

CHAPITRE 3

AQUIFERE, RESERVOIR D'EAU SOUTERRAINE

Pour former un aquifère la présence de deux constituants, ou phases, est nécessaire : la formation hydrogéologique perméable ou réservoir, et l'eau souterraine. Le terme, eau souterraine, désigne toute l'eau contenue ou circulant dans le réservoir. La fraction mobile est la nappe d'eau souterraine. A signaler éventuellement des gaz avec essentiellement de l'air.

La première fraction du réservoir est capacitive. Elle caractérise le stockage ou la libération de l'eau souterraine. Ces 2 actions sont groupées sous le terme d'emmagasinement souterrain de l'eau. La libération de l'eau du réservoir est provoquée par l'action de la force de la gravité (aquifère à nappe libre) ou par expulsion et décompression (aquifère à nappe captive).

1. Caractéristiques physico-chimiques du réservoir

Le réservoir représente la trame solide de la structure de l'aquifère. L'eau souterraine mobile s'emmagasine et circule dans les vides du réservoir, d'où l'importance de leur étude. Celle-ci porte sur les grandes caractéristiques des vides : morphologie et interconnexions

1.1 Morphologie et interconnection des vides

Les fonctions, réservoir et conduite, sont déterminées essentiellement par les dimensions et les interconnexions des vides. Ces dernières assurent la continuité du milieu aquifère.

L'étude morphologique des vides porte sur leur nature, leur forme et leurs dimensions. Deux grands types de vides, pores et fissures, caractérisent respectivement le milieu poreux et le milieu fissuré.

1.1.1 Morphologie des pores et milieu poreux

Les pores sont des vides de forme plus ou moins sphérique, de petites dimensions (ordre de grandeur millimétrique), ménagés entre les particules solides ou grains, constituant le réservoir. Les grains ne sont jamais jointifs.

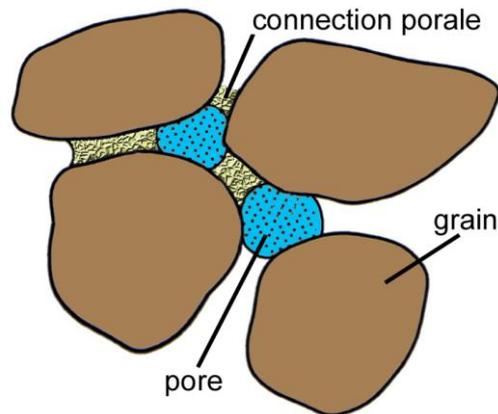
Les dimensions des vides sont étroitement liées à celles des grains, dont la mesure est plus directement accessible. Les diamètres des grains des roches meubles perméables s'étalent dans une gamme de 0.06 à 16 mm. Il est plus petit, de 0.1 à 0.001 mm, soit d'ordre de grandeur micrométrique, dans les argiles, milieu dit imperméable.

1.1.2 Interconnexions des pores et milieu continu

Les pores communiquent entre eux, dans le sens de l'écoulement de l'eau souterraine, permettant le déplacement des particules d'eau. Celles-ci suivent des trajets ou trajectoires, plus ou moins compliqués, identifiant les lignes de courant.

Cet agencement est une des conditions de base pour la validité des lois de l'hydrodynamique souterraine. Par exemple la pierre ponce volcanique qui renferme un grand nombre de vides, mais sans interconnexions, est imperméable. C'est pourquoi il ne faut pas confondre porosité

et perméabilité. La porosité est la propriété du réservoir de stocker ou de libérer de l'eau souterraine. La perméabilité est son aptitude à conduire son écoulement.



1.1.3 Morphologie des fissures et milieu fissuré

Les fissures sont des fentes de forme allongée, à ouverture plus ou moins large; Leur ensemble constitue la fissuration, phénomène naturel dont l'origine est essentiellement mécanique. Les fissures sont classées, suivant leurs dimensions, en 2 types : les microfissures (ouvertures de quelques dixièmes de millimètres) et les macrofissures (ouvertures supérieures à quelques millimètres).

