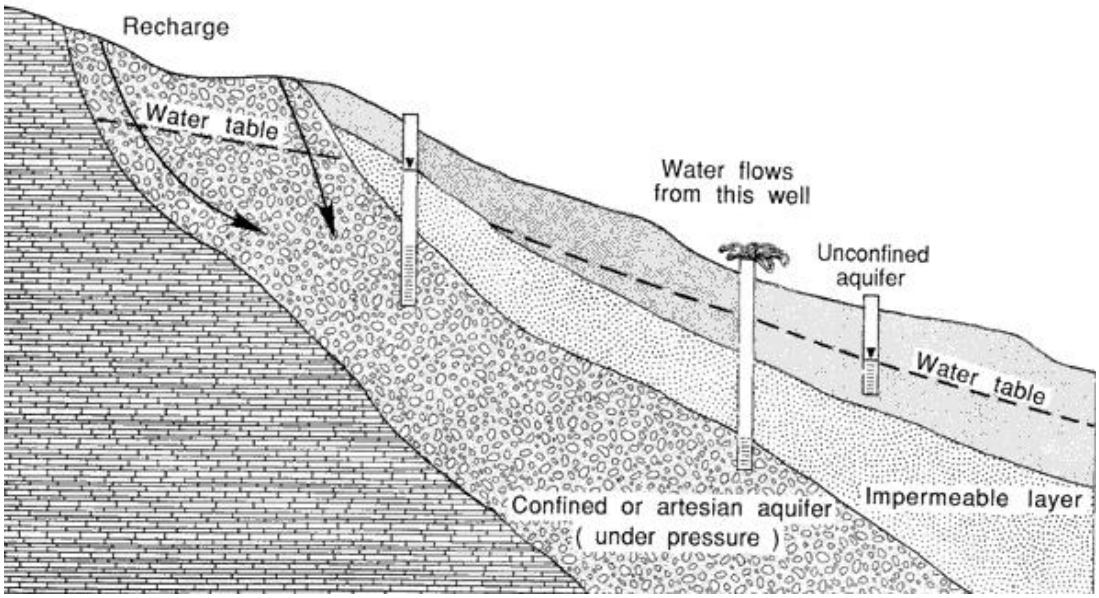
3 Cartes et coupes hydrogéologiques

3.1 Hydroisohypses et surface piézométrique

Les **hydroisohypses (synonyme isopiézes)** correspondent aux courbes de même pression hydrostatique dans le sous-sol.

- Dans le cas des **nappes libres**, il s'agit de courbes de même niveau d'eau dans le sous-sol. Elles sont indiquées sous forme de *courbes continues bleues* sur les cartes hydrogéologiques, les courbes maîtresses sont tracées en gras. Les niveaux d'eau sont donnés en mètres au-dessus du niveau de la mer, l'espacement des courbes (habituellement en m) dépend du pendage général. Des courbes intercalées peuvent être indiquées en pointillés dans des zones à plus faible pendage.
- Dans le cas de **nappes captives** les hydroisohypses se situent en dessus du niveau d'eau dans le sous-sol, qui lui est contraint par une couche imperméable. Les hydroisohypses sont alors indiqués en *courbes bleues discontinues* sur les cartes hydrogéologiques. La pression peut être telle que les hydroisohypses sont situées au-dessus du sol. L'eau sortira alors d'elle-même d'une source naturelle ou d'un puits artificiel, les deux devant traverser la couche imperméable. Il s'agit alors d'une source ou d'un puits artésien. Les rabattements d'une nappe suite à collecte de volume d'eau importants dans une zone de captivité peuvent amener la fin de phénomène d'artésianisme suite à l'abaissement de la pression hydrostatique au-dessous du niveau du sol - aux alentours du puits uniquement ou de la zone de captivité en général.

La surface **piézométrique** correspond à une coupe à travers une surface d'hydroisohypses. Pour obtenir la surface piézométrique il suffit de relier les hydroisohypses correspondant à une série de points dans la coupe.

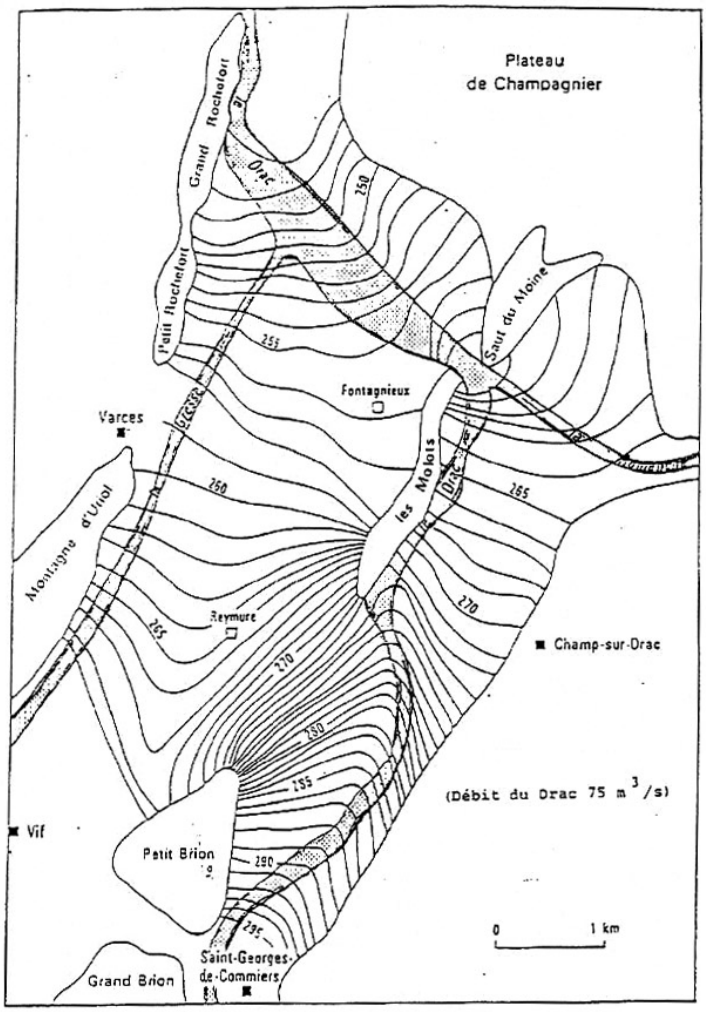


3.2 Cartes hydrogéologiques: symboles importants

Les indications concernant l'eau (hydroisohypses, sources, cours d'eau superficielle et plans d'eau, limite de captivité d'une nappe), sont donné en bleu. Les effets de l'activité humaine (zone de dépression due à des pompages) ainsi que les constructions particulières (puits, canaux d'irrigation) sont reportés en rouge. Les cartes représentent également les formations hydrogéologiquement importantes. La carte présente les formations en surface, les contours géologiques correspondent aux contacts géologiques de différentes formations. Les formations imperméables (argiles, éventuellement limons) sont indiquées par un remplissage continu d'une couleur choisie, les formations perméables sont indiquées en pointillé (sable), brique (souvent formations calcaires perméables) ou autre. Les niveaux du toit et du substratum imperméable peuvent être donnés en cas de connaissance et d'intérêt sous forme de courbes de niveaux. On trouve alors trouver jusqu'à 4 types de courbes de niveaux différentes (dans l'ordre de profondeur du bas vers le haut):

- Courbes de niveau du substratum imperméable ;
- Hydroisohypses ;
- Toit de l'aquifère s'il y a des formations imperméables superposées ;
- Indications topographiques.

— CARTE PIÉZOMÉTRIQUE DE LA NAPPE DU DRAC



Les eaux du Drac s'infiltrent par la trouée de Reymure, entre les Mollots et le Petit Brion, dans la masse alluviale déposée dans la paléovallée du Drac. La nappe phréatique est alimentée à l'aval du Saut-du-Moine par le Drac, mais drainée par celui-ci au droit de Rochefort.

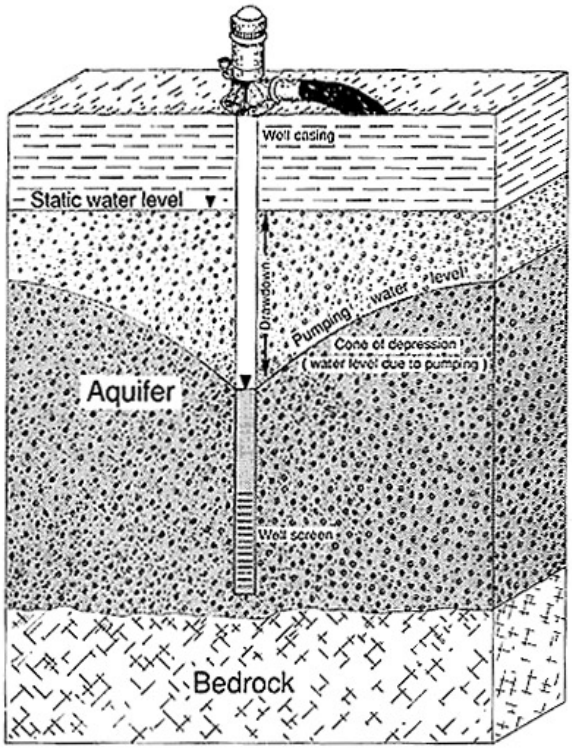
3.3 Axes d'écoulement

Les axes d'écoulement se présentent sous forme de flèches pointant vers le bas. Elles correspondent au gradient de la surface donné par les courbes isopiézes, et donc au gradient d'écoulement de l'eau dans le sous-sol. Elles se construisent sur une carte en traçant des courbes qui recoupent *en l'angle droit* les hydroisohypses qu'elles traversent. On obtient ainsi les cheminements de l'eau dans le sous-sol, ou autrement dit le parcours moyen des molécules d'eau dans l'aquifères. Dans le cas d'un puits où l'eau est pompée, les axes d'écoulement pointent naturellement vers le point de pompage. Les axes d'écoulement permettent alors de prévoir la trajectoire moyenne d'une molécule polluante dans un aquifère, notamment son introduction possible dans un puits capté. Cette vision simplifiée doit être relativisée par rapport au fait que les molécules d'eau ne suivent pas forcement le gradient «idéal», différents phénomènes en sont responsables.

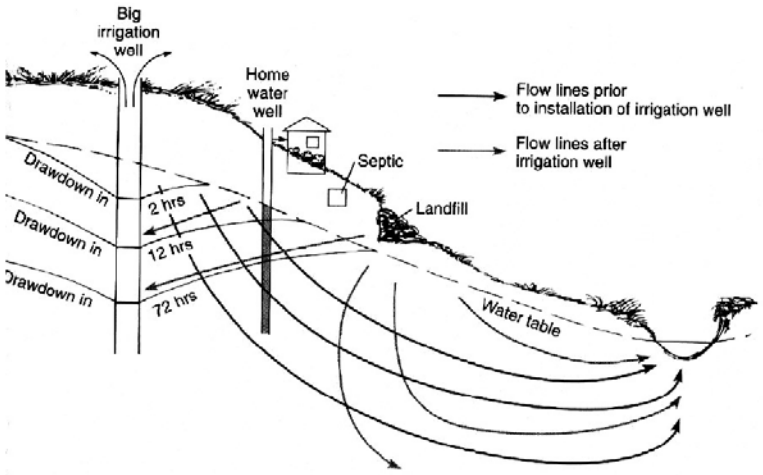
3.4 Interprétation des axes d'écoulement

Un **écoulement uniforme** est caractérisé par un espacement constant des hydroisohypses et des axes d'écoulement. Un **écoulement non uniforme** est caractérisé par un resserrement des hydroisohypses qui indique une pente croissante de la surface piézométrique dans le sous-sol. La vitesse de circulation de l'eau est maximale au niveau de la pente maximale (à l'endroit de resserrement maximum des hydroisohypses).

Des **écoulements divergents** sont caractérisés par des courbes hydroisohypses concaves vers l'amont. Ils indiquent donc un «étalement des masses d'eau» dans la projection donnée. En hydrogéologie cette situation peut correspondre à une rivière qui alimente une nappe phréatique en s'infiltrant dans celle-ci.
La situation inverse est celle de **l'écoulement convergent** avec les axes qui se resserrent vers l'aval. Ce cas se rapproche d'un axe de drainage, le cours d'eau draine la nappe phréatique. La surface piézométrique de la nappe se situe alors en toute logique en dessus de celui du cours d'eau — cas fréquent par exemple dans la région de Valenciennes où les rivières entaillées dans les marnes draines les nappes s'écoulant dans les fissures des bancs de calcaire sus-jacent. Dans des aquifères fluviatiles la convergence des écoulements souterrains est constatée par exemple dans des étroits de vallées. Dans les zones de pompage l'eau converge vers le puits.
Un **lac** peut être un déversoir d'une nappe souterraine. Les **méandres d'un cours** d'eau drainant la nappe génèrent localement des écoulements alternativement convergents et divergents. Ces termes ne sont donc reliés qu'à la forme des axes d'écoulement les uns par rapport aux autres. Il ne faut donc pas les confondre avec les termes hydrogéologiques (zone d'alimentation/de drainage d'un aquifère).
Un puits actif en période de **pompage** génère une **dépression de la surface piézométrique**, à condition que la quantité d'eau pompée soit significative par rapport à la perméabilité du sol. Les axes d'écoulements, construits à partir des hydroisohypses pointent alors naturellement vers le centre du puits, lieu de prélèvement de l'eau.
Si la nappe dans laquelle le pompage s'effectue possède une direction d'écoulement, les deux directions (générées par les gradients gravitaires + gradient par pompage) vont alors se superposer. On observera alors des hydroisohypses elliptiques autours du puits.



Les axes d'écoulement permettent également de visualiser l'effet des lignes de partages des eaux. Les écoulements divergents (zones d'alimentation etc.) génèrent des crêtes d'eau souterraines qui auront comme conséquence la séparation des eaux à part et d'autres de la crête. Les axes d'écoulement illustrent cette situation vu qu'ils partent de la crête en deux directions distinctes. Le mélange des eaux des deux côtés de la crête n'est alors pas possible. Cette situation peut être générée artificiellement en injectant de l'eau par exemple dans une conduite d'eau enterrée avec des parois perforées. Les pertes d'eau dans l'aquifère génèrent alors une crête d'eau souterraine. Le même effet est produit par implantation d'une batterie de forage le long d'un tracé. Cet effet sert alors soit à la protection d'un site critique (captage) d'un nuage de pollution s'y rapprochant dangereusement, soit à empêcher la propagation d'un polluant en créant une dépression à l'endroit de la source de pollution (pompage et nettoyage de l'eau pompée) et une crête d'eau en aval (injection d'eau propre).



Development of cone of depression drawing down the water table due to the pumping of a major irrigation well. The cone of depression can alter groundwater flow patterns significantly as indicated here where the leachate from a landfill, which normally would move to the right, would now flow toward the water supply well for the home. This example assumes a simple homogenous system.

Les barrières étanches correspondent à des falaises rocheuses sans apport ou pertes notoires en eau. Typiquement un substratum imperméable encaissant un aquifère fluviatile correspond à cette situation. Les axes d'écoulement sont alors essentiellement parallèles à la barrière imperméable. Des axes partant de la barrière indiquent des apports d'eau (exemple: ruissellement d'eau en surface d'une barre rocheuse); inversement des flèches pointant vers la barrière indiquent des pertes d'eau, par exemple il pourrait s'agir d'infiltrations d'eaux d'une nappe alluviale dans un système karstique. Il peut avoir alimentation de la nappe par ruissellement sur une barrière étanche (par exemple flanc de montagne). Les axes partent alors de la barrière.

3.5 Construction de cartes hydroisohypses

L'ensemble des observations est donc basé sur le tracé des axes d'écoulement qui eux sont construits à partir des courbes hydroisohypses. Ces hydroisohypses ne sont pas perceptible à partir du sol mais sont obtenues à partir de points de hauteurs d'eau discrets, les piézomètres (tubes creux implantés à cette fin verticalement dans le sol et atteignent l'aquifère), puits d'eau, sources de débordement ou plans d'eau indiquant les intersections entre la surface piézométrique et surface topographique. Les hydroisohypses indiquées sur les cartes sont alors obtenues par interpolation des points discrets.

