

Université Abou Bekr BELKAID
Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique
Options:
Hydraulique urbaine & Ouvrages hydrauliques

Cours d'Hydraulique souterraine

7U 822 & 7O 822

Pr K. BABA-HAMED



**EAUX
SOUTERRAINES**

Cours d'Hydraulique souterraine
M1 HU & M1 OH



Pr K.BABA HAMED
2019 - 2020

HYDROGEOLOGIE

Définitions

Partie de la géologie qui traite de la circulation des eaux dans le sol et le sous sol, de la recherche et du captage des eaux souterraines.

Connaissance des conditions géologiques et hydrologiques et des lois physiques qui régissent l'origine, la présence, Les mouvements et les propriétés des eaux souterraines.



HYDROGEOLOGIE

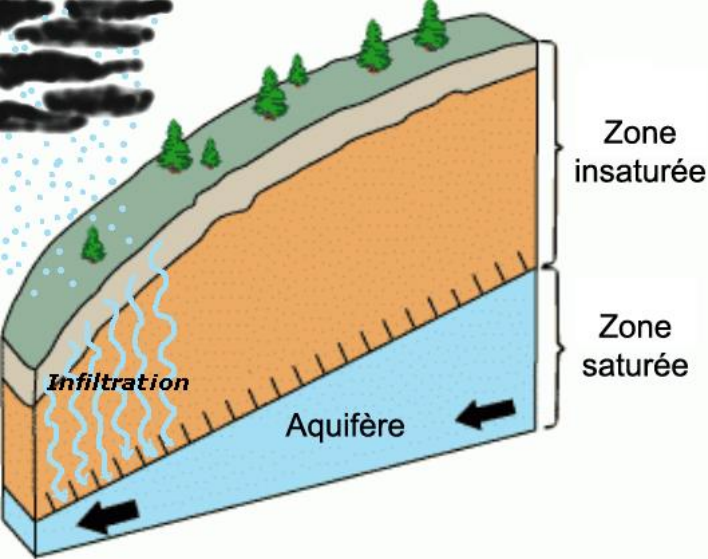
Définitions

Roche + Eau = Aquifère

- Ensemble de roches perméables
- Comportant une zone saturée en eau
- Suffisamment conducteur pour permettre:
 - *- L'écoulement significatif d'une nappe souterraine,
 - *- Le captage d'eau en quantités appréciables.



Types de réservoirs



Les caractéristiques du réservoir déterminent les propriétés de l'aquifère.