2. Classification hydrogéologique des réservoirs

Basée sur la lithologie et le (ou les) types de vides, elle est importante pour l'étude quantitative de l'infiltration, des fonctions du réservoir et des comportements de l'aquifère. Elle est à la base de l'établissement des colonnes, coupes et cartes hydrogéologiques.

Les deux grands types de vides permettent de distinguer deux grandes catégories de réservoirs :

- Les roches meubles ou non consolidées ;
- Les roches compactes fissurées ou consolidées.

Toutefois les roches compactes présentent souvent des caractères mixtes avec coexistence de pores et de fissures.

3. Etude granulométrique et caractéristiques du milieu poreux

L'étude granulométrique, ou granulométrie, est l'ensemble des techniques permettant de déterminer les caractéristiques physiques, pétrographiques, et géochimiques des roches meubles. Elle repose sur :

- L'examen microscopique : géométrie, forme, dimensions et disposition dans l'espace (arrangement) des grains et des vides ;
- L'étude pétrographique : nature des minéraux constituant les grains, argiles en particulier (échanges d'ions) ;
- L'analyse chimique des grains : sels solubles ;

- L'analyse granulométrique : dimension des grains.

Seule l'analyse granulométrique sera abordée.

✓ Analyse granulométrique et paramètres granulométriques

Une roche meuble, milieu poreux, est constituée d'un assemblage de particules solides, ou grains.

Leurs caractéristiques géométriques, leur répartition et leur disposition vont déterminer le type de réservoir. L'analyse granulométrique a pour but la mesure des diamètres des grains par des paramètres granulométriques.

✓ Intérêt de l'analyse granulométrique

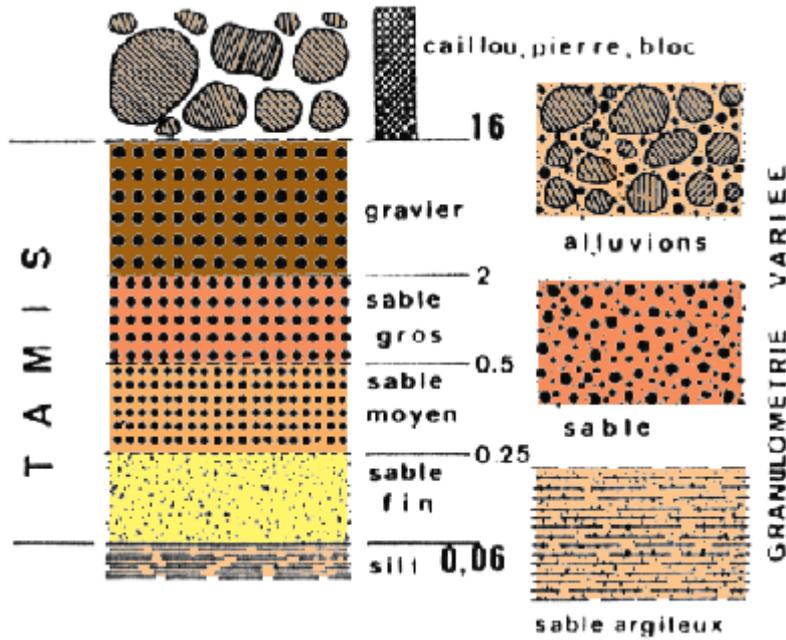
C'est une opération importante qui permet :

- D'accéder aux caractéristiques des vides par celles des grains ;
- De classer quantitativement les roches meubles et de dresser des cartes, trame de la distribution spatiale des paramètres hydrodynamiques ;
- De calculer les paramètres granulométriques ;
- De procéder à l'équipement technique des puits et sondages : calcul de l'ouverture des parties captantes (crépines), calibrage du gravier des massifs filtrants.