A partir de 3 données piézométriques provenant de différents endroits on peut procéder à la construction d'hydroisohypses par la méthode d'interpolation des triangles. Les points sont reliés entre eux. Les valeurs piézométriques sont associées aux 3 extrémités, on obtient par interpolation entre 2 points les valeurs intermédiaires qu'on reporte sur les bases du triangle. On obtient finalement une carte isopièze en reliant des points de plusieurs triangles avoisinant. Il y a nécessité de lissage des courbes qui peut être pris en compte par des outils informatiques ou par procédé manuel. Cette dernière méthode aura comme avantage la prise de conscience obligatoire des incertitudes liées au procédé de lissage et aux effets de bordure. Il n'y a en effet pas ou peu de données piézométriques aux limites du bassin versant, les courbures des hydroisohypses à proximité d'une barrière imperméable sont souvent déduites non pas de données piézométriques non existantes mais d'observations sur le terrain et d'expériences professionnelles.

Les prédictions d'écoulements (pompage, risque de pollution...) basées sur des courbes isopièze doivent donc être accompagnées d'une discussion critique des hydroisohypses reportés sur la carte (fiabilité de ces courbes en fonction de la densité de "nœuds" disponibles lors de la réalisation de la carte etc. Egalement doit être questionnée la validité de ces données en cours du temps (variations annuelles, mensuelles, non périodique du niveau de la nappe, construction affectant les directions d'écoulements (barrage, réseau de palplanches, crues exceptionnelles ayant changé les cours d'eau superficielles, canaux d'irrigation, pompage, etc.). Le niveau de la nappe du Drac par exemple varie dans l'année en fonction des précipitations et de la fonte de la neige au printemps, le niveau est affecté à certains endroits par les pompages. L'age d'une carte et le suivi piézométrique sont donc des données d'importance primaire.

Remarque: L'établissement de cartes hydrogéologiques est souvent accompagné d'une campagne d'implantation de piézomètres (coût d'implantation d'un piézomètre dans des conditions faciles, sol meuble, profondeur inférieure à 15 m : 1500 euros).

Des méthodes alternatives permettent de situer la limite ZS- ZNS. Les méthodes sismiques enregistrent les ondes de choc sismique (générées par explosions, à coups de marteaux etc.) réfractées en fonction de la densité du sous-sol. Les méthodes électriques mesurent la conductivité du sous-sol qui change évidemment en fonction de la saturation en eau de celui-ci. Les deux méthodes ont le grand avantage de fournir :

- des informations non seulement ponctuelles mais aussi sur des tracés linéaires et des coupes verticales, et

- des informations non seulement sur le niveau d'eau mais également certaines informations relatives à la composition du sous-sol.

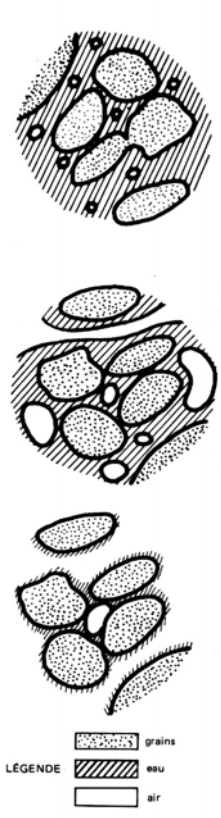
La mesure et le traitement des données ne sont toutefois pas évidents dans tous les cas.

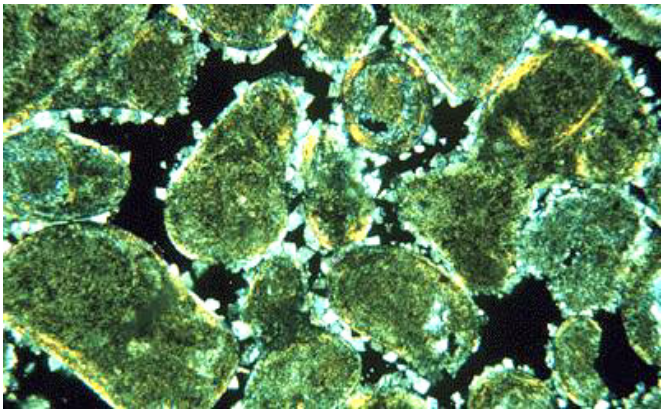
4 Propriétés pétrophysiques des roches

- Roche : agrégat de cristaux ou fragments de roches constitutifs de l'écorce terrestre.
- Sédiment: assemblage de grains déposés par l'eau, l'air ou la glace. Ces roches peuvent être caractérisées par la taille des grains et leurs propriétés physiques (gravier, sable) ou par le mécanisme de formation (alluvion).
- Sol : interface entre la roche et l'atmosphère. Cette couche contient souvent un mélange de matières minérales et organiques sur lequel pousse la végétation.

4.1 Porosité – Perméabilité

4.1.1 Porosité (n, ϕ)





Porosité = n, $\phi = V_{vides} / V_{total}$ x 100%
où V_{total} est le volume total de la roche et V_{vide} le volume des vides qu'elle contient.

On définit aussi la **porosité efficace**, ϕ_e, qui correspond à la porosité connectée.

La porosité dépend principalement de :
- la forme des grains : sphériques, allongés, angulaires ;
- la distribution des tailles ;
- l'intensité de la cimentation de la roche.

Exemple: arrangement cubique de grains sphériques (chaque grain touche six autres grains).
volume d'une sphère = (4/3) pi r^3
volume d'un cube = $(2r)^3$
Porosité = 47.64 %
Pour l'arrangement cubique le plus compact, la porosité chute à 25.95 %.

4.1.2 Perméabilité (k)

La perméabilité est la capacité d'une roche à transmettre un fluide. Les facteurs intervenant sont la taille des grains, la porosité, la nature du fluide transmis et son gradient de pression. Tandis que la porosité décrit les espaces dans lesquels le fluide peut se déplacer, la perméabilité (k) et la conductivité hydraulique (K) décrivent la facilité qu'a un fluide de se déplacer dans une formation. La porosité et la perméabilité ne sont pas reliées directement. Les argiles peuvent avoir une porosité élevée (30 à 80%) mais des perméabilités très faibles tandis qu'un sable a une porosité plus faible (30 à 40%) mais une perméabilité forte. L'unité de perméabilité est le m^2, on utilise cependant une valeur plus faible, le Darcy (1 Darcy = 10^{-12} m^2). La *valeur de la perméabilité ne dépend que de la roche et pas du fluide*.

La perméabilité du sol est un facteur important en ce qui concerne les infiltrations. Si l'eau ne peut s'infiltrer, son accumulation à la surface peut provoquer des inondations. C'est ce qui arrive dans les régions froides à la fonte des neiges. Le sol est encore gelé et possède une perméabilité faible. Toute l'eau de fonte des neiges et les pluies ruissellent donc uniquement à la surface et augmentent la probabilité des crues et inondations.

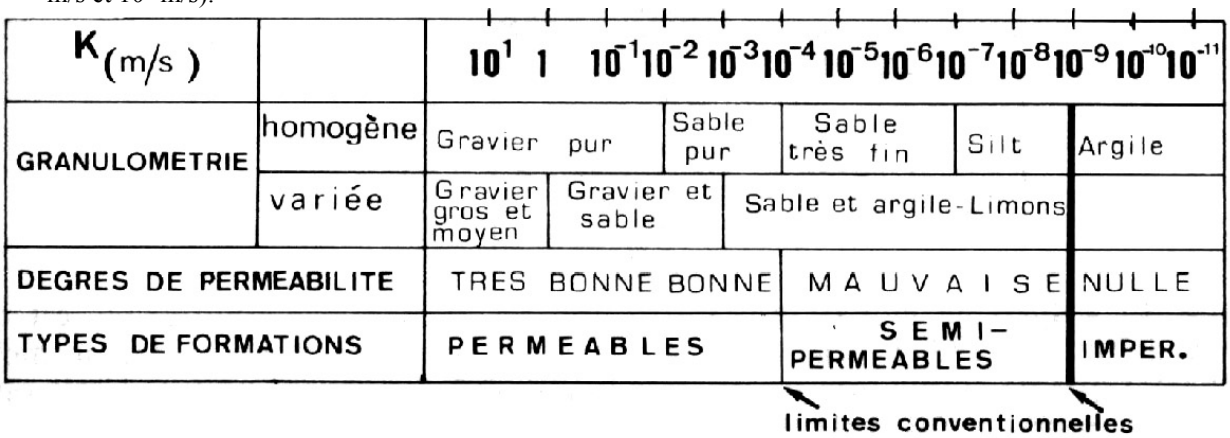
4.1.3 Conductivité hydraulique (K)

La conductivité hydraulique, *K*, est reliée de manière étroite à la perméabilité. Contrairement à la perméabilité qui n'est *fonction que de la roche*, la conductivité hydraulique dépend *à la fois de la roche et du fluide* qui y circule. L'unité de la conductivité hydraulique est le m/s.

$$K = k \rho_f g / \mu$$

μ = viscosité dynamique du fluide (1000 kg/m.s = Pa.s pour l'eau),
ρ_f = densité du fluide (1000 kg/m^3 pour l'eau pure),
g = constante de la gravité (9.81 m/s^2)
k = perméabilité intrinsèque (m^2) ou Darcy (1 Darcy = 10^{-12} m^2)

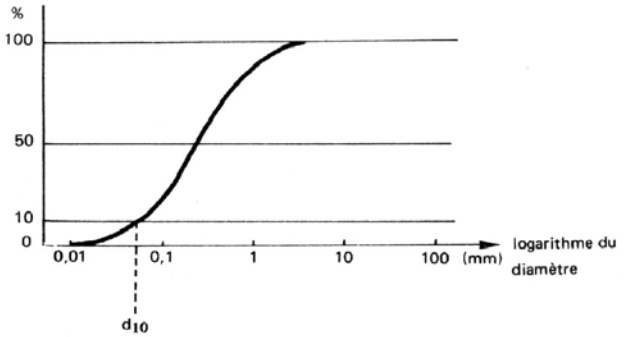
- Un fluide plus visqueux diminue la conductivité hydraulique.
- Un fluide plus dense (plus lourd) augmente la conductivité hydraulique.
- Une roche plus perméable possède une conductivité hydraulique plus élevée.
- Des fluides avec des compositions différentes (eau, eau salée, hydrocarbures) peuvent induire des conductivités hydrauliques différentes dans une même roche.
- Selon le type de roche (peu perméable ou très perméable) la conductivité hydraulique peut varier entre 10^{-14} m/s et 10^{1} m/s).



Voici quelques exemples de valeurs de la porosité associée à celles du coefficient de conductivité hydraulique :

Sol	Porosité	Perméabilité (m/s)
Sable grossier	27%	3×10^{-3}
Sable moyen	32%	5×10^{-4}
Sable fin	34%	1×10^{-4}
Silt (= sable très fin)	40%	2×10^{-6}
Argile	50%	$\leq 10^{-8}$

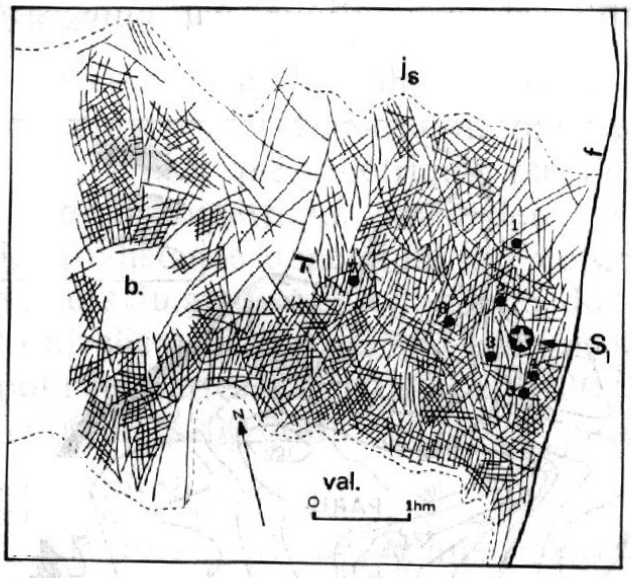
4.1.4 Granulométrie et connectivité



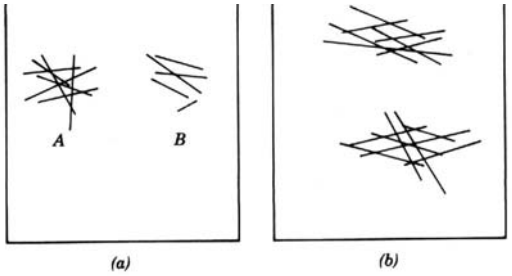
On appelle «diamètre efficace d_{10}» la dimension telle que 10 % des éléments du milieu soient plus petits que d_{10}. On admet que ce d_{10} est le paramètre qui conditionne le plus les propriétés de perméabilité du milieu

Terzaghi (professeur irakien naturalisé américain) a proposé une relation entre la perméabilité et le d_{10}: K (cm/s) = d_{10} (cm) x 100.

On différencie la **porosité effective ou utile** comme étant la porosité interconnectée d'un milieu poreux.



Carte de la fissuration. Formation hydrogéologique perméable carbonatée fissurée du Crétacé inférieur. Site expérimental de Corconne (région montpélliéraine). D'après J.C. Grillot.



Schematic illustration showing fracture sets (from de Marsily, 1985).

4.2 Milieu isotrope - anisotrope

Un milieu est **isotrope** lorsque ses caractéristiques physiques (perméabilité, granulométrie en particulier) sont constantes dans les 3 directions de l'espace. Dans le cas contraire le milieu est **anisotrope**. La définition d'isotropie est dépendante de la taille du réservoir considéré. A l'échelle millimétrique un aquifère formé de cailloux centimétriques est anisotrope. A l'échelle métrique ce même aquifère aura un comportement parfaitement isotrope. La définition d'un volume unitaire d'écoulement doit donc être assez grand par rapport aux dimensions des vides où l'eau circule afin de permettre la continuité de l'écoulement.
Dans un milieu isotrope, la conductivité hydraulique est identique dans toutes les directions de l'espace (x, y, z). Dans un milieu anisotrope, la conductivité hydraulique varie selon certaines directions préférentielles, par exemple les couches sédimentaires.

4.3 Conductivité hydraulique moyenne

Il est souvent utile de combiner la conductivité de plusieurs formations adjacentes et de définir une conductivité équivalente, par exemple quand un aquifère est constitué de plusieurs couches aux propriétés différentes. Selon que le flux est perpendiculaire ou parallèle au courant on obtient les conductivités équivalentes :

- Conductivité moyenne lorsque le flux est parallèle à une série de couches d'épaisseur m_i et de conductivité K_i:

$$<K_{parallèle}> = \Sigma m_i K_i / \Sigma mi$$

- Conductivité moyenne quand le flux est perpendiculaire aux couches :

$$<K_{perpendiculaire}> = \Sigma m_i / \Sigma(m_i/K_i)$$

4.4 Coefficient d'emmagasinement (S_s, S)

Il représente la capacité à libérer de l'eau sous l'effet d'un abaissement de la charge hydraulique. Le coefficient d'emmagasinement spécifique, S_s, donne le volume d'eau libéré par un volume unitaire de matériau pour une baisse unitaire de charge hydraulique (la charge hydraulique est définie par la suite). Son unité est L^{-1}. Le coefficient d'emmagasinement total d'un aquifère S est le produit du coefficient d'emmagasinement spécifique du matériau par l'épaisseur de l'aquifère. Ce coefficient est sans dimension.

$$S = S_s\, b$$

Le coefficient d'emmagasinement spécifique a été défini pour estimer le rendement d'un aquifère. Il exprime la quantité d'eau récupérable en m^3 par rapport à un abaissement du niveau piézométrique de i mètres, sur une superficie de l'aquifère de i m^2 (en unité SI).

$$S = A_V / (A.A_h)$$

- A_V : volume d'eau récupéré,
- A : surface considérée,
- A_h : rabattement du niveau piézométrique

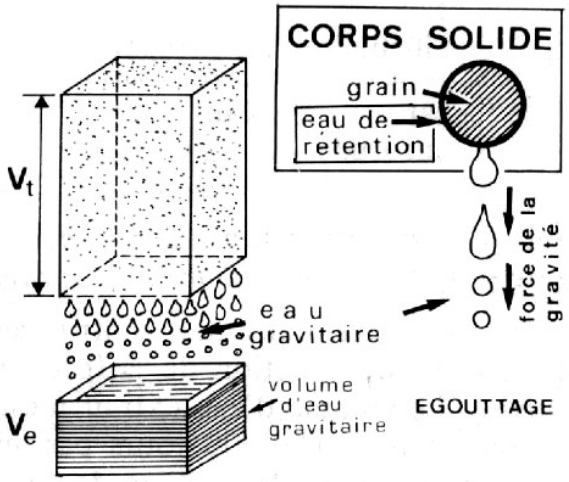
Dans un aquifère à nappe libre, S correspond à la porosité utile, on récupère toute l'eau par l'action de la force gravitaire (ou par pompage). Pour un aquifère à nappe captive non pompée, l'abaissement du niveau piézométrique se fait uniquement par expulsion de l'eau, elle-même contrôlée par l'élasticité des grains constituant l'aquifère et celle de l'eau. Les modules d'élasticité étant forts, le volume d'eau récupéré est alors bien plus faible que dans le cas d'une nappe libre.
Pour les aquifères profonds (> 500 m), tous captifs sauf exception, la quantité d'eau récupérée est encore amoindrie suite à l'effet de la diminution de la porosité (et perméabilité) par écrasement des éléments (grains, blocs) constituant l'aquifère.
A l'état naturel les éléments de roche subissent une pression lithostatique verticale importante contrebalancée par une pression hydrostatique latérale (poids de la colonne d'eau, cas des aquifères à profondeur faible et moyenne) voir également lithostatique latérale (cas des aquifères profonds avec l'eau enfermée dans les pores). Une dépression subite va alors augmenter la contrainte différentielle dans le réservoir, conduisant à l'écrasement des grains constituant l'aquifère. Le pompage en aquifère profond peut alors rapidement se tarir après une courte période de bon rendement. Des grains durs (sables, constitué de cristaux durs tels le quartz) supportent mieux les containtes déviatoriques que des calcaires (formés souvent de petits cristaux agglomérés de calcite, minéral relativement mou et à vitesse de dissolution importante).