- Disponibilité de l'eau,
- Qualité de l'eau,
- Vulnérabilité de la ressource

DE L'EAU DANS LES ROCHES : RAPPELS

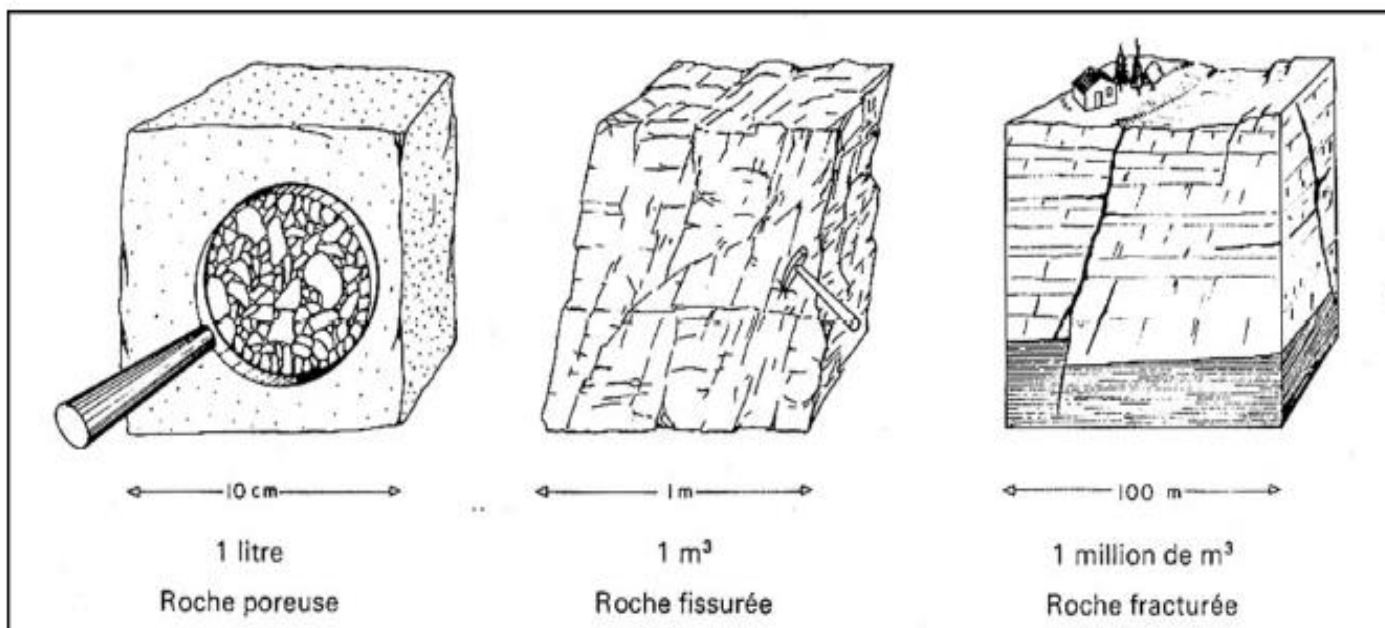
Facteurs
lithologiques



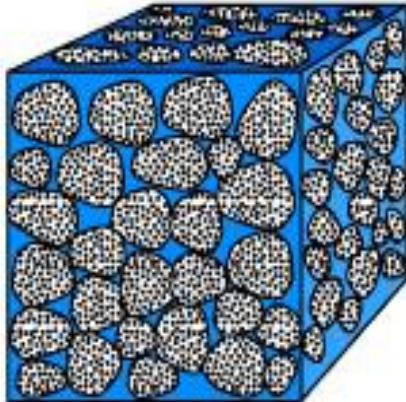
alluvions



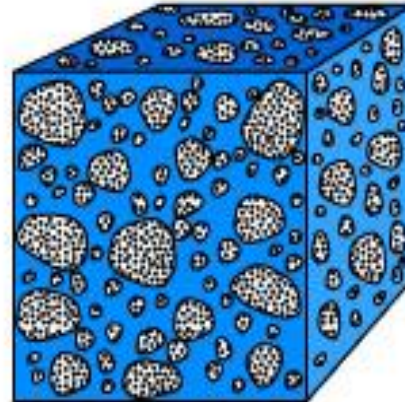
DE L'EAU DANS LES ROCHES : RAPPELS



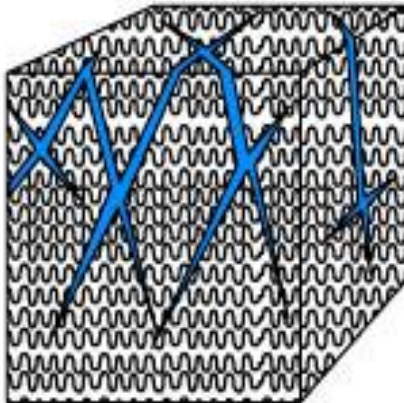
Types de réservoirs



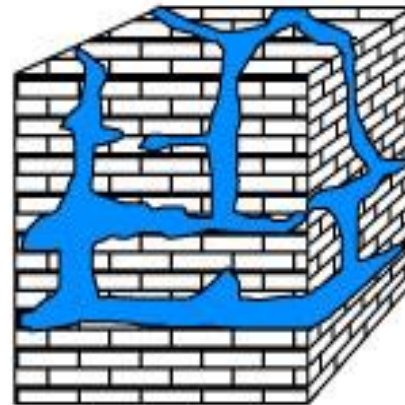
Porosité d'interstice
(éléments bien classés)



Porosité d'interstice
(éléments hétérométriques)