✓ Phases et classification granulométriques

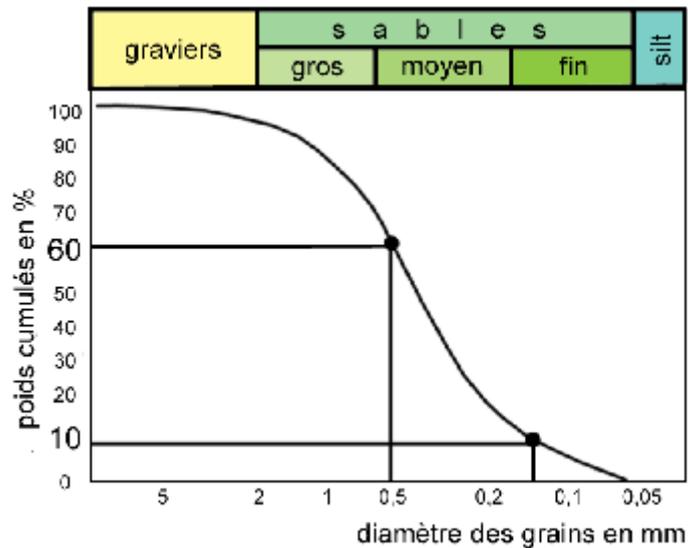
Les dimensions des grains des roches meubles s'étalent dans une gamme, en général continue. L'analyse granulométrique a pour but le tri, par des tamis standard, des grains en fourchettes de diamètres conventionnels. Une première opération est donc le classement des grains en gammes de diamètres déterminés. C'est-à-dire l'établissement d'une classification granulométrique.

Désignation		Diamètres des grains (mm)
Caillou, pierre, bloc		Supérieur à 16
Tamis	Gravier, gravillon	16 à 2
	Gros	2 à 0,5
	Sable Moyen	0,5 à 0,25
	Fin	0,25 à 0,06
Silt		0,06 à 0,002
Argile		Inférieur à 0,002



- **Courbe granulométrique cumulative**

Le traitement statistique des données de l'analyse granulométrique, utilisé en hydrogéologie, est la courbe granulométrique cumulative.



Le couple de données concernant une phase granulométrique, diamètre et poids, obtenu par tamisage, est porté sur le graphique :

- En abscisses logarithmiques les diamètres des grains, en mm, déterminés par les dimensions des mailles des tamis ;
- En ordonnée linéaire les poids cumulés, en grammes, exprimés en pourcentage du poids de l'échantillon étudié.

Le graphique obtenu est la courbe granulométrique cumulative. Le sédiment est représenté par le secteur du diagramme positionné sous la courbe.

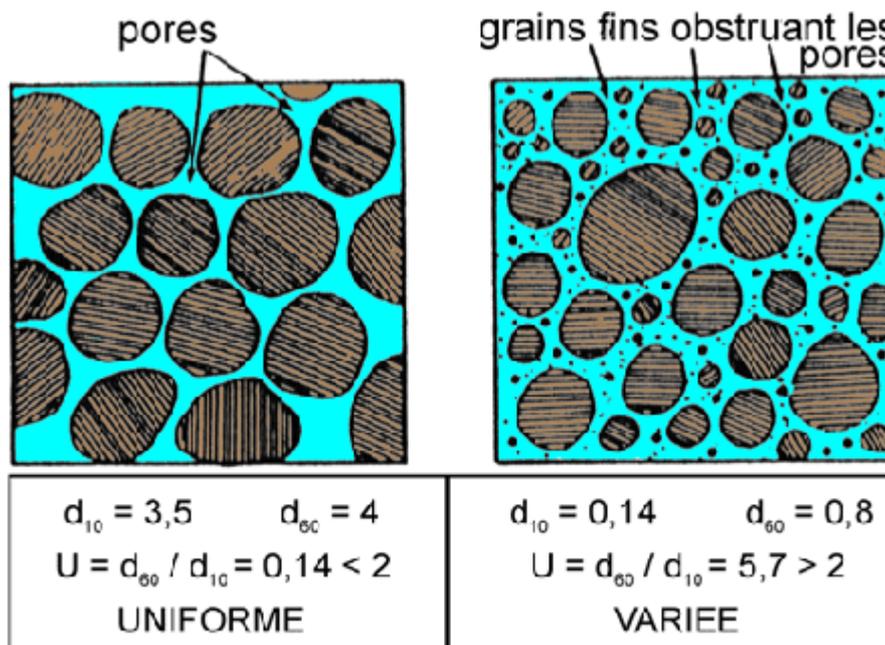
La courbe cumulative permet de calculer 2 paramètres granulométriques principaux : le diamètre caractéristique, d_x et le coefficient d'uniformité, U .