4.5 Eau gravitaire et eau de rétention

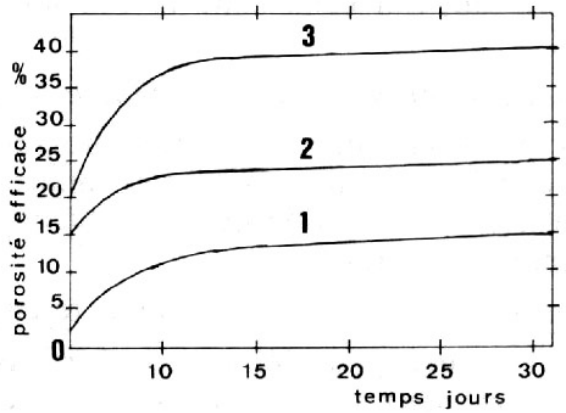
Dans un milieu poreux, l'eau présente dans les pores peut être récupérée plus ou moins facilement. On distingue ainsi :

- l'eau gravitaire qui s'écoule dans les pores sous l'influence
- l'eau de rétention qui reste piégée à la surface des grains

Pour une porosité égale, le volume d'eau gravitaire est plus important dans un matériau à grains grossiers que pour un matériau à grains fins.



Un échantillon d'aquifère, saturé en eau, de volume total V_t, libère par égouttage sous l'action de la force de la gravité, un volume d'eau, V_e, dit eau gravitaire.



Le volume d'eau gravitaire, libéré d'un échantillon, est fonction de la granulométrie et du temps d'égouttage.
1, sable fin de $d_{10} = 0{,}08$ mm ; 2, sable moyen de $d_{10} = 0{,}47$ mm ; 3, gravier de $d_{10} = 2{,}5$ mm.

Répartition des porosités et des capacités d'un matériau

<table>
<tr><td colspan="4">Eau du sol
Porosité totale</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Eau gravitaire
Porosité efficace (ou) de drainage</td><td colspan="3">Eau de rétention
Capacité de rétention (ou) au champ</td></tr>
<tr><td>Eau capillaire</td><td>Eau pelliculaire</td><td>Eau absorbée</td></tr>
<tr><td colspan="2">Eau mobile
Porosité cinématique</td><td>?
?</td><td>Eau immobile</td></tr>
<tr><td colspan="2">$\psi = 1000$
pF = 3</td><td colspan="2">$\psi = 10^5$
pF = 5</td></tr>
<tr><td>Déplacement par la gravité</td><td colspan="2">Déplacement par centrifugation ou succion</td><td>Déplacement par la chaleur</td></tr>
</table>

5 Transport d'un fluide en milieu poreux

L'eau des rivières se déplace à des vitesses de 5 à 15 kilomètres par heure. Dans un aquifère l'eau se déplace à une vitesse de quelques centimètres par jour (soit quelques mètres par an). L'eau souterraine ne se déplace que s'il existe une différence de pression (ou un gradient hydraulique non nul) entre deux points et si la porosité de la roche est suffisamment bien connectée. La valeur du gradient hydraulique détermine à quelle vitesse l'eau circule d'un point à un autre.

5.1 Potentiel de l'eau

Potentiel : grandeur physique exprimant l'énergie par unité de masse (notée ϕ, unité m^2/s^2), par unité de volume (équivalent à une pression, noté P, unité $kg/m/s^2$) ou par unité de poids (noté H, d'unité m). Ce potentiel correspond au travail pour déplacer une unité de masse de cette eau d'un point à un autre. Pour une masse *m* d'un fluide incompressible, ce travail s'exprime mathématiquement comme suit :

$$W = mg(z_1 - z_2) + m(p_1 - p_2)/\rho + m(v^2_1 - v^2_2) / 2$$

Le potentiel de pression de l'eau peut être déduit par :

$$\Phi = gz + P/\rho + v^2/2$$

C'est la somme de trois termes : énergie potentielle (altitude), énergie élastique, énergie cinétique (négligeable car l'eau circule lentement).

La charge hydraulique est :

$$H = \Phi/g = z + (P_{au} + p_H) / \rho g + PSI$$

PSI : forces de tension superficielle dans la zone non saturée. PSI est la hauteur de la zone non saturée (potentiel de succion).

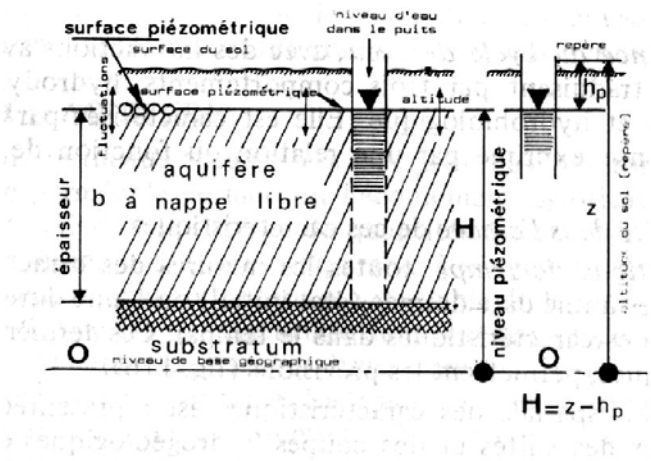


Schéma de l'aquifère à nappe libre. Mesure du niveau piézométrique.

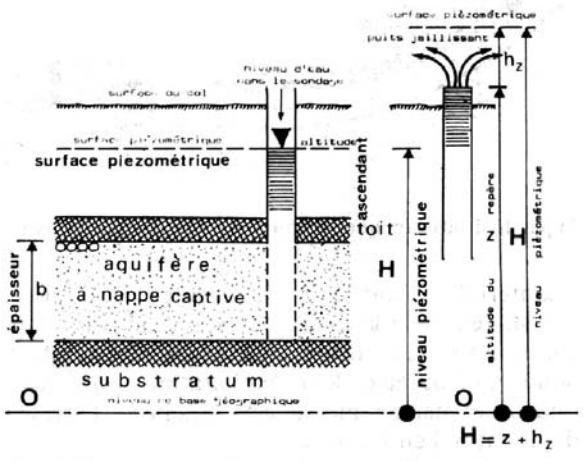
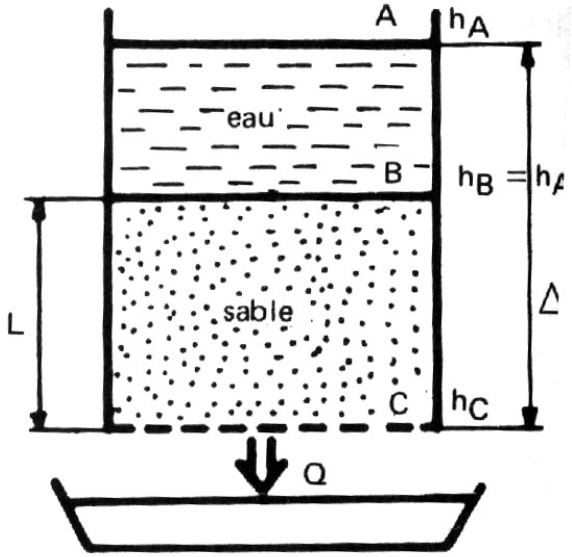


Schéma de l'aquifère à nappe captive. Mesure du niveau piézométrique.

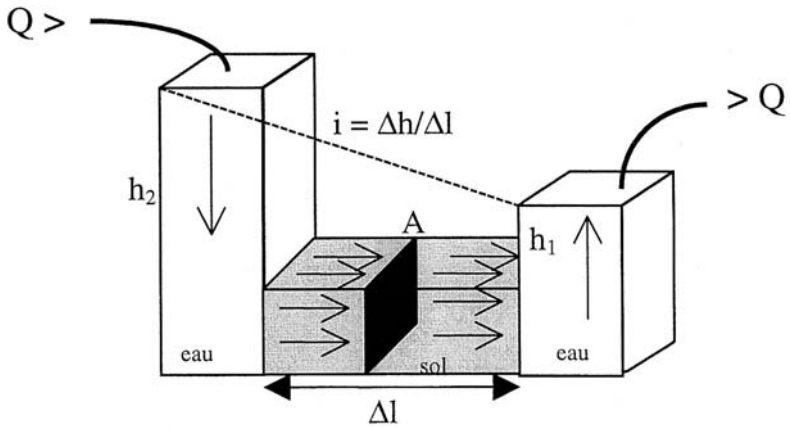
5.2 Expérience de Darcy

En 1856 Henri Darcy a publié une expérience de transfert d'eau à travers un milieu poreux dans un livre intitulé « Les fontaines publiques de la ville de Dijon ». Dans son expérience il a mesuré le flux d'eau (Q = m^3/s) à travers un filtre composé de sable. Darcy a relié le flux à la section (aire) du filtre et au gradient hydraulique. Il a appelé conductivité hydraulique la constante qui relie ces paramètres.



Les résultats de l'expérience de Darcy sont les suivants :
1. Q est proportionnel à la surface *A* du filtre.
2. Q est proportionnel à h_a - h_b.
3. Q est inversement proportionnel à *L* la longueur du filtre.
4. La constante de proportionnalité (*K*) dépend du matériau poreux. *K* dépend de la taille des grains et de la connectivité des pores.

$$Q = K A i$$



Q : flux d'eau (L^3/T).
K : conductivité hydraulique (L/T)
A : surface traversée par le fluide (L^2)
I : gradient hydraulique (sans unité)

Cette loi peut être résumé par:

$$\boldsymbol{Q = KA\ I}$$

où *I* = gradient hydraulique = $(h_a - h_b) / L$.
Plus généralement cette loi s'écrit :

$$Q = KA\ dh/dl$$

Le signe est choisi tel qu'il indique que le fluide s'écoule dans la direction de diminution du gradient hydraulique.
La conductivité hydraulique s'écrit donc :

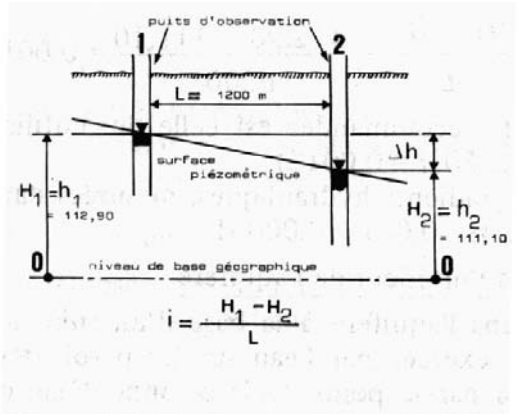
$$K = Q / (A\ dh/dl)$$

Q est aussi inversement proportionnel à la viscosité du fluide et proportionnel à sa densité. *Q* dépend aussi de la forme des grains et de la connectivité des pores. On peut alors écrire le flux

$$Q = kg\ \rho_f / \mu\ (dh/dl)$$

ce qui permet de retrouver la perméabilité *k*. L'unité pour *k* est le m^2 ou encore le Darcy qui correspond à 10^{-8} m^2.
On définit aussi **la vitesse de filtration** V par :

$$V = Q/A$$

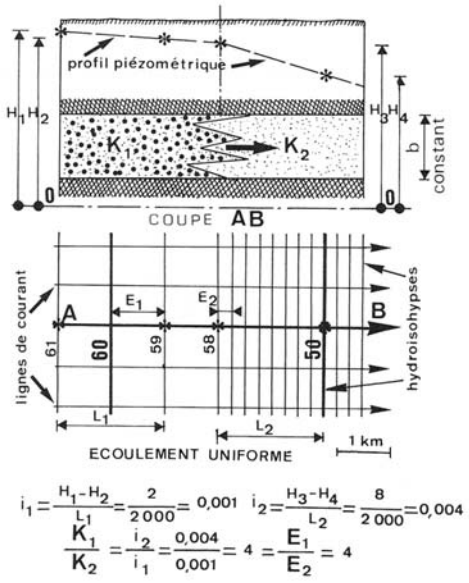


Application de la loi de Darcy sur le terrain. Calcul du gradient hydraulique, *i*, avec deux puits d'observation, 1 et 2.

Limites de la loi de Darcy: En général, la loi de Darcy considère que l'eau se propage dans un milieu homogène et continu, et que la structure des particules solides est microscopique par rapport au champ d'observation. La loi de Darcy ne s'applique donc pas à l'écoulement en milieu fissuré.

5.3 Mesures du gradient hydraulique

Un piézomètre est un tube qui mesure la hauteur de la surface hydraulique en un point donné. Le gradient hydraulique est égal à la différence de hauteur de cette surface divisée par la distance entre les deux points de mesure.
La perméabilité des matériaux peut varier sur 14 ordres de grandeur. Ce paramètre est mesuré *in situ* ou au laboratoire par des perméamètres. Il y a cependant deux problèmes avec les mesures de laboratoire. Le premier, d'ordre purement technique, est que les conditions ne sont pas les mêmes qu'en profondeur et il faut donc recompacter la roche. Le second problème est qu'on trouve en laboratoire des valeurs de perméabilité 10 à 1000 fois plus faibles que dans la nature. Ceci résulte souvent du fait que le milieu naturel est bien plus grand que l'échantillon de laboratoire et peut contenir une porosité secondaire dans des fractures.



Écoulement uniforme dans un aquifère à nappe captive d'épaisseur constante. Une diminution du coefficient de perméabilité,dû à une variation latérale de faciès, entraîne un accroissement du gradient hydraulique et une diminution du module d'espacement. Le rapport des modules d'espacement permet de calculer directement celui des coefficients de perméabilité.

5.4 Diffusion et dispersion dans l'eau d'un aquifère

La **diffusion moléculaire** implique un mouvement aléatoire des molécules suite à leurs vibrations thermiques. Ce phénomène est généralement négligeable tentant compte de l'échelle des aquifères et les vitesses d'écoulements.

La dispersion implique des changements de direction (et des vitesses) des molécules d'eau induit par l'obligation de ceux-ci de contourner les blocs constituant l'aquifère tels les cailloutis etc.). La dispersion peut être modélisée relativement aisément en combinant outils informatiques et données de terrains, du moins tant que l'aquifère est isotrope ou homogène (voir plus bas).