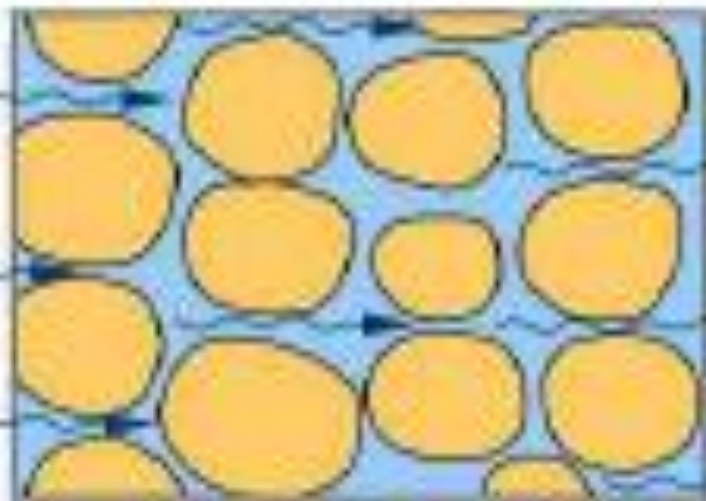


Porosité de fissures

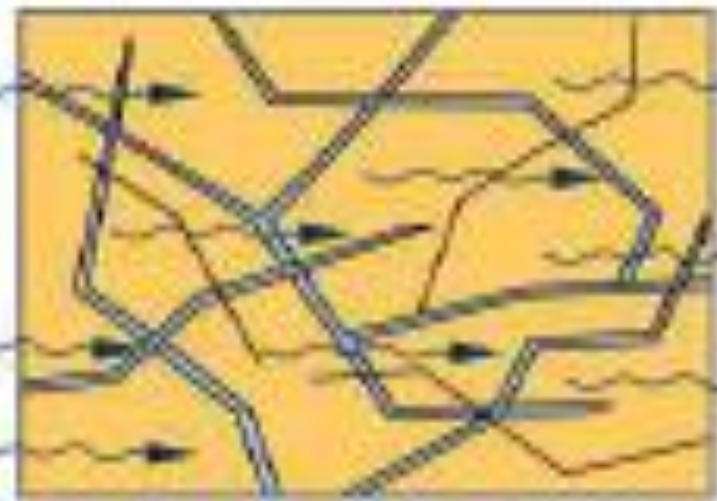


Porosité de chenaux

Types de réservoirs

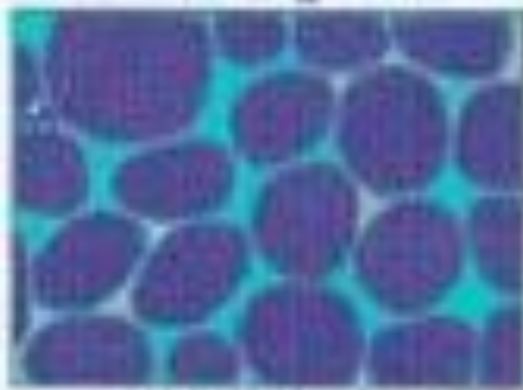


Perméabilité interparticulaire



Perméabilité de fractures

Sable et gravier



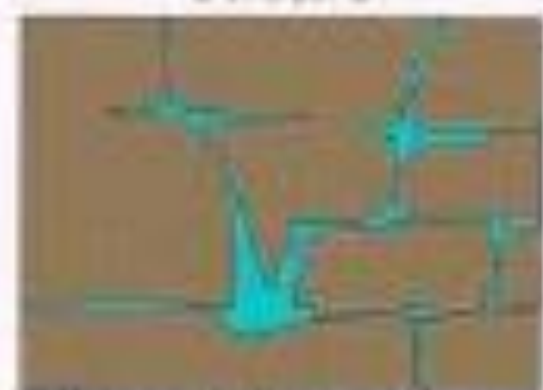
Intergranulaire

Roches ignées



Fissure

Calcaire



Vide de dissolution

Types de réservoirs

Aquifère à porosité de texture ou d'interstices

- Roches détritiques meubles ou facilement cimentées: Sables, graviers, éboulis, moraines (éléments constitutifs des alluvions).
- Roches de type grenue: Grès, conglomérats, certains calcaires (craie).