Le diamètre caractéristique, d_x est mesuré par la valeur lue en abscisse, correspondant à un pourcentage en poids cumulé. Le plus utilisé est le diamètre efficace d_{10} , obtenu par la valeur 10%. Cette valeur a été fixée conventionnellement en considérant que les grains fins, entraînés par l'eau en mouvement obstruent les pores réduisant ainsi leurs dimensions

Le coefficient d'uniformité, U (sans dimension), attribue une valeur numérique à la pente de la courbe. Il est calculé par le rapport suivant :

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Par convention, si U est compris entre 1 et 2, la granulométrie est dite uniforme. S'il est supérieur à 2, elle est variée.



3. Paramètres des vides ; Porosité et surface spécifique

Les deux paramètres principaux des vides sont la porosité, et la surface spécifique. Tous sont exprimés en référence au volume total de l'échantillon car la géologie évalue les volumes des formations hydrogéologiques.

3.1 Porosité totale

La porosité totale, ou porosité, est la propriété d'un milieu poreux ou fissuré, de comporter des vides interconnectés ou non. Elle est exprimée, en pourcentage, par la relation suivante :

Porosité = volume des vides/ volume total

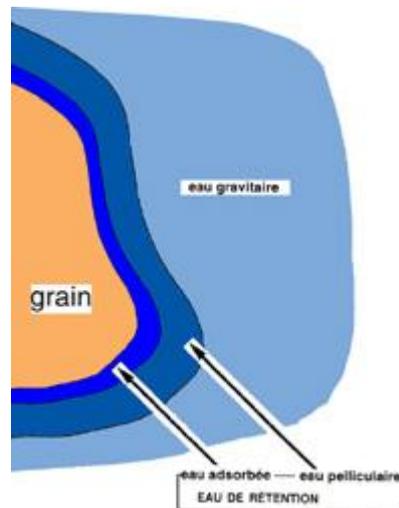
Ce paramètre est d'une utilisation pratique très limitée en hydrogéologie, un réservoir n'étant jamais complètement dépourvu de son eau. C'est pourquoi les facteurs de la porosité seront étudiés avec la porosité efficace.

3.2 Surface spécifique des grains ou des fissures

La surface spécifique d'un milieu poreux ou fissuré est le rapport de la surface totale des grains ou des parois des fissures, soit à l'unité de volume d'échantillon (surface volumique), soit à l'unité de masse (surface massique) du solide. C'est le facteur principal des actions physico-chimiques d'interface eau/roche (phénomènes d'adsorption). Elle croît fortement lorsque le diamètre des grains ou la densité des fissures diminue.

4. Types d'eau souterraine

Il convient de distinguer, pour définir les caractéristiques hydrogéologiques des réservoirs, deux types d'eau souterraine : l'eau gravitaire et l'eau de rétention.



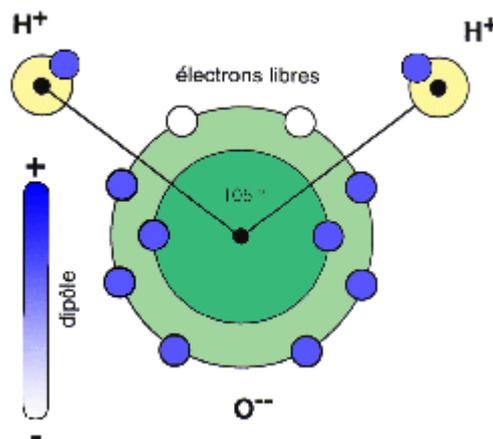
4.1 L'eau gravitaire

L'eau gravitaire est la fraction de l'eau souterraine libérée par l'action de la force de gravité. C'est l'eau mobilisable. Elle seule circule dans les aquifères, sous l'action des gradients et alimente les ouvrages de captage et les sources. Le volume d'eau gravitaire libéré est fonction du temps d'égouttage et de la granulométrie.