Si l'aquifère est ni isotrope ni homogène (définition voir ci-dessous) se pose le problème de **chenaux d'écoulements souterrains préférentiels.** En effet, des anisotropies verticales (par exemple lentilles d'argiles incorporées dans le sous-sol, présence d'anciens lit de rivières enfouis impliquant des granulométries différentes dans cet ancien lit) vont affecter les directions d'écoulement en profondeur. Il y aura alors des directions d'écoulements différents selon les étages observés. La prédiction de l'écoulement uniquement par l'observation des axes d'écoulement (qui eux sont donnés par la surface isopièze) peut alors donner des résultats complètement erronés. La condition d'isotropie homogénéité est rarement satisfaite dans les aquifères naturels, et notamment dans le cas d'aquifères fluviatiles. Cette notion est à mémoriser quand il s'agit de prédire des zones de risques de pollution d'un aquifère basées sur les tracés des axes d'écoulements.

Remarque: Propagation d'un nuage de pollution dans un aquifère

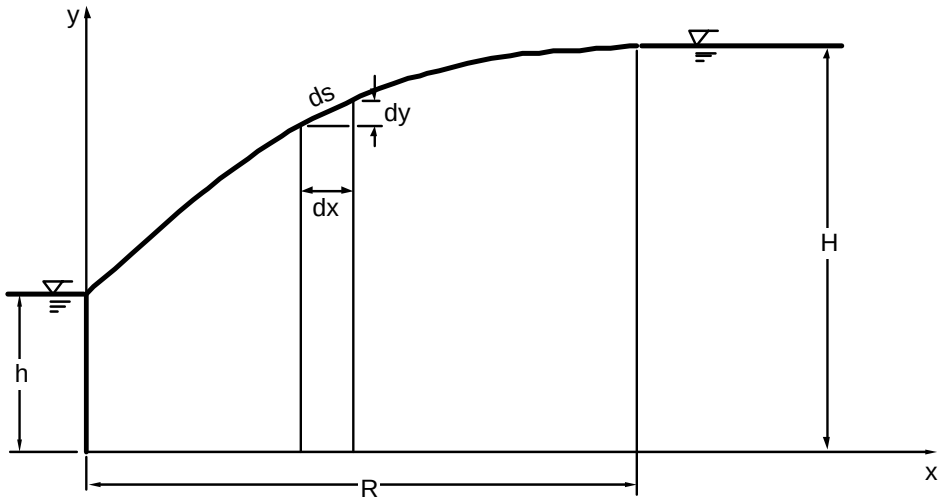
Ce sont les phénomènes mentionnés ci dessus qui sont à l'origine de l'agrandissement d'un nuage de pollution dans un aquifère avec le temps. Dans le but de modéliser la propagation de ces nuages il est également nécessaire de tenir compte de :

- la retenue des molécules d'eau / des polluants à la surface des grains introduisant des ralentissements des écoulements.
- le retard d'un polluant introduit par adsorptions-désorptions multiples de celui-ci le long de son trajet sur les surfaces des particules constituant l'aquifère. S'il y a affinité entre particule/molécule polluante et surface, la propagation du polluant sera plus lente que celle de l'eau.
- la dégradation possible du polluant (molécules organiques dégradables).

5.5 Application de la loi de Darcy

5.5.1 Calcul de la ligne piézométrique

Considérons le schéma de la figure suivante, où la position de la ligne piézométrique est définie par *y* et l'axe des abscisses représente la distance entre deux aquifères communicants.



Ligne piézométrique entre deux aquifères.

Il est nécessaire de faire des hypothèses avant d'appliquer la loi de Darcy:
- Le gradient hydraulique *i* est faible et donc *ds = dx*,
- La vitesse verticale est négligeable (conséquence de la première hypothèse)

Le profil vertical de vitesse est uniforme, la vitesse horizontale est constante selon la direction verticale. Le gradient hydraulique s'écrit alors :

$$i=\frac{dy}{ds}\approx\frac{dy}{dx}$$

en régime permanent, le débit unitaire s'exprime:

$$Q=K\,y\frac{dy}{dx}$$

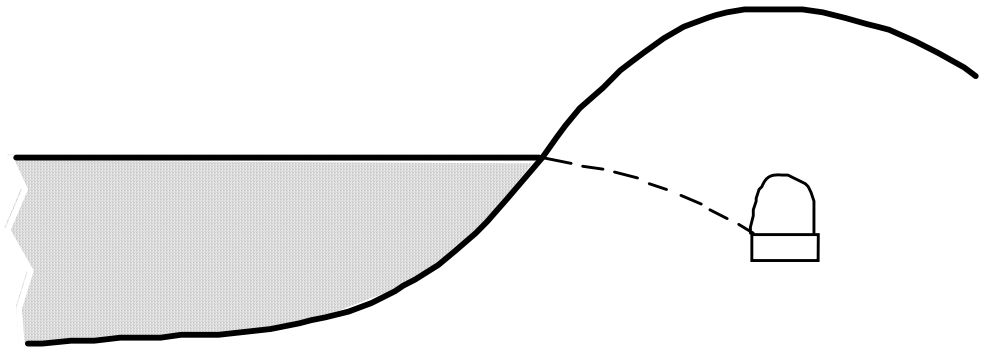
d'où, par séparation de variable:

$$\int Q dx=\int K\,y dy$$

en intégrant entre *0* et *R* en *x* et *h* et *H* en *y*, on obtient:

$$Q=\frac{K\left(H*H-h*h\right)}{2R}$$

Cette relation nous permet, par exemple, d'évaluer le débit d'une galerie filtrante, parallèle à une rivière.



Galerie filtrante la long d'une rivière.

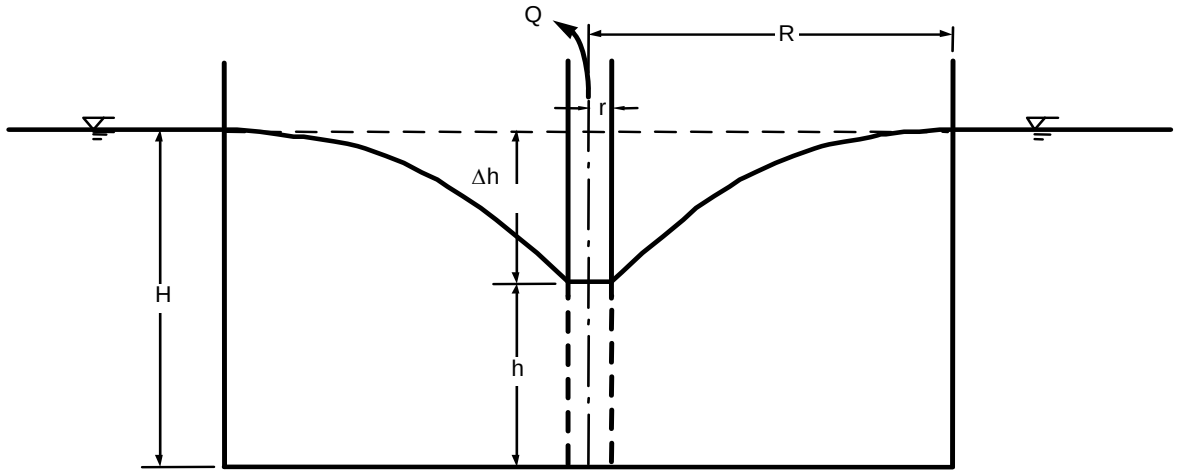
L'équation de la ligne piézométrique peut alors s'écrire en fonction des seuls paramètres géométriques *h*, *H* et *R*. En remplaçant *Q* par l'expression précédente et en utilisant les conditions aux limites, on obtient :

$$x = \frac{R(y*y - h*h)}{H*H - h*h}$$

ou encore :

$$y = \sqrt{\frac{x}{R}(H*H - h*h) + h*h}$$

5.5.2 Puits en nappe libre



Puits en nappe libre.

A partir d'un pompage Q en régime permanent dans une nappe libre de hauteur H, nous observons un **rabattement** Δh, stabilisé à long terme. L'affaissement de la nappe est appelé cône d'affaissement et l'on définit par **débit spécifique** le rapport $Q/\Delta h$ et par **rabattement spécifique**, le rapport $\Delta h/Q$.
Selon la loi de Darcy :

$$Q=(K\,i)\,A$$

où A est l'aire d'alimentation à une position x, équivalente à l'aire d'un cylindre circulaire de rayon x et de hauteur y. Donc cette surface s'évalue par :

$$A=2\,\pi\,x\,y$$

avec les mêmes hypothèses que précédemment, quant à l'applicabilité de la loi de Darcy:

$$Q=2\,K\,\pi\,x\,y\frac{dy}{dx}$$

en séparant les variables et en intégrant :

$$\int_r^R \frac{Q}{x}dx=\int_h^H 2\pi Kydy$$

$$Q\ln(x)\Big|_r^R=2K\pi\frac{y*y}{2}\Big|_h^H$$

D'où, finalement :

$$Q=\frac{K\pi(H*H-h*h)}{\ln\left(R/r\right)}$$

Le rayon R n'a pas de limite théoriquement définie en raison de la forme asymptotique du cône. En régime permanent toutefois, le rayon d'influence R est considéré comme l'endroit où l'affaissement ou rabattement est négligeable. Le fait de ne pas connaître avec précision cette limite n'a pas une influence forte sur la valeur du débit. En effet, le rapport R/r est peu sensible puisqu'il agit par son logarithme En pratique on évalue le rayon d'influence par **la formule empirique de Sichardt** (attention c'est une formule empirique et non mathématique):

$$R=3000(H-h)\sqrt{K}$$

En logarithmes décimaux **la formule de Dupuit** s'exprime par:

$$Q=\frac{K\pi(H*H-h*h)}{2{,}303\log_{10}\left(R/r\right)}$$

Discussion de la formule de Dupuit

L'augmentation du diamètre du puits augmente la capacité en débit du puits. Cependant l'évaluation de cette augmentation ne peut se faire sans tenir compte de l'évolution de la hauteur piézométrique dans le puits ni du rayon d'influence :

- Le débit est directement proportionnel à la perméabilité.
- L'épaisseur *H* de la nappe augmente la capacité de pompage du puits.

Conditions d'exploitation d'un puits

Le débit de pompage ne peut être forcé au-delà d'une limite où il crée un écoulement tellement intense près du puits lui-même que les grains du sol les plus petits se déplacent vers les vides et ainsi diminuent la perméabilité du sol à cet endroit. Il s'agit d'un colmatage irréversible. Sichardt a établi la limite de la vitesse de filtration comme étant une vitesse critique à ne pas dépasser :

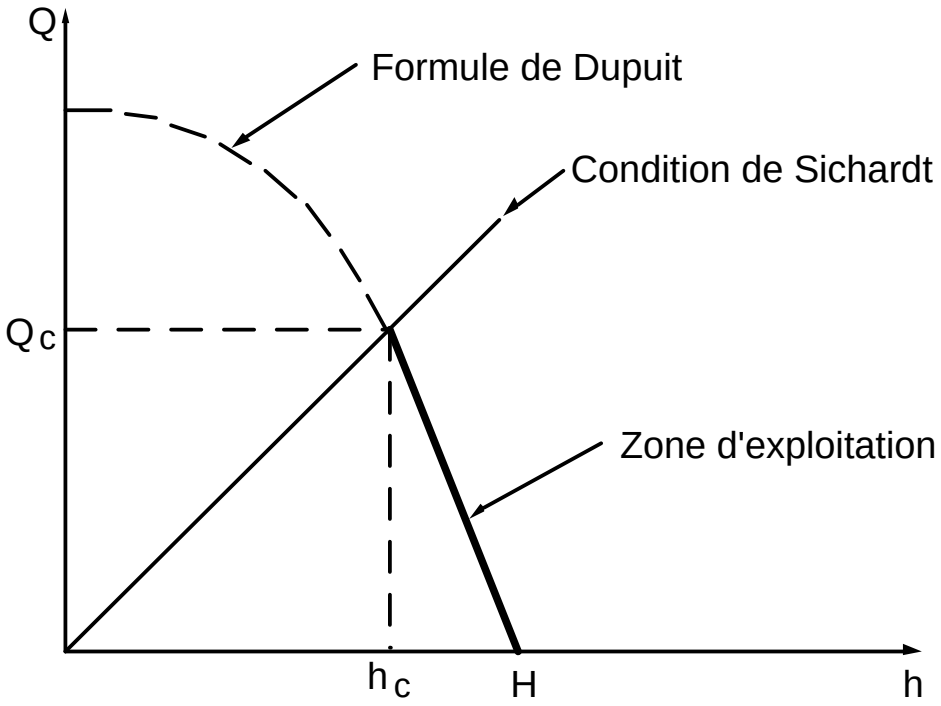
$$V_c = \frac{\sqrt{K}}{15} \left[m/s\right]$$

Le débit critique se calcule en fonction du rayon du puits :

$$Q_c = \frac{2\pi r h_c \sqrt{K}}{15} \left[m^3/s\right] \text{ (appelé aussi condition de Sichardt)}$$

K étant en m/s et *r* et *h* en m.

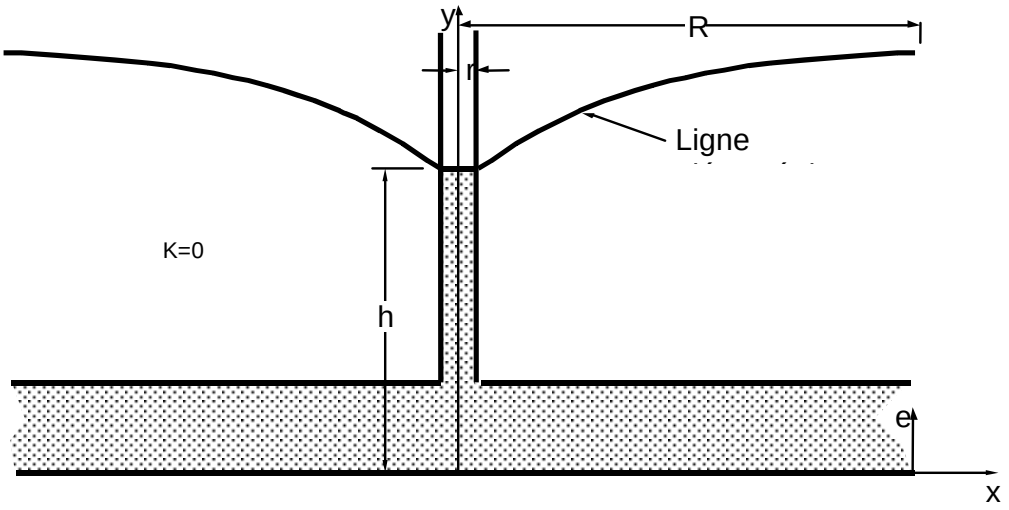
Le débit critique peut être augmenté par l'augmentation proportionnelle du rayon du puits. Si on porte en graphique la formule de Dupuit en mettant en relation le débit et le rabattement, et la condition de Sichardt, on visualise la zone d'exploitation.



Zone d'exploitation d'un puits.

En pratique, en prenant des précautions, on peut augmenter la perméabilité autour du puits en dépassant Q_C pour une courte période de temps. De par la nature des sols à granulométrie variée, on peut essayer d'entraîner les particules fines; il s'agit d'un pompage de formation.

5.5.3 Puits artésien ou en nappe captive



Puits en nappe captive

De même que précédemment pour les nappes libres, selon la loi de Darcy :

$$Q=(K\ i)\ A$$

où A est l'aire d'alimentation à une position x, équivalente à l'aire d'un cylindre circulaire de rayon x et de hauteur e, l'épaisseur de l'horizon poreux. Donc cette surface s'évalue par :

$$A=2\ \pi\ x\ e$$

avec les mêmes hypothèses que précédemment, quant à l'applicabilité de la loi de Darcy :

$$Q=2\ K\pi x\ e\frac{dy}{dx}$$

en séparant les variables

$$\int_r^R \frac{Q}{x}dx=\int_h^H 2K\pi e dy$$

$$Q\ln(x)\Big|_r^R=2K\pi e y\Big|_h^H$$

d'où, finalement:

$$Q=\frac{2K\pi e\left(H-h\right)}{\ln\left(R/r\right)}$$

Donc Q est directement proportionnel au rabattement (H - h). Dans la pratique cette formule est limitée aux cas où:

$$H-h<\frac{H-e}{4}$$

Les conditions de vitesse et de débit critiques et ce qui en découle restent les mêmes que pour le cas des nappes libres.