L'eau circule dans les vides entre les grains

- *- Vitesse de circulation lente
- *- Filtration efficace

Types de réservoirs

Aquifère à porosité de fracture

Tout type de roches plus ou moins fissurées ou fracturées.

- Granitoïdes, séries métamorphiques (socle, formations volcaniques).
- Ensembles sédimentaires faillés (grès, marnes et calcaires).

L'eau circule dans un réseau de fissures

- *- Vitesse de circulation élevée
- *- Filtration médiocre

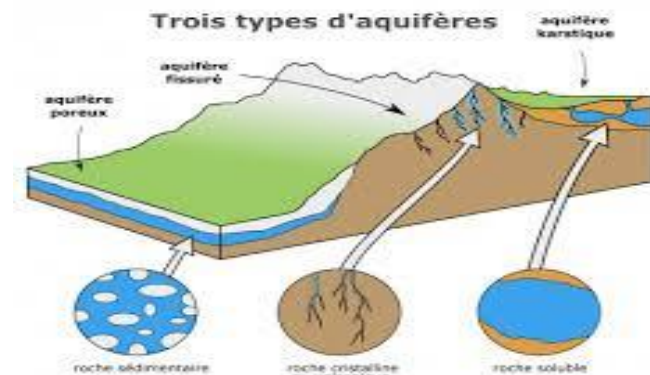
Types de réservoirs

Aquifère mixte

Porosité matricielle drainée par une fracturation tectonique.

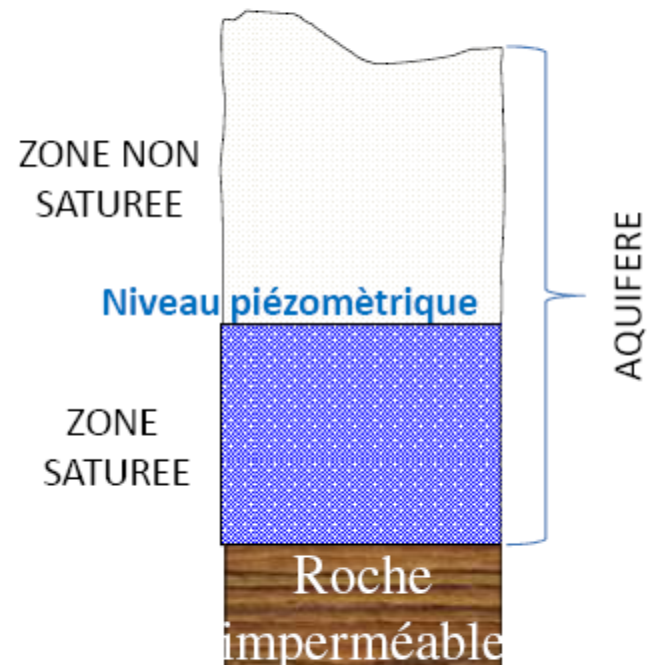
- Grès et conglomérats faillés.
- Karst de la craie: porosité matricielle associée à une fracturation élargie par dissolution de l'encaissant.

Combinaison de deux types d'écoulement



DE L'EAU DANS LES ROCHES : RAPPELS

- **Aquifère** : formation géologique poreuse et perméable comportant une zone saturée en eau et permettant l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables. Un aquifère peut comporter une zone non saturée
- **Aquitard** : formation géologique trop imperméable pour être exploitée, mais dont les écoulements à long terme ne sont pas négligeables
- **Aquiclude** : formation géologique imperméable
- **Nappe**: ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère dont toutes les parties sont en liaison hydraulique
- **Niveau piézométrique**: défini en chaque point par le niveau le plus haut (niveau piézométrique) atteint par l'eau d'une nappe montant dans un conduit de forage atteignant cette nappe. En coupe cette surface décrit des lignes de niveaux piézométriques identiques ou **isopièzes**



Quelques paramètres hydrogéologiques

Porosité: V_V / V_{tot}

(volume des vides V_V divisé par le volume total V_{tot})

Perméabilité K: Résistance à l'avancement de l'eau

K (m/s)		10^1	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
GRANULOMETRIE	homogène	Gravier pur		Sable pur	Sable très fin		Silt	Argile						
	variée	Gravier gros et moyen	Gravier et sable		Sable et argile-Limons									
DEGRES DE PERMEABILITE	TRES BONNE				BONNE			MAUVAISE				NULLE		
TYPES DE FORMATIONS	PERMEABLES						SEMI-PERMEABLES					IMPER.		