4.2 L'eau de rétention

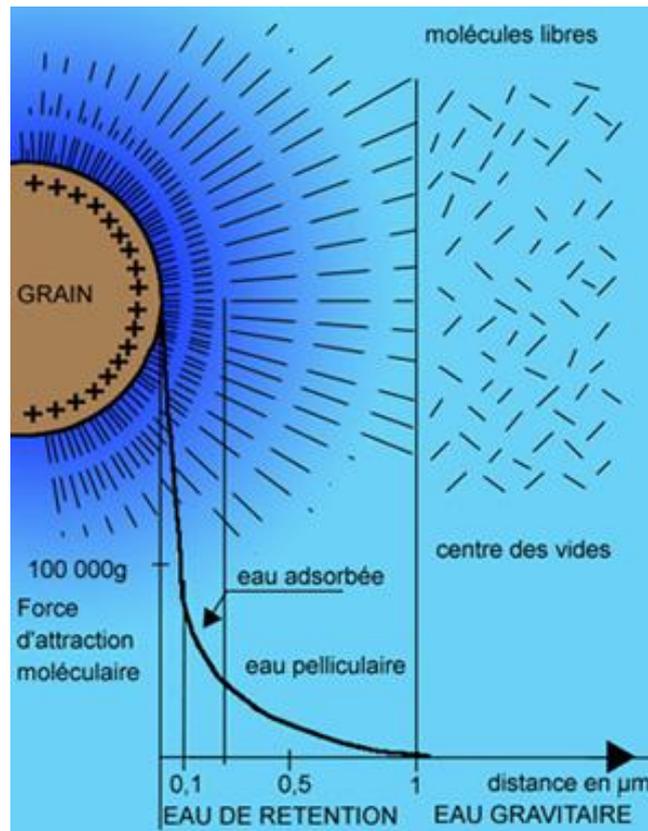
L'eau de rétention est la fraction de l'eau souterraine, maintenue dans les vides à la surface des grains ou des parois des microfissures, par des forces supérieures à celles de la gravité. Elle n'est donc pas mobilisable. Attirée fortement à la surface du solide, elle fait corps avec lui et appartient physiquement et mécaniquement à la même phase de l'aquifère, réservoir/eau de rétention.

Le phénomène de rétention de l'eau, à la surface des grains, est la conséquence de la structure moléculaire particulière de l'eau. La molécule d'eau est une très petite molécule angulaire. Elle est constituée de 2 atomes d'hydrogènes et d'un atome d'oxygène chargé négativement. Le défaut de 2 électrons de l'atome d'oxygène la dote d'un moment dipolaire élevé. Ainsi polarisée, elle se comporte comme un minuscule aimant permanent ou dipôle. Au contact des molécules polarisées se développent ainsi des forces d'attraction moléculaire de plusieurs dizaines de milliers de fois la force de gravité.



La limite de séparation des 2 phases eau/grain, est le lieu de champs de force. Ceux-ci attirent, en les orientant perpendiculairement à la surface, les dipôles qui sont solidement fixés. La molécule est adsorbée.

Les forces d'attraction moléculaire décroissent, très rapidement, de la surface des grains vers le centre des vides. Les liaisons deviennent de plus en plus lâches et l'eau peut-être libérée du réservoir par des forces de plus en plus faibles. Les molécules devenues libres, à une distance très faible de la surface du grain (1 à 2 microns) peuvent être déplacées par la force de gravité. Cet état n'étant pas constant, cette conception explique, en partie, l'accroissement en fonction du temps, du volume d'eau gravitaire obtenue par égouttage.



On peut ainsi séparer 2 phases dans la classe de l'eau de rétention :

- L'eau adsorbée constitue un film continu, mince pellicule d'une épaisseur de l'ordre du dixième de micron, soit l'empilement de quelques dizaines de molécules. En pourcentage du volume total, elle augmente en fonction de la granulométrie : 2 à 5% dans les sables gros, 10 à 15 dans les sables fins et 40 à 50 dans les argiles.
- L'eau pelliculaire représente une pellicule de l'épaisseur de l'ordre du micron. Elle peut se déplacer à la surface des grains sous l'action de l'attraction des molécules d'eau voisines.