5.5.4 Évaluation de la transmissivité et de la perméabilité d'une nappe aquifère

On définit la transmissivité d'une nappe par les produits :

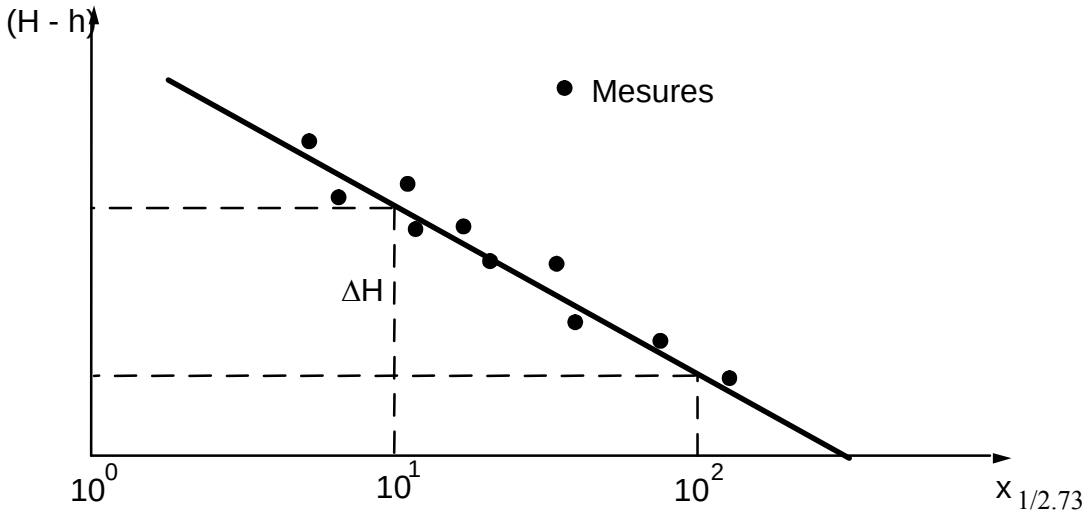
$T= K\ e$, pour une nappe captive [m^2/s]

$T= K\ H$, pour une nappe libre [m^2/s]

C'est une mesure de diffusibilité de l'eau dans le sous-sol. Si le rabattement (H - h) est faible la formule suivante s'applique en nappe libre dans toute la zone du cône de rabattement :

$$Q=\frac{2\pi}{2.303}\,T\,\frac{y-H}{\log_{10}\left(\frac{x}{R}\right)}=2{,}73\,T\,\frac{H-y}{\log_{10}\left(\frac{R}{x}\right)}$$

En portant sur papier semi-logarithmique des mesures piézométriques H - y prises à des positions x du centre du puits, on obtient le graphique suivant.



Détermination du rayon d'influence, de la perméabilité et de la transmissivité à partir de mesures piézométriques.

De la relation précédente, on tire :

$$T = \frac{Q \log_{10}\left(R/x\right)}{2{,}73\left(H-y\right)}$$

dans un cycle logarithmique 10 - 100, $\log_{10}(R/x) = 1$ et la différence de hauteur piézométrique ΔH est mesurée à partir des valeurs correspondant respectivement à $x = 10$ et $x = 100$, donc la transmissivité T s'écrit :

$$T = \frac{Q}{2{,}73\Delta H}$$

la perméabilité devient donc:

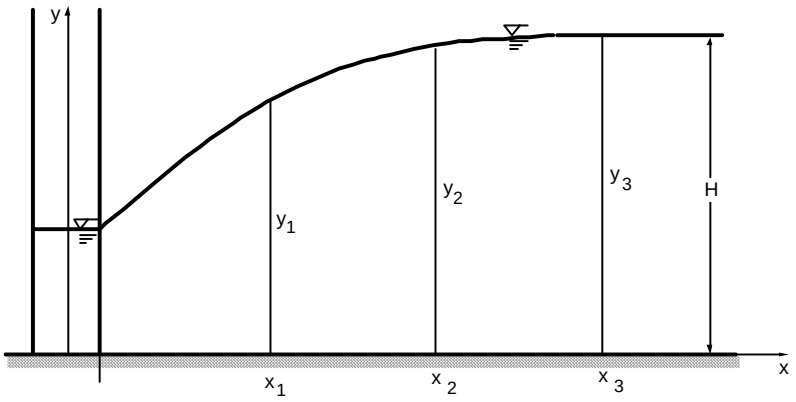
$$K = \frac{T}{H}$$

et le rayon d'influence R est lu sur le graphique à l'endroit où la droite logarithmique intercepte l'abscisse.
Il est aussi possible de déterminer le coefficient K sur le terrain, à partir de deux mesures piézométriques y_1 et y_2 prise en s'éloignant du puits à des positions x_1 et x_2.
Des formules de puits, on tire :
- en nappe libre:

$$K = 0{,}73\, Q \frac{\log_{10}\left(x_2/x_1\right)}{\left(y_2^2 - y_1^2\right)}$$

- en nappe captive :

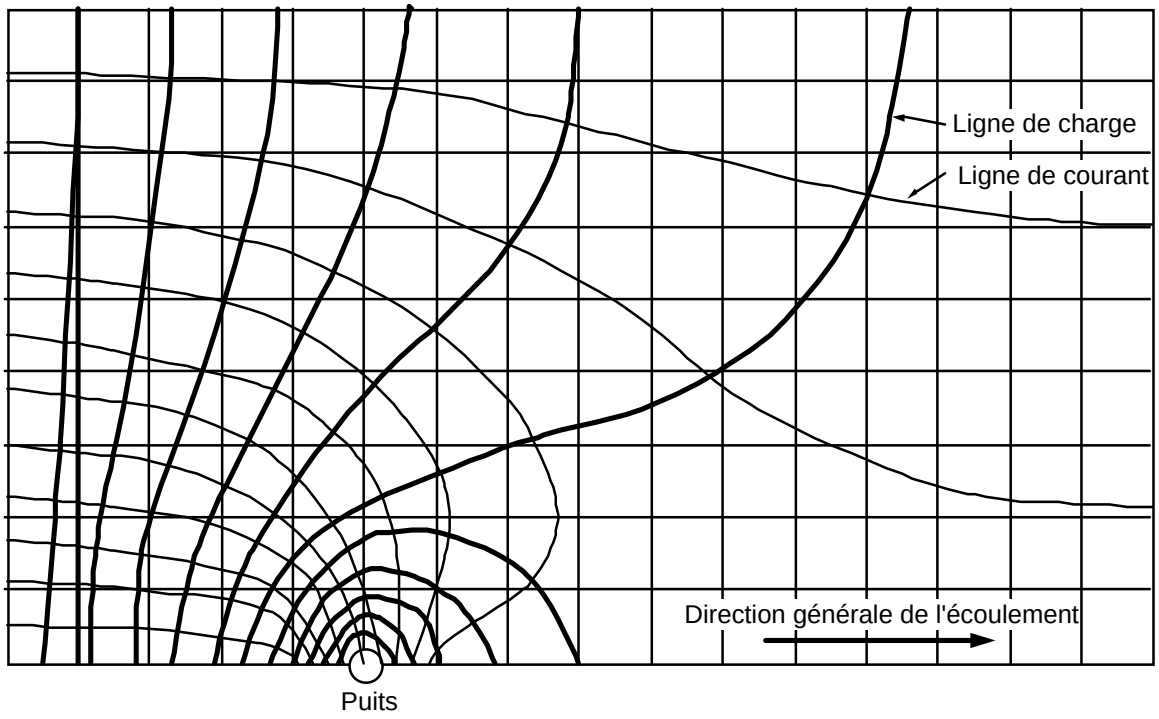
$$K = 0{,}73\, Q \frac{\log_{10}\left(x_2/x_1\right)}{2e\left(y_2 - y_1\right)}$$



Positions et hauteurs piézométriques

5.5.5 Cas où la ligne piézométrique n'est pas horizontale

Il faut alors procéder à une analyse par réseau d'écoulement. Les techniques numériques modernes nous permettent d'établir un réseau d'écoulement dans des configurations géométriques fort complexes. La figure suivante représente les résultats d'un tel calcul. L'interprétation des résultats permet de déterminer les rabattements, à partir des équipotentielles et le débit selon les lignes de courant.



Modèle numérique d'écoulement d'un puits dans une nappe libre en mouvement.

5.6 Ce que ces équations permettent de prédire

L'utilisation sur le terrain de la loi de Darcy et des calculs de gradients hydrauliques permettent en première approximation de:

- prédire la distribution de la charge hydraulique sur toute une nappe à partir de points isolés (conditions stationnaires et transitoires) ;
- prédire les directions de propagation de l'eau (direction d'écoulement) principales ;
- analyser des données concernant le pompage dans un aquifère et estimer les réserves et la conductivité hydraulique d'un aquifère.
- utiliser des modèles de circulation pour prédire l'impact d'un pompage sur l'aquifère ;
- prédire les chemins de circulations des fluides et les vitesses présentes et futures ;
- passé : retrouver les dépôts de minerais, les réservoirs d'hydrocarbures et les chemins de migration ;
- présent : évaluer et lutter contre une pollution, gérer les ressources en eau ;

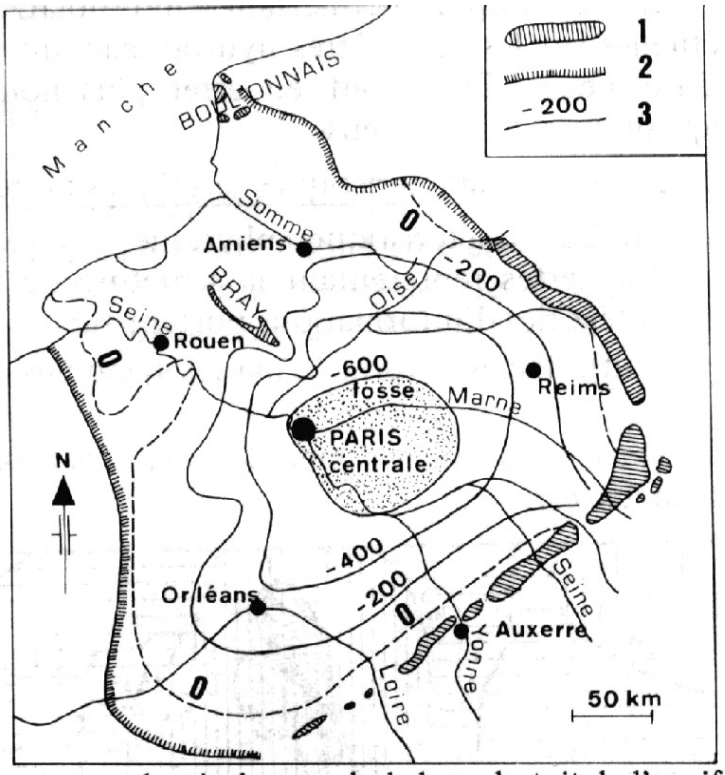
- futur : prévoir les effets d'un pompage, prédire le transport d'une pollution, trouver des stratégies de dépollution d'un aquifère.

C'est toutes ces taches que l'on attend d'un hydrogéologue.

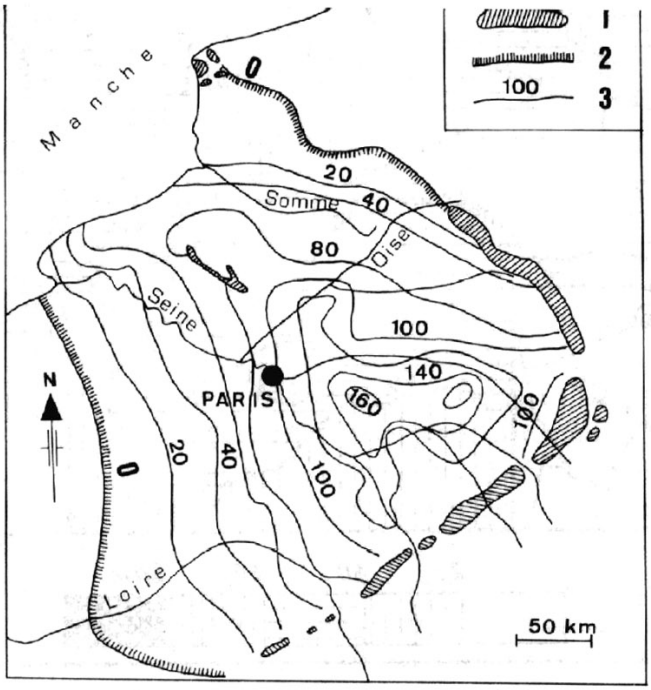
6 Exemples de grands aquifères

6.1 Le bassin de Paris

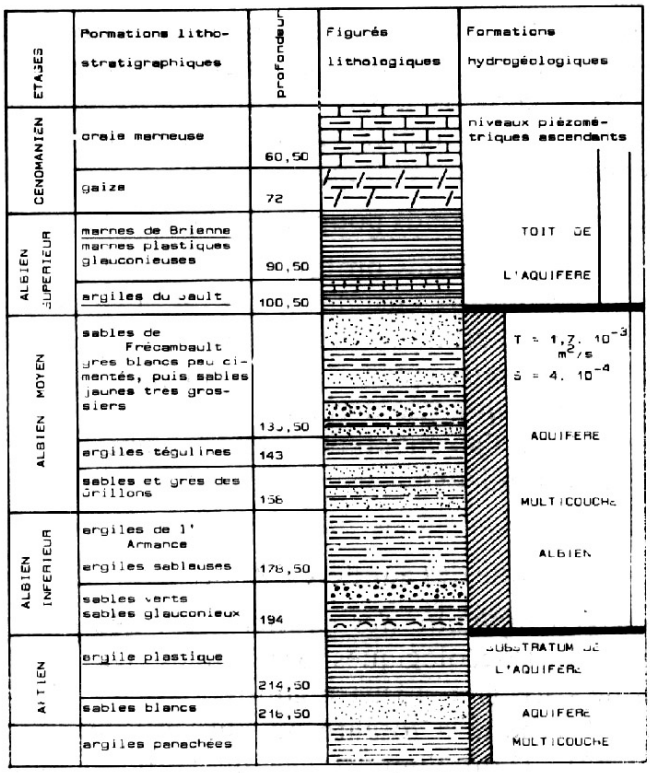
Ce bassin a une superficie de 140 000 km^2 et est limité par les Ardennes (NE), les Vosges (E), le Morvan, le Massif Central (S) et le massif armoricain (W). Les aquifères profonds sont en contact hydrologique avec les nappes correspondantes au sud de l'Angleterre. Les formations géologiques se présentent sous forme d'une «pile d'assiette» creuses, pliées et cassées par la tectonique. Une quarantaine de formations hydrogéologiques existent dans ce bassin, regroupées en 6 aquifères multicouches et 4 aquifères monocouches. La zone centrale est occupée principalement par du tertiaire concentriquement entouré par du Crétacé, du Jurassique et du Trias. Les réservoirs en roches compactes ne sont exploitables qu'en zone d'affleurement. C'est également le cas du Crétacé supérieur dont les fissures sont obstruées sous la couverture (argiles). La minéralisation des grès du Trias (présence de sulfates solubles) et celle des calcaires du Jurassique moyen augmente avec la profondeur. L'eau y atteint finalement des salinités supérieures à celle de l'eau de mer. Les formations du Crétacé supérieur sont présentes à une profondeur maximale de 1000 m sous la Brie et 800 m sous Paris. Les sables Néocomien-Barrémien, juste en dessous du «Gault» imperméable (Crétacé inférieur) et au-dessus du Portlandien (Jurassique supérieur) sont exploitables et contiennent donc les eaux captées le plus profondément. Pour tous les autres aquifères, les captages se situent relativement proches de la surface.



Carte en courbes isohypses de la base du toit de l'aquifère multicouche des sables albiens du bassin de Paris.
1, affleurements ; 2, limite d'extension du réservoir ; 3, courbe isohypse et son altitude.



Carte en courbes isopaches de l'aquifère multicouche des sables albiens du bassin de Paris.
1, affleurements ; 2, limite d'extension du réservoir ; 3, courbe isopache et épaisseur de l'aquifère, en m.



Colonne hydrogéologique du Crétacé inférieur du bassin de Paris. Localisation et structure de l'aquifère multicouche des sables albiens.