↑ limites conventionnelles

Plus la **taille des grains** est **faible** plus la **résistance** à l'avancement de l'eau est **importante**.

Les formations argileuses sont considérées comme **imperméables** en terme de production d'eau.

Quelques paramètres hydrogéologiques

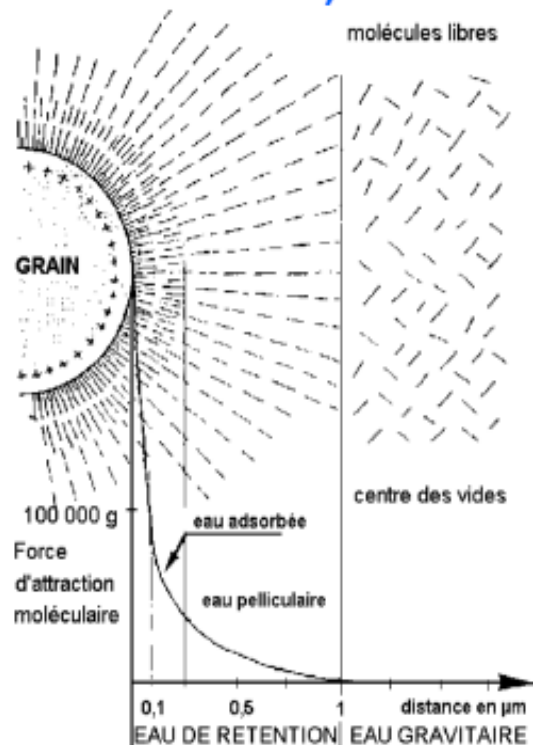
1- La porosité

Porosité totale

$$n_t = \frac{V_{\text{vides}}}{V_{\text{total}}} \quad 0 < n_t < 1 \text{ ou } n_t \text{ exprimée en \%}$$

Mais, toute l'eau ne peut pas s'écouler...

eau libre (gravitaire) + eau liée



Porosité efficace
ou cinématique

$$n_e = \frac{V_{\text{eau.libre}}}{V_{\text{total}}}$$

$$0 < n_e < n_t$$

Quelques paramètres hydrogéologiques

La porosité dépend principalement de :

- la forme des grains : sphériques, allongés, angulaires,
- la taille des grains et leur distribution,
- l'intensité de la cimentation de la roche.