5. Caractéristiques hydrogéologiques du complexe eau/réservoir.

Les paramètres de la fonction réservoir de l'aquifère peuvent être mesurés en laboratoire et sur le terrain. En laboratoire, le complexe eau/réservoir ou aquifère, est caractérisé par un paramètre hydrodynamique important, la porosité efficace. Sur le terrain, les pompages d'essai, l'étude des fluctuations de la surface piézométrique, déterminent les paramètres hydrodynamiques de l'emmagasinement souterrain, dont le principal est le coefficient d'emmagasinement.

5.1 Porosité efficace

La porosité efficace, exprimée en pourcentage, est le rapport du volume d'eau gravitaire que le réservoir peut contenir à l'état saturé, puis libérer sous l'effet d'un égouttage complet, à son volume total.

$$\text{Porosité efficace} = \frac{\text{Volume d'eau gravitaire}}{\text{Volume total}}$$

5.2 Valeurs et facteurs de la porosité efficace

Types de sédiments	d ₁₀ mm	Porosité (n)	Porosité efficace (n _e)	Coefficient de perméabilité K
Gravier moyen	2.5	45	40	3.10 ⁻¹
Sable gros	0.250	38	34	2.10 ⁻³
Sable moyen	0.125	40	30	6.10 ⁻⁴
Sable fin	0.09	40	28	7.10 ⁻⁴
Sable très fin	0.045	40	24	2.10 ⁻⁵
Sable silteux	0.005	32	5	1.10 ⁻⁹
Silt	0.003	36	3	3.10 ⁻⁸
Silt argileux	0.001	38	-	1.10 ⁻⁹
Argile	0.0002	47	-	5.10 ⁻¹⁰

Types de réservoirs	Porosité efficace %	Types de réservoirs	Porosité efficace %
Gravier gros	30	Sable gros + silt	5
Gravier moyen	25	Silt	2
Gravier fin	20	Vases	0.1
Gravier + sable	15 à 25	Calcaire fissuré	2 à 10
Alluvions	8 à 10	Craie	2 à 5
Sable gros	20	Grès fissuré	2 à 15
Sable moyen	15	Granite fissuré	0.1 à 2
Sable fin	10	Basalte fissuré	8 à 10
Sable très fin	5	schistes	0.1 à 2

5.3 Facteurs de la porosité efficace

Il est utile de relier la porosité efficace aux caractéristiques physiques des réservoirs. Celles-ci constituent la trame de la distribution spatiale des données ponctuelles. Les trois facteurs principaux de la porosité efficace sont :

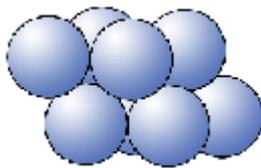
- Les diamètres respectifs des grains,
- L'arrangement des grains,
- La surface spécifique des grains.

L'examen des tableaux précédents dégage 2 faits :

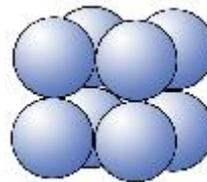
La porosité efficace, la granulométrie étant uniforme, diminue avec le diamètre des grains ;

La porosité efficace diminue lorsque la granulométrie est variée. Pour un sédiment mixte, elle est, en générale, plus faible que celle de l'un quelconque des constituants, d'où la prise en compte du diamètre efficace d_{10} .

L'arrangement des grains exprime leur disposition dans l'espace. La porosité est fortement influencée par l'arrangement des grains. Elle décroît de 47.6% pour l'arrangement cubique, le plus lâche, à 25.9% pour l'arrangement rhomboédrique le plus tassé. Une conséquence est la diminution de la porosité avec la profondeur.



Arrangement rhomboédrique



Arrangement cubique

Les forces de liaison entre l'eau et le réservoir ont une intensité maximale à la surface des grains. La grandeur de cette surface est donc importante. C'est pourquoi un paramètre a été défini, la surface spécifique des grains. La porosité efficace croît avec la surface spécifique des grains.