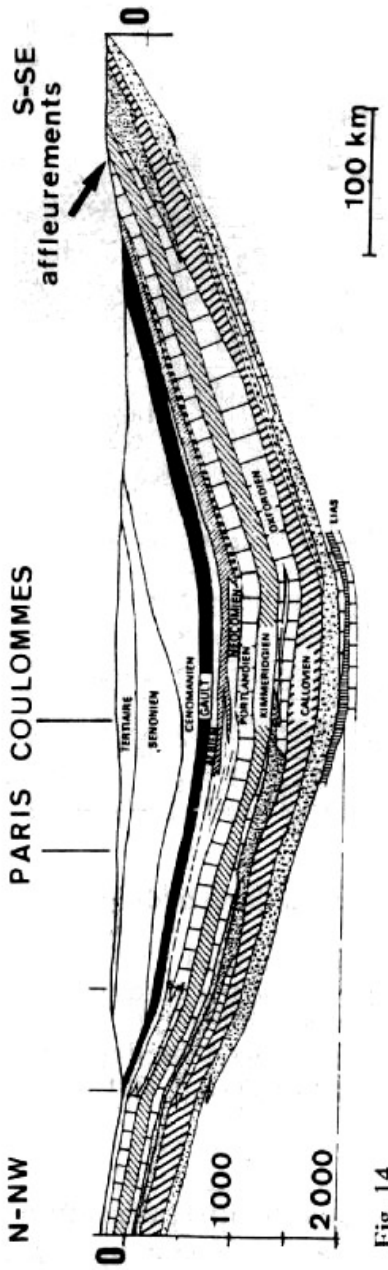
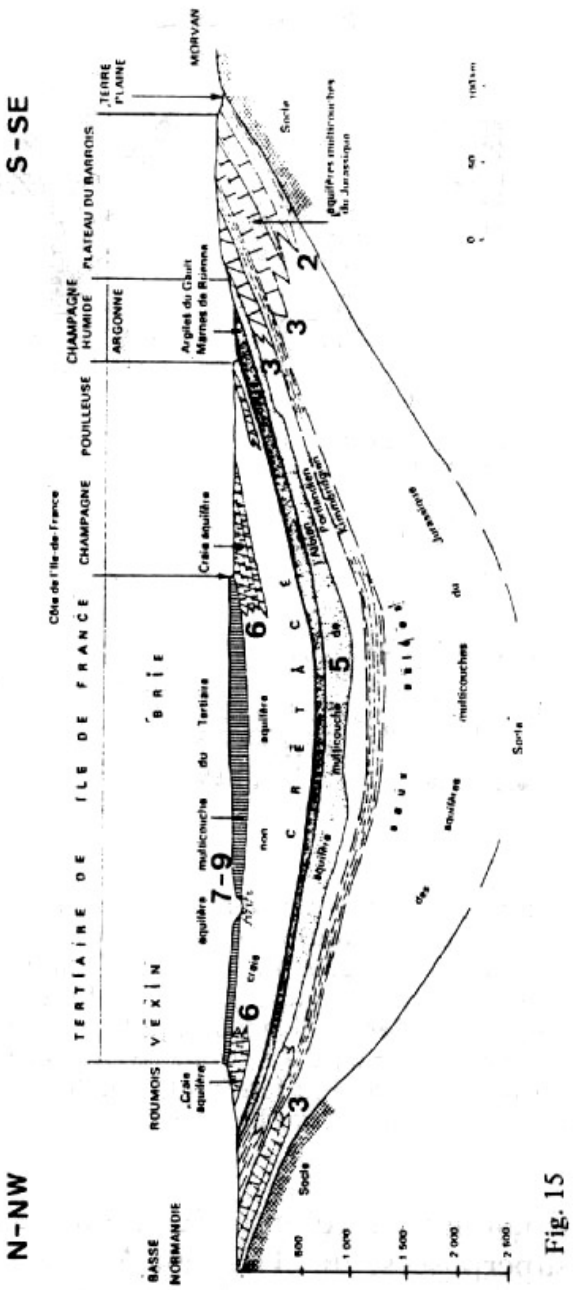


Fig. 14


S-SE
N-NW
MORVAN
TERRE PLAINE
PLATEAU DU BARROIS
CHAMPAGNE HUMIDE
ARGONNE
POUILLEUSE
CHAMPAGNE
Côte de l'Ile-de-France
ILE DE FRANCE
TERTIAIRE DE
BRIE
VEXIN
ROUMOIS
BASSE NORMANDIE
Craie aquifère
Craie aquifère
Argiles du Gault
Marnes de Brienne
Sable
Sable
Sable
Sable
CRETACE
Sable
Sable
Sable
Sable

6.2 Le bassin du Sahara

Les nappes superficielles sont exploitées dans les déserts ou pendant la saison sèche dans les régions plus arrosées. Les galeries drainantes qui permettent d'amener par gravité l'eau des nappes souterraines à la surface sont la création d'une collectivité. Cette technique de mobilisation de l'eau est fort ancienne; les nappes sont captées et l'eau s'écoule par une galerie drainante souterraine construite en pente plus faible que la surface topographique. Elle débouche à quelques kilomètres de la montagne, là où les alluvions plus fines sont plus aisées à travailler. Elles sont encore nombreuses dans le sultanat d'Oman où elles irriguent plus de la moitié de la superficie cultivée. On les rencontre, mais plus rarement, en Syrie (kanawat), au Sahara algérien notamment dans le Gourara et le Touat (ce sont les foggara) ou bien encore dans le Haouz de Marrakech et le Sahara marocain (khettara). En surface la présence de ces galeries drainantes se repère par l'alignement des puits d'évacuation des déblais lors du creusement de la galerie. Toutefois, ces techniques traditionnelles ne permettent pas de mobiliser des volumes importants.

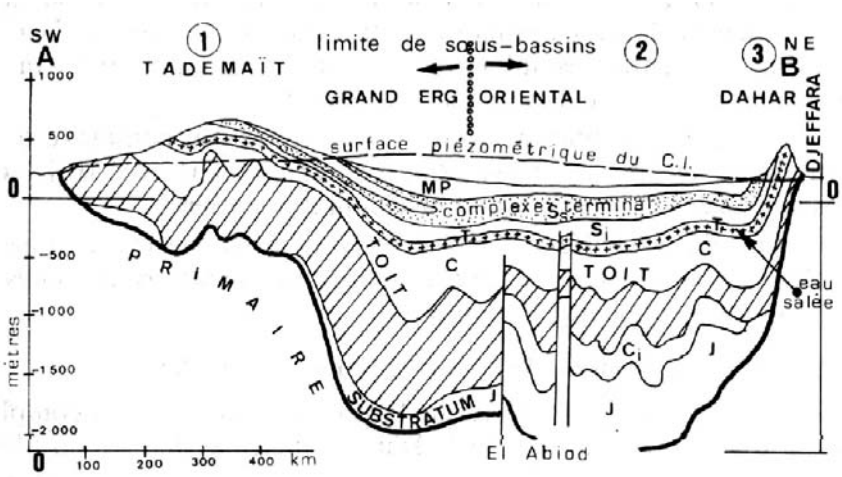
Les nappes phréatiques (à des profondeurs variables de quelques mètres à quelques centaines) dans les vallées, les plaines et les dépressions sont utilisées à l'aide de puits individuels. La variété des appareils élévatoires est surprenante: puits à balancier, vis d'Archimède, puits à poulie, puits à godets, fixés à une chaîne sans fin animée par un tambour mû par un animal, *etc*. Les nappes profondes (plus de 50 mètres) sont exploitées par des forages de 100 à 300 mètres. Ces techniques traditionnelles sont naturellement en perte de vitesse et disparaissent progressivement devant la moto pompe.

Les techniques récentes de forages profonds, parfois à plusieurs centaines, voire quelques milliers de mètres, ont modifié les conditions de mobilisation de l'eau notamment dans les déserts de bouclier où le matériel sédimentaire qui recouvre le vieux socle renferme de gigantesques aquifères. L'avenir de la région repose en partie sur l'existence de trois immenses aquifères: la nappe albienne dans le Sahara algérien, l'aquifère des grès de Nubie en Libye et en Egypte, les aquifères de la péninsule Arabique.

Dans le Bas Sahara, on exploite depuis 1948 la nappe albienne (dite du Continental intercalaire) profonde, selon les secteurs de 800 à 1 500 mètres. Les eaux que l'on utilise aujourd'hui correspondraient à des pluies tombées au cours des périodes pluviales du Quaternaire. L'incertitude demeure quant à son renouvellement actuel mais la taille du réservoir est gigantesque (60 000 km^3) et autorise une exploitation sur un long terme sans risque de rabattement notable. Le bassin s'étire sur 800 000 km^2 entre la bordure sud de l'Atlas au nord et les escarpements qui, au Sahara central, soulignent la limite des grès du Continental intercalaire : Tinrhert et Tademaït. Cet aquifère est bien connu : plus de 600 forages ont été pratiqués. D'après une estimation, publiée par l'UNESCO en 1972, il pourrait fournir un débit de 1 000 m^3/sec pendant deux mille ans! Mais ces chiffres sont illusoires dans la mesure où l'on ne vide pas une nappe aquifère comme un lac et, dès que l'eau n'est plus sous pression, le coût du pompage devient prohibitif. En général, on peut espérer exploiter tout au plus 1/10 000 de ces réserves théoriques. Plus à l'est, le bassin de Mourzouk s'étend sur une superficie à peine inférieure avec un réservoir saturé de plus de 1 000 mètres de grès dans sa partie centrale.

L'aquifère nubien est un des plus grands bassins artésiens du monde: épais de 3 500 mètres, il couvre environ 2500 000 km^2. De structure complexe, fragmenté en plusieurs bassins, il fonctionne en fait comme un ensemble unique s'écoulant vers le nord-est. Sa profondeur est, en moyenne de 600 à 1 800 mètres. Est-il alimenté par les précipitations tropicales du Soudan et du nord du Tchad? Est-il aussi rechargé par les eaux du Nil en amont d'Assouan? Rien n'est moins sûr. Il fournit actuellement le chapelet d'oasis à l'ouest de la vallée du Nil: Swa, Farafra, Bahariya, Dakhla, Kharga et la dépression de Qattara. De grands projets sont fondés sur l'exploitation de ce réservoir de 50 000 km^3. Les Egyptiens voudraient, en reliant les différentes oasis les unes aux autres, créer une “Nouvelle Vallée” mais cette réalisation paraît pour l'instant bien incertaine. Par contre les projets libyens sont déjà en chantier. Il s'agit de conduire sur le littoral par la “Grande Rivière souterraine” (une canalisation géante) les eaux extraites de l'aquifère dans le sud du pays à plusieurs centaines de kilomètres. Actuellement 700 millions de m^3 annuels sont acheminés à des fins d'irrigation vers les rives de la Méditerranée; le projet global porte sur 2 milliards de m^3.

En péninsule Arabique, l'aquifère est encore plus complexe: 11 nappes superposées sont regroupées en 4 systèmes dont certains sont constitués d'eau fossile. L'ensemble partiellement alimenté depuis les hauteurs du Hejaz, de l'Asir et du Yémen s'écoule vers l'est et le nord-est de la Péninsule. Le royaume saoudien utilise annuellement plusieurs milliards de m^3 d'eau souterraine pour cultiver le blé le plus cher du monde au cœur du désert arabique.



Coupe hydrogéologique schématique du bassin hydrogéologique du Sahara septentrional. D'après UNESCO (1972). L'échelle des longueurs est deux cent fois celle des profondeurs. La formation hydrogéologique perméable du continental intercalaire (C.I.), identifiant un aquifère à nappe captive, est figurée en hachures. *MP*, formation hydrogéologique imperméable du Miopliocène ; S_S, en pointillé, formation hydrogéologique perméable carbonatée du complexe terminal (Sénonien supérieur) ; *T*, formation hydrogéologique perméable dolomitique du Turonien à nappe d'eau salée ; C_i, formation hydrogéologique imperméable du Cénomanien argileux ; *J*, Jurassique indéterminé. Noter les failles subverticales d'El Abiod.

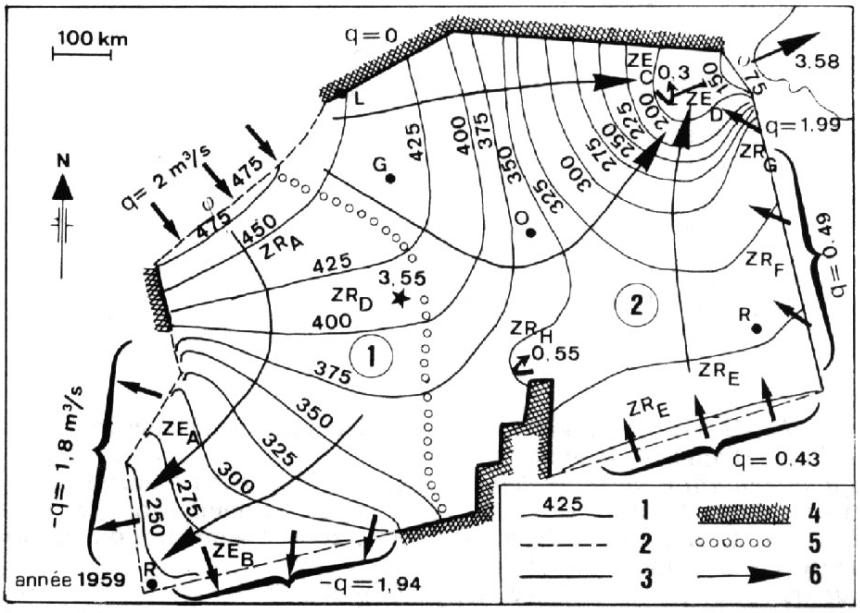
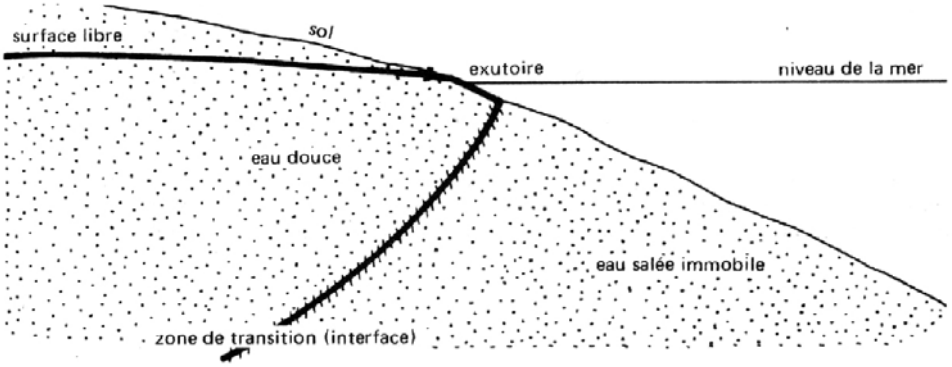
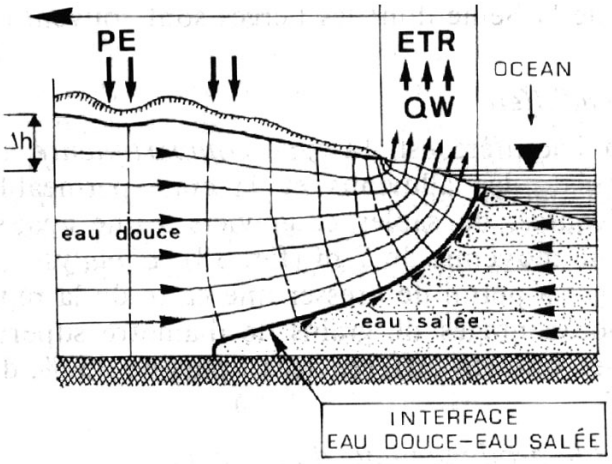


Schéma du comportement hydrodynamique de l'aquifère à nappe captive du continental intercalaire du Sahara septentrional. D'après UNESCO (1972). Schéma obtenu par les études hydrogéologiques affiné par calage du modèle mathématique de simulation hydrodynamique en régime permanent. Zones hydrogéologiques. Comparer avec le tableau 7, p. 21.
Conditions aux limites : 1, courbe hydroisohypse et son niveau piézométrique ; 2, limite à potentiel imposé ; 3, limite à débit imposé entrant et sortant ; 4, limite à débit nul ; 5, ligne de partage des eaux souterraines ; 6, grands axes de flux d'écoulement.