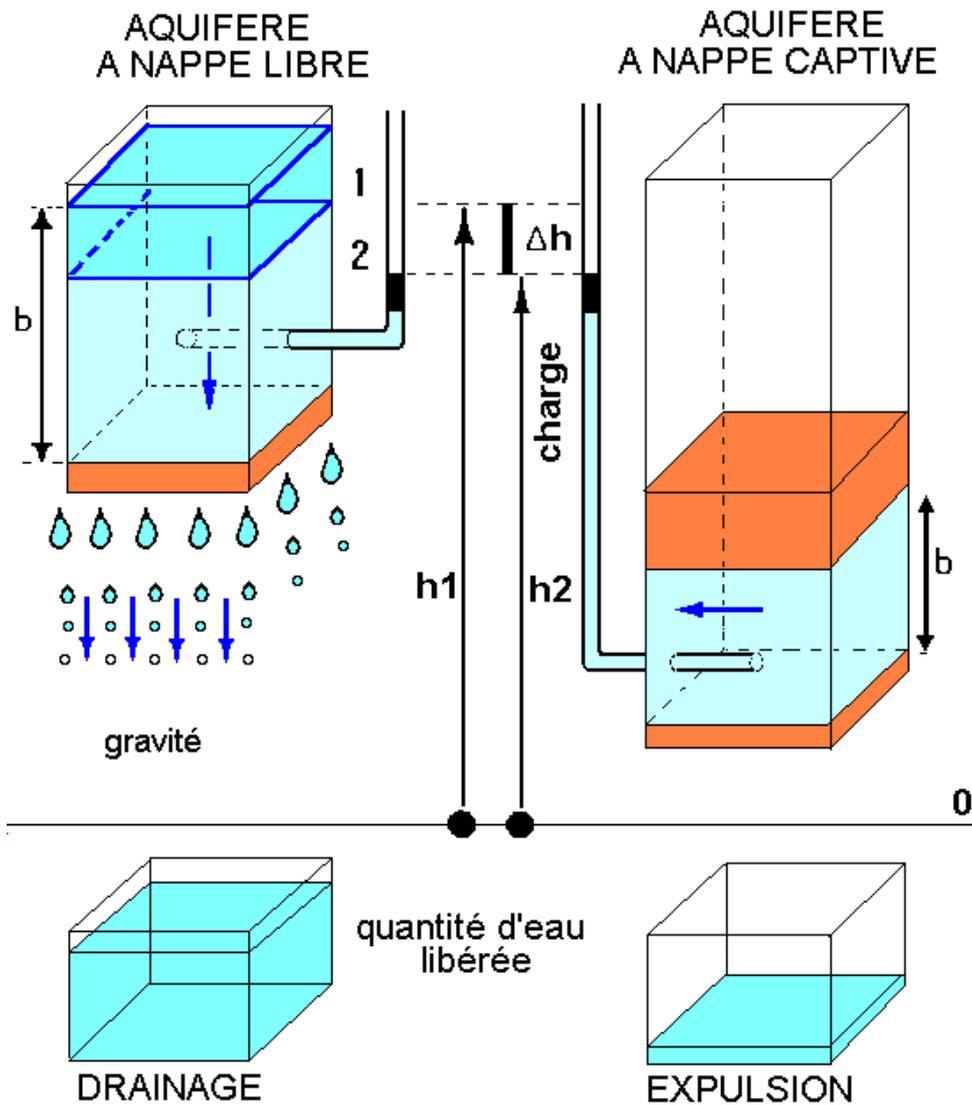
5.4 Emmagasinement souterrain

Des études et expérimentations, sur le terrain, permettent de mesurer, en place et sur un volume important, les paramètres de l'emmagasinement de l'eau dans les réservoirs.

Sous l'effet d'un abaissement unitaire de niveau piézométrique, entraînant une différence de charge, l'eau est libérée du réservoir :

- dans l'aquifère à nappe libre par l'action de la force de gravité
- dans l'aquifère à nappe captive par expulsion de l'eau

Le *coefficient d'emmagasinement* d'un aquifère est déterminé à partir de la quantité d'eau libérée pour une perte de charge donnée, c'est à dire une baisse de pression. Dans un aquifère, la perte, ou le gain, d'une certaine quantité d'eau se traduit par une variation de la charge hydraulique. Celle-ci est mesurée à l'aide de piézomètres. Pour une nappe libre, c'est la gravité qui provoque l'écoulement de l'eau. Pour une nappe captive, l'expulsion d'une petite quantité d'eau provoque une grande variation de pression et donc une forte perte de charge. D'une façon générale, pour une même différence de charge, la quantité d'eau libérée est beaucoup plus grande dans une nappe libre.