6.3 Interface eau salée – eau douce



La faible épaisseur ce cette zone de transition immobile s'explique par le fait que l'eau douce s'écoule vers l'exutoire littoral, et entraîne constamment les eaux salées qui diffusent.



Aquifère côtier affluant à la mer. L'interface, limite d'intrusion des eaux salées marines, est localisée par la différence de charge, Δh, de la surface piézométrique au-dessus du niveau de la mer.

7 Détérioration de la qualité de l'eau

La qualité naturelle des eaux souterraines peut être altérée par l'activité humaine. La détérioration de la qualité de l'eau est appréciée par mesures des paramètres physico-chimiques et bactériologiques. Dans le cas d'une détérioration jugée importante, l'eau ne sera plus considérée comme potable pour la consommation humaine. Elle pourra être telle quelle utilisée à d'autres fins (irrigation...) ou devra subir un traitement approprié pour retrouver sa potabilité. L'eau des nappes n'est donc pas à l'abri de la pollution et l'auto épuration naturelle n'est pas complète dans toutes les nappes et vis-à-vis de certaines substances.

Les qualités essentielles d'une eau de consommation sont celles d'une eau :

- salubre : c'est à dire saine et qui contribue à la santé ;
- potable : c'est à dire propre à être bue, fraîche, incolore, inodore, aérée, légèrement minéralisée et exempte de matière organique.

7.1 Vulnérabilité des nappes à la pollution.

La vulnérabilité dépend du type de nappe, libre ou captive, et du mode de circulation de l'eau dans l'aquifère. Les nappes libres sont les plus vulnérables: les polluants d'origine superficielle peuvent diffuser librement dans le sol et la zone non saturée jusqu'au niveau piézométrique; d'autre part, la fluctuation verticale saisonnière du niveau piézométrique aboutit à 'rincer' les particules de la zones non saturée et entraîner les substances qui y sont adsorbées. Les nappes captives en revanche sont mieux protégées par les couches imperméables qui les surmontent. Leur alimentation en eau superficielle est plus circonscrite, donc plus aisée à protéger. Leur pollution apparaît lorsque le niveau protecteur imperméable est percé par un ouvrage (ancien forage, fouille profonde). Enfin, la percolation de l'eau dans un milieu poreux peut produire une fixation des substances sur les particules et donc une épuration de l'eau. Ce phénomène n'existe pas dans les milieux fissurés où la circulation est bien plus rapide.

Pour atteindre une nappe libre en milieux poreux, les polluants transportés par les eaux d'infiltration doivent franchir de nombreux obstacles:

- le sol : L'activité chimique et microbiologique est intense (oxydation, réduction...) De nombreux corps sont modifiés chimiquement, les polluants organiques peuvent être métabolisés et minéralisés. Néanmoins, cette biodégradation peut aboutir à des métabolites au moins aussi toxiques que les polluants d'origine. Les complexes argilo-humiques peuvent fixer de nombreux corps minéraux et organiques par adsorption.
- la zone non saturée : Comme le sol, elle joue un rôle dans la filtration et la rétention de certaines substances. Cette action est d'autant plus efficace que la granulométrie est plus faible.
- la zone saturée : La filtration se poursuit dans le milieu poreux de la nappe; le polluant est dilué dans la masse d'eau.

On voit que la protection de la nappe sera d'autant meilleure que le sol et la zone non saturée sont épais, que leur granulométrie est fine, que la vitesse de percolation de l'eau dans la nappe est faible. En revanche, ce type de nappe une fois contaminée par un polluant le reste longtemps.

Dans les nappes libres en milieu fissuré, la vulnérabilité à la pollution dépend de leur recouvrement. Les aquifères en terrains anciens (granites, schistes...) sont généralement recouverts par des formations meubles d'altération qui jouent le rôle de filtre. Ces matériaux meubles peuvent d'ailleurs remplir les fissures de la roches et prolonger ainsi leur action de protection. Il n'en est pas de même dans les aquifères calcaires: les polluants s'infiltrent dans les fissures, y circulent rapidement et réapparaissent en l'état dans les sources et les forages. La pollution apparaît sous forme de pics de courte durée; elle disparaît rapidement si l'apport de polluant cesse.

Les nappes alluviales sont en connexion hydraulique avec le cours d'eau; la qualité de leur eau dépend de celle de la rivière. Comme pour le sol, les matériaux couvrant le fond de la rivière jouent le rôle de filtre. En Picardie, ces nappes sont également soutenues par l'apport des eaux de la nappe de la craie qui influent sur leur qualité. Ces nappes sont particulièrement vulnérables: elles sont de faible étendue, dans des lieux d'urbanisation et d'industrialisation où les sources de pollution sont nombreuses (villes, routes, exploitation des granulats...)

Dans tous les cas, la pollution des eaux souterraines est favorisée par certains aménagements et pratiques:

- interventions qui favorisent l'infiltration dans la nappe: forages de puits sans précaution, ouverture de gravières, puits perdus pour infiltrer les eaux usées...
- mauvaise gestion des eaux de ruissellement, suite à l'imperméabilisation des surfaces (ville, routes), aux drainages agricoles, et des eaux usées.
- modification des pratiques agricoles: remplacement de la prairie par des cultures intensives (remembrement, suppression des haies, du bocage, sols à nu pendant l'hiver). En 25 ans, la surface de la prairie bretonne a été réduite de moitié au profit du maïs fourrage gourmand en herbicides mais exportant peu d'azote et laissant le sol nu pendant l'hiver.
- élevages intensifs 'hors sol', nourris de farines de soja ou animales et de maïs fourrage, produisant une accumulation locale d'excréments difficiles à gérer.

7.2 Principaux types et origine des pollutions

7.2.1 Pollution temporaire et pollution chronique

L'émission exceptionnelle de matière polluante à la suite d'un incident (mauvaise manœuvre en usine, accident de la circulation...) peut entraîner un transfert à la nappe et sa pollution dont la durée dépend de son pouvoir d'auto épuration et de sa vitesse de percolation.

Les pollutions chroniques sont plus insidieuses et dommageables; moins spectaculaires, elles peuvent passer inaperçues (pollution agricole par les nitrates; contaminations par hydrocarbures à partir de sols pollués).

7.2.2 Pollution ponctuelle et pollution diffuse

Le polluant émis sur une faible surface n'affectera qu'un secteur limité de la nappe, qui pourra s'étendre par diffusion. Seuls les captages à proximité de la zone polluée et en aval seront affectés. Selon la densité et la solubilité du polluant, la zone polluée sera circonscrite ou diffuse, à la surface ou à l'intérieur de la nappe.
L'épandage de produits polluants sur une grande surface en revanche affecte l'ensemble de la nappe; elles sont de plus souvent chroniques et déclassent l'ensemble de la nappe pour la production d'eau potable, à moins de traitements adaptés (cas ces pollutions agricoles par pesticides).

- Pollution linéaire : Elle accompagne le trajet des routes et autoroutes, des canaux, des cours d'eau, des voies ferrées.
- Pollutions historiques : De nombreuses zones polluées l'ont été à une époque où les préoccupations environnementales étaient inconnues ou sommaires: pollution par les terrils de mines, les décharges non contrôlées...

7.2.3 Origine de la pollution

- Origine domestique : Dans le cas d'un assainissement, collectif ou individuel, défectueux, des substances indésirables contenues dans les eaux vannées et les eaux ménagères peuvent être transférées à la nappe (matières organiques, détergents, solvants, antibiotiques, micro-organismes...) Le cas se produit avec les puits perdus, l'assainissement individuel avec infiltration dans le sol mal conçue ou mal dimensionné, les stations d'épuration urbaines surchargées... Les ordures ménagères accumulées dans des décharges sauvages ou non mises à la norme (centre d'enfouissement technique) libèrent également des lixiviats riches en polluants.
- Origine industrielle : Les polluants d'origine industrielle sont très variés selon le type d'activité: substances organiques banales, produits organiques de synthèse, hydrocarbures, sels minéraux, métaux lourds...Les pollutions sont exceptionnelles (incident dans un procédé industriel) mais encore trop souvent chroniques (fuite de réservoirs, de canalisations...) Un cas particulier est celui des exploitations minières. L'extraction des granulats en plaine alluviale met en contact l'eau de la nappe avec les polluants éventuels.
- Origine agricole : La pollution est étendue dans l'espace et dans le temps; elle est chronique et concerne de grandes surfaces. En effet, les pratiques actuelles des cultures et de l'élevage influencent fortement le régime et la qualité des eaux. L'utilisation massive des engrais et des produits chimiques de traitement des plantes détruit la vie dans les rivières et rend impropres à la consommation humaine, et parfois animale, les eaux superficielles et souterraines, alors que les professionnels agricoles ont longtemps nié l'impact de leur activité sur la qualité de l'eau et refusé la moindre contrainte (influence du fameux 'lobby agricole' et de la première place de l'agroalimentaire dans les exportations françaises.) Le transfert des engrais et pesticides à la nappe se fait soit par infiltration sur l'ensemble de la surface cultivée, soit par rejet dans des puits perdus, des gouffres et bétoires. La pratique de l'irrigation accélère le transfert. Une pollution ponctuelle commune est fournie par les eaux de rinçages des récipients et appareils d'épandage. L'épandage des boues de stations d'épuration pose problème par leur charge possible en métaux lourds et germes, en plus de leur richesse en azote résiduelle après culture. Les élevages intensifs de porcs, bovins et volailles produisent une grande quantité de déjections azotées qui doit être stockées en réservoirs étanches avant d'être utilisée comme engrais (ou comme aliments). Les lisiers sont responsables de la charge en nitrates des nappes de Bretagne.
- Origine urbaine et routière : Les risques de pollution apparaissent à la construction des réseaux routiers puis à leur exploitation (salage en hiver, hydrocarbures, métaux lourds libérés par les véhicules, substances dangereuses échappées par accident...) En ville, on trouve, en plus des polluants de la voirie, la contamination possible des nappes par les eaux usées (raccordement incomplet ou défectueux, mauvais état des réseaux, surcharge ou mauvais fonctionnement des Stations d'épuration, en particulier absence de traitement tertiaire) par les fuites de cuves de carburants (essence, fioul), par les cimetières. L'imperméabilisation des surfaces (routes, rues, parkings, toits) produit une forte quantité d'eau de ruissellement chargée en produits polluants divers (hydrocarbures, déjections d'animaux...) Ces eaux pluviales polluées ne doivent en aucun cas être transférées à la nappe.
- Injection de produits toxiques dans le sous-sol/ Cette méthode est utilisée aux U.S.A. pour se débarrasser de produits indésirables. Les risques de pollution des nappes profondes sont grands. En France, la méthode d'injection n'est utilisée que pour stocker le gaz.

7.2.4 La pollution minérale

Composés azotés : L'eau d'une nappe ne contient naturellement pas de composés azotés: ceux-ci, provenant de la décomposition de la matière vivante par les micro-organismes, sont minéralisés en azote gazeux ou restent en faible quantité dans le sol. C'est l'augmentation artificielle de la quantité d'azote combiné disponible dans le sol qui crée un déséquilibre entre l'apport et la consommation et produit un excès d'azote qui est finalement entraîné vers la nappe. Cet azote se trouve sous forme de nitrates et d'ammonium. Les nitrates sont des sels très solubles qui sont facilement entraînés en profondeur par les eaux d'infiltration. Pour la nappe de la craie, on estime qu'il faut quelques dizaines d'années pour qu'ils passent du sol à la nappe. Leur origine est principalement agricole, la pollution engendrée est diffuse: ils sont le résultat de:

- un excès de matières organiques végétales en décomposition sur et dans le sol après la récolte, après un déboisement.
- un épandage d'engrais azotés en quantité supérieure aux besoins des plantes cultivées: engrais chimiques (nitrates de potasse, scories,...) et engrais organiques (fumier, lisier, boues de stations d'épuration...). L'origine domestique et industrielle est secondaire; la pollution engendrée est plus ponctuelle (assainissement défectueux par exemple).

La pollution de l'eau des nappes par les nitrates est malheureusement un phénomène généralisé. Elle atteint la quasi-totalité des nappes libres en France. La teneur est la plus importante dans les régions de grandes cultures, ce qui confirme l'origine agricole de la pollution. En Bretagne, la production de lisier par les élevages industriels est supérieure à la capacité d'épandage: les zones saturées en azote sont appelées des 'zones d'excédent structurel'. Dans le bassin Loire-Bretagne, la pollution azotée produite par les élevages et infiltrée dans le sol atteint 100 millions d'équivalents-habitants. En Bretagne, les élevages produisent 215 000 tonnes d'azote par an et les agriculteurs épandent en plus 198 000 tonnes d'engrais azotés minéraux. La teneur en nitrates des eaux souterraines augmente en moyenne de 1 mg/l par an: si cette progression continue, il n'y aura plus d'eau potable (> 50 mg/l de nitrates) en 2005. En 1987, plus de 800 000 habitants en France recevaient une eau contenant plus de 50 mg/l de nitrates, essentiellement dans les zones de grandes cultures ou d'élevage intensif.
Le 'bruit de fond' en nitrates est voisin de 25 mg/l en Picardie. Des teneurs plus élevées sont plutôt dues à des pollutions ponctuelles (eaux usées, eaux de drainage infiltrées dans des puisards...) Dans le Pas-de-Calais, la limite des 50 mg/l a été dépassé. La teneur en nitrates a régulièrement augmenté pendant ces 20 dernières années. Elle a maintenant tendance à se stabiliser pour certaines nappes, peut-être à la suite des campagnes de sensibilisation menées auprès des exploitants agricoles et la nouvelle réglementation (Programme de Maîtrise des Pollutions d'Origine Agricole, un calendrier d'épandage des lisiers et des boues...). Le département de la Somme a ainsi été classé «zone vulnérable» à la pollution par les nitrates. Mais il ne faut pas oublier la lenteur de la migration des nitrates dans le sol et le sous-sol qui explique le retard observé entre les mesures prises et l'effet attendu.
La mise en place des périmètres de protection autour des captages évite notamment l'éventualité de pollutions ponctuelles à partir des eaux usées et des déchets des collectivités.
La présence d'ammonium dans les eaux souterraines provient d'une contamination de surface à partir d'effluents ou d'un phénomène de réduction des nitrates fréquent dans les nappes captives. C'est donc un indice de pollution organique. De même origine, les nitrites, peu stables, sont rares.

Métaux : La pollution par composés métalliques est généralement d'origine industrielle mais elle peut également provenir de la lixiviation des déchets solides ménagers. Certains métaux produisent seulement des inconvénients d'aspect ou de goût (fer, zinc, manganèse...); l'eau doit être traitée pour être potable, ou utilisée en l'état pour d'autres usages. Les métaux lourds, comme le mercure, le cadmium, le plomb, le chrome, sont toxiques et rendent l'eau inutilisable pour l'usage domestique et l'agriculture.

Autres corps : De nombreux corps minéraux, toxiques ou non, produits par l'industrie peuvent être des polluants ponctuels des nappes: chlorures, sulfates, cyanures, sels d'arsenic... En Alsace, l'exploitation de la potasse a produit la pollution par les chlorures et les sulfates de l'eau des nappes.

7.2.5 La pollution organique

Produits de dégradation de la matière vivante : La décomposition de la matière organique par les micro organismes libère des nitrites, nitrates, ammonium, méthane et hydrogène sulfuré; la matière organique résiduelle persistant dans l'eau constitue un milieu favorable au développement des germes qui peuvent être pathogènes. La présence de matière organique et de ses produits de dégradation dans l'eau d'une nappe indique généralement une pollution ponctuelle proche du captage, sauf dans le cas des milieux fissurés où l'origine peut être plus lointaine;c'est un facteur de déclassement de l'eau.

Hydrocarbures : La contamination de la nappe est généralement accidentelle (fuite de cuve d'essence, de mazout, rupture de canalisation...) Les hydrocarbures légers, non miscibles à l'eau, s'étendent à la surface de la nappe; ils confèrent à l'eau un goût caractéristique même à très faible teneur qui la rend imbuvable. Le traitement de la nappe se fait par pompage du polluant. Les hydrocarbures lourds se rassemblent à la base de la nappe; ils diffusent moins.

Substances de synthèse :

- Détergents : Les détergents sont en général dégradés dans le sol ou adsorbés sur les argiles. Certains atteignent la nappe à partir des puisards ou à partir des rivières polluées dans les nappes alluviales. Leur toxicité est faible mais en tant que produits mouillants ils favorisent la dispersion d'autres produits indésirables comme les pesticides.
- Pesticides : Ces produits, généralement peu solubles, sont associés à des mouillants qui favorisent leur dispersion. Ils sont en partie métabolisés ou retenus dans le sol et dans la zone non saturée. Leur transfert à la nappe est faible, même en région agricole: on trouve principalement dans l'eau les traces de deux herbicides, l'atrazine et la simazine, employés à forte dose dans les cultures de maïs. Le lindane est également fréquent. Les fortes teneurs sont dues à des pollutions ponctuelles: produits de rinçage des cuves rejeté dans un puits, fuite d'une citerne...).
- PCB : Les polychlorobiphényles sont utilisés par l'industrie dans les transformateurs électriques, les peintures, les matières plastiques. Ils sont très toxiques. Ils se retrouvent fréquemment dans les eaux superficielles mais rarement dans les nappes, sauf pollution accidentelle.
- Phtalates : Ils entrent dans la composition des PVC et de certaines peintures. Ils sont biodégradables mais sont fréquemment détectés dans les sédiments des eaux superficielles (par exemple le sable de la Baie de Somme) et peuvent contaminer les nappes. Leur toxicité est faible.
- Solvants : Les solvants chlorés (trichloréthylène, tétrachloréthylène, tétrachlorure de carbone) sont peu biodégradables et peu retenus dans le sol: leur transfert à la nappe est donc aisé. Ce type de pollution est observé dans les zones urbaines et industrielles et dans les décharges non contrôlées.

7.2.6 La pollution microbiologique

Les micro-organismes sont peu nombreux dans les eaux de nappe du fait des conditions généralement anaérobies et des faibles quantités de nutriments disponibles. Le transfert de matière organique dans la nappe favorise leur prolifération. Les milieux fissurés, surtout karstiques, présentent des conditions favorables à la survie et la multiplication des germes: pénétration facile de matière organique, conditions aérobies, pas de filtration. Les germes pathogènes sont généralement associés aux coliformes et streptocoques fécaux: la présence de ces derniers indique une pollution par les eaux vannées, les eaux de station d'épuration, les rejets d'élevages industriels etc. et la possibilité d'occurrence de germes pathogènes.

7.3 Défenses naturelles contre les pollutions

7.3.1 Rôle protecteur des sols

Le sol constitue un puissant moyen d'épuration et de recyclage des eaux. Les argiles, les hydroxydes et la matière organique adsorbent les cations (Ca, Mg, K, Na, métaux lourds) et certaines molécules organiques. Les molécules à moins de 6 carbones sont entraînées vers la nappe mais les cycles benzéniques sont retenus. Les phosphates et les atrazines sont bien fixés par les particules du sol; ils peuvent être néanmoins entraînés avec ces particules (érosion des sols à nu).

Le contenu microbiologique du sol peut épurer le sol de ses substances indésirables: minéralisation des composés azotés, dénitrification, dégradation des micropolluants organiques (pesticides). Les germes pathogènes introduits dans le sol sont éliminés quand les conditions de survie sont défavorables: UV, compétition avec la microflore indigène du sol.

7.3.2 Rôle épurateur du couvert végétal et des organismes

Les plantes accumulent des éléments minéraux et servent donc de zone de stockage, en particulier pour les nitrates. La déforestation, le retournement des prairies libèrent une quantité importante d'azote. Les cultures d'hiver permettent de stocker l'excès d'azote, donc à éviter son transfert à la nappe. La végétation des zones humides et des bords de rivières (ripisylve) ont un effet épurateur remarquable (dénitrification dans les zones hydromorphes anaérobies). L'accumulation des polluants se poursuit le long de la chaîne alimentaire (bioaccumulation) chez les animaux. Il peut se produire une biotransformation qui peut être bénéfique (destruction des hydrocarbures) ou non (transformation du mercure en méthyle-mercure très toxique).

Auto-épuration biologique des eaux souterraines : Les organismes vivants et non toxiques (bactéries, petits invertébrés) sont présents dans les eaux souterraines même à grande profondeur. Ils peuvent métaboliser les polluants introduits dans la nappe. Les polluants organiques toxiques comme les polychlorobiphénols (PCB) sont lentement transformés. Les nitrates sont détruits en milieu anaérobie (cas des nappes captives).

8 Définitions

Un **aquifère** est une région du sous-sol saturée en eau.

Un **aquifère confiné** (= nappe captive) est une formation saturée limitée par deux couches imperméables qui restreignent les mouvements de l'eau. Quand on pompe dans un tel aquifère, le niveau de l'eau change rapidement, puis est restauré quand le pompage cesse.

Un **aquifère libre** (ou nappe libre) est limité par une couche imperméable à sa surface inférieure, mais reste libre sur sa surface supérieure.

Un **aquifère perché** se forme quand une lentille de roche peu perméable se situe au-dessus de la surface piézométrique régionale. La roche imperméable bloque l'infiltration en profondeur de l'eau.

La **conductivité hydraulique** décrit la vitesse (distance par unité de temps) à laquelle l'eau se déplace à travers un sol ou un aquifère. Cette vitesse varie selon le type de roche, la porosité, la pente de la surface piézométrique et le degré d'interconnexion des pores.

Un **cône de dépression** est un rabattement du niveau piézométrique autour d'un puits ou d'un groupe de puits en réponse à un pompage.

L'**eau souterraine** est l'eau qui occupe les vides, fractures et tout autre espace entre les particules solides de la roche.

La **frange capillaire** est la partie inférieure de la zone non saturée où l'eau remonte par capillarité depuis la zone saturée.

Le **gradient hydraulique** est la pente de la surface piézométrique. L'eau se déplace toujours par gravité des régions de surface piézométrique élevée vers les creux de cette surface.

La **recharge** est l'eau qui s'infiltre dans le sol et atteint éventuellement la région saturée. La recharge varie considérablement selon la quantité d'eau qui tombe sous forme de précipitations, les circulations superficielles (irrigation, lac, rivière), le type et l'importance de la végétation, la fréquence d'alimentation et la perméabilité et profondeur de la zone non saturée.

La **perméabilité** est la propriété d'une roche ou d'un sol poreux qui contrôle la facilité du déplacement d'un fluide. Graviers ou grés ont une perméabilité élevée tandis que marnes et argiles ont une perméabilité faible.

La **porosité** est le pourcentage de vides dans une roche ou un sol. Elle détermine la quantité d'eau qui peut être stockée. Par exemple un aquifère de 100 mètres d'épaisseur et de 20% de porosité peut stocker une lame d'eau de 20 mètres d'épaisseur.

La **zone saturée** est la portion du sous-sol dont toute la porosité est remplie par de l'eau et ne contient pas d'air.

La **zone non saturée** est la partie du sous-sol située entre la surface et la zone saturée et dont les interstices sont remplis d'un mélange d'air et d'eau.

9 Bibliographie

Tous ces livres se trouvent à la bibliothèque. Les livres indiqués en gras sont les plus appropriés pour le cours d'hydrogéologie.

APPELO C.A.JJ, POSTMA D. 1996. Geochemistry, groundwater and pollution.
ASTIER. J. L. 1971. Géophysique appliquée à l'hydrogéologie.
AUDINET M.1995. Hydrométrie appliquée aux cours d'eau.

BANTON O., BANGOY L.M. 1997. Hydrogéologie. Multiscience environnementale des eaux souterraines.
BODELLE J.1980. L'eau souterraine en France
BRGM. Méthodes d'études et de recherches des nappes aquifères.
CASTANY G. Hydrogéologie principes et méthodes.
CASTANY G. 1967. Traité pratique des eaux souterraines.
CASTANY G, MARGAT J. 1977. Dictionnaire français d'hydrogéologie.
CHAPELLIER D. 1987. Diagraphies appliquées à l'hydrologie.
CAUSSE C., GASSE F. 1998. Hydrologie et géochimie isotopique. Hydrology and isotope geochemistry. Orstom.
DEGREMONT. 1995. Lexique technique de l'eau / Water Treatment Glossary.
DESJARDINS R. 1997. Le traitement des eaux. 2° ed. Ed. Ecole Polytechnique Montréal.
DETAY M. 1993. Le forage de l'eau. Réalisation, entretien, réhabilitation.
DETAY M.1997. La gestion active des aquifères.
DOMENICO P.A, SCHWARTZ F.W. 1990. Physical and chemical hydrogeology.
DUSSART B. 1966. Limnologie.L'étude des eaux continentales.
EDELINE F. 1997. L'épuration biologique des eaux. Lavoisier.
EDELINE F.1998. L'épuration physico-chimique des eaux. Lavoisier.
GAUJOUS, D. 1995. La pollution des milieux aquatiques: aide mémoire. Tec Doc.
GENETIER B. 1992. La pratique des pompages d'essai en hydrogéologie.
HISCOCK, K. 2005. Hydrogeology : Principles and practice.Blackwell Science.
JAUDIN F. 1988. Eaux souterraines et pompes à chaleur. Guide pour l'utilisation de l'eau souterraine à des fins thermiques.
KRUSEMAN G.P.1973. 2nd ed. Interprétation et discussion des pompages d'essai.
LACAZE J.C.1996. L'eutrophisationdes eaux marines et continentales.
LALLEMAND-BARRES A. 1995. Méthodes de dépollution dès eaux souterraines.
LALLEMAND-BARRES M. 1999. Périmètres de protection des captages d'eau souterraine. Manuels et Méthodes BRGM n° 33.
LECOMTE P.1998. Les sites pollués. Traitement des sols et des eaux souterraines. Tec. Doc.
de MARSILY, G. 1981. Hydrogéologie quantitative, Masson.
MORET, L.1946. Les sources thermominerales.Hydrogeologie,géochimie, biologie.
OTV. 1977. Traiter et valoriser les boues.
PAGENKOPF G. 1978. Introduction to natural water chemistry.
PLOTE H. Sondage de reconnaissance hydrogéologique. BRGM.
PLOTE H.1986. Sondage de reconnaissance hydrogéologique. Méthode du marteau fond de trou.
RAMADE F.1998. Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'eau.
REMENEIRAS G.1976. L'hydrologie de l'ingénieur.
RICOUR D., LALLEMAND-BARRES A. 1995. Sites pollués et déchets.
ROCHE, M. 1963. Hydrologie de surface.
ROCHE M.F.1986. Dictionnaire français d'hydrologie de surface.
SCHOELLER H.1962. Les eaux souterraines.
SIGG L., STUMM W., BEHRA P. 1992 et 2000. Chimie des milieux aquatiques.
SOURISSEAU et al. 1998 . Guide de bonne pratique et du contrôle des forages d'eau pour la protection de l'environnement.
TARDAT-HENRY M. 1992. Chimie des eaux.
THIERY D. Interprétation des pompages d'essai en milieu fissuré aquifère. Doc. BRGM n°57.
THONON P. 1992. Hydrogéologie. Télé enseignement Grenoble.
UBREUIL P.1974. Initiation à l'analyse hydrologique.
VAUBOURG P., MARGAT, J. 1997. Lexique d'hydrogéologie.

En FRANCE

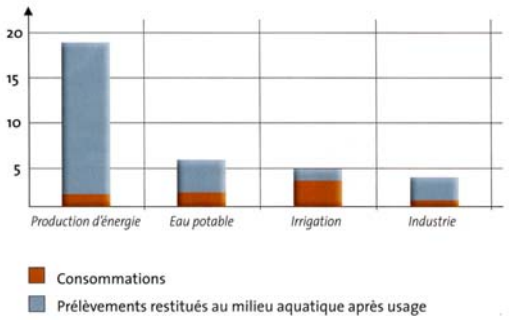
> **La réserve d'eau souterraine** en France est d'environ **2 000 milliards de m³** (1)
> On compte en France **6 500 aquifères** distincts, dont 200 d'importance régionale, 175 à nappe libre et 25 contenant une nappe captive.

La pluie moyenne sur la France est de 440 milliards de m³ / an et la reprise par évaporation est estimée à **270 milliards de m³.**

La différence est composée de **l'écoulement total par les rivières :**
170 milliards de m³ / an
dont **100 milliards de m³** renouvellent l'eau des nappes et **70 milliards de m³** constituent l'écoulement des rivières.

Tous usages confondus, **46 %** des eaux exploitées proviennent des **nappes phréatiques** (hors usage pour l'énergie - refroidissement des centrales).
L'usage domestique de l'eau provient pour **60 % des nappes phréatiques.**

Répartition des volumes prélevés et consommés par usage en 2001
(France métropolitaine - en milliards de m³)



(1) *Il s'agit des volumes d'eau théoriquement mobilisables par dénoyage de tous les aquifères libres et décompression des aquifères captifs. Pour ces derniers, il resterait encore un stock considérable mais pratiquement inaccessible.*

Source Agences de l'Eau - RNDE - Ifen, 2003
http://www.ifen.fr/dee2003/ressourceseau/ressourceseau5.htm

Dans le MONDE

> La réserve mondiale d'eau souterraine est évaluée à **10 000 000 milliards de m³.**

> Le renouvellement total des eaux souterraines est de **5 000 ans en moyenne** et de 300 ans pour les nappes superficielles les plus vives.

> **Les eaux fossiles les plus profondes** ou à très faible capacité de renouvellement peuvent avoir **70 000 ans.**

> Les eaux souterraines représentent **60 %** des eaux continentales.

> **9 pays bénéficient de 60 %** des ressources mondiales en eau : le Brésil, la Russie, la Chine, le Canada, l'Indonésie, les Etats-Unis, l'Inde, la Colombie, le Congo-Zaïre.

Chaque jour

> Un **Américain** consomme en moyenne **700** litres d'eau par jour,
- un **Israëlien**, **260** litres,
- un **Européen**, **200** litres,
- un **Palestinien**, **70** litres,
- un **Africain**, **30** litres,
- un **Haïtien**, **20** litres.

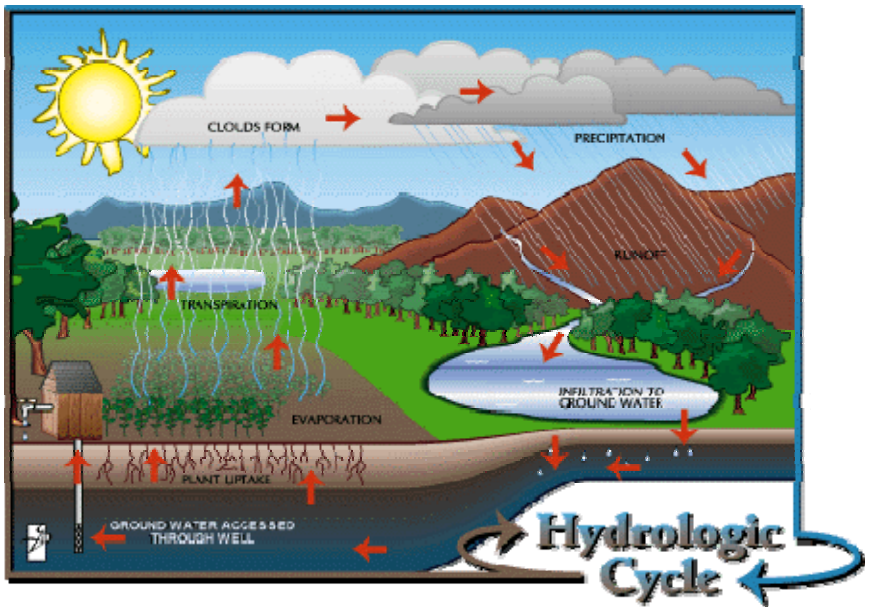
> **250 millions d'individus** ne disposent pas du minimum vital en eau et **400 millions** vivent en situation de "stress hydrique".

Combien consomme ?

> Un **bain** : **150 à 200** litres
> Une **douche** : **60 à 80** litres
> Un **lave-vaisselle** : **25 à 50** litres (vaisselle à la main : 10 à 12 litres)
> Une **chasse d'eau** : **6 à 12** litres
> **Lavage d'une voiture** : **200** litres environ
> **Arrosage du jardin** : **15 à 20** litres par m²

CHIFFRES CLÉS

brgmeditions



FIN