Le coefficient d'emmagasinement S est défini comme le rapport du volume d'eau libérée (ou emmagasinée) par unité de surface sur la différence de charge hydraulique. Dans les nappes libres, le coefficient d'emmagasinement est égal à la porosité efficace (eau gravitaire); il est compris entre 0,2 et 0,01. Dans les nappes captive, il est beaucoup plus petit, 0,001 à 0,0001. Il est mesuré sur le terrain par des pompages d'essai qui rabattent la nappe.

6. Zonalité d'un aquifère

Une coupe depuis la surface du sol jusqu'à la nappe phréatique montre la zonalité suivante:

- une zone non saturée contenant de l'air, de l'eau de rétention et de l'eau gravitaire en transit; la base de cette zone est imprégnée d'eau provenant de la remontée capillaire à partir de la zone saturée.
- une zone saturée contenant de l'eau de rétention et de l'eau gravitaire; la partie supérieure est imprégnée d'eau remontant par capillarité. Les piézomètres indiquent la position du sommet de l'eau gravitaire alors que le sommet de la nappe libre se situe au niveau de l'eau capillaire.

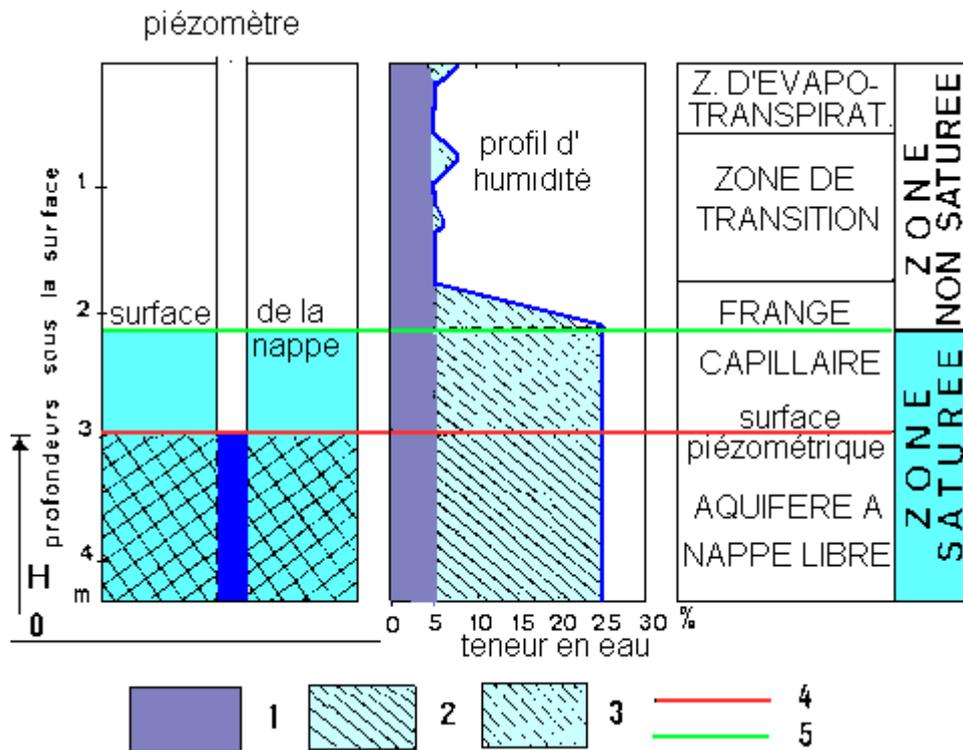


Fig. zonalité de l'eau dans un aquifère à nappe libre (adapté de G. CASTANY).
 (1) eau de rétention; (2) eau gravitaire; (3) remontée capillaires; (4) surface piézométrique;
 (5) surface de la nappe.