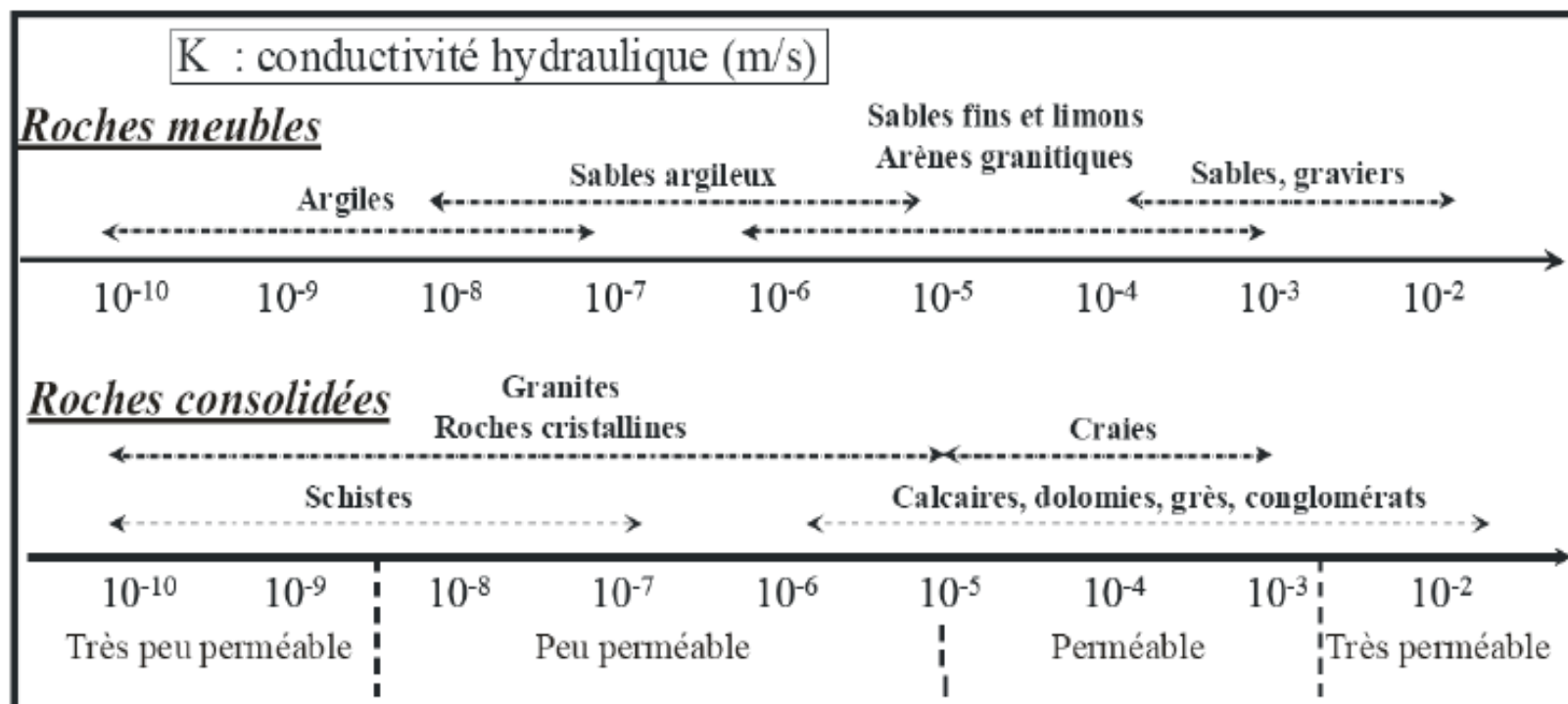
L'origine de la porosité: peut être primaire ou secondaire :

- la porosité primaire: formée par les pores créés au cours de la genèse de la roche: lors de la sédimentation, au cours de la cristallisation ou du refroidissement,
- la porosité secondaire: acquise après la genèse soit par fracturation, soit par dissolution (ex: grès à ciment calcaire).

Quelques paramètres hydrogéologiques

2- La perméabilité

La **perméabilité** (ou conductivité hydraulique) **K en m/s** des roches du sous-sol détermine leur capacité à **conduire** les eaux souterraines



Quelques paramètres hydrogéologiques

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 , le Darcy ($1 \text{ Darcy} = 10^{-12} m^2$).
La valeur de la perméabilité ne dépend que de la roche et pas du fluide.

Conductivité hydraulique (K)

La conductivité hydraulique (K), est reliée de manière étroite à la perméabilité (k).

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/ m³ pour l'eau pure),

g = Constante de la gravité (9.81 m/s²)

k = Perméabilité intrinsèque (m²) ou Darcy (1 Darcy = 10⁻¹² m²)

- 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 de 10⁻¹⁴ m² à 10⁻¹ m².

Quelques valeurs de porosité et de conductivités hydrauliques

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%	$\leq 10^{-8}$

Estimation de la perméabilité

La **perméabilité** au laboratoire peut être estimée à partir de la **granulométrie** (relation de **Hazen** ou relation de **Casagrande**) dans le cas d'une roche meuble.

1. Relation de Hazen

A partir d'expériences effectuées avec des sables à filtre, d'uniformité élevée ($C_u < 2$, $C_u = D_{60}/D_{10}$) et peu compacts, Hazen a obtenu les équations empiriques suivantes :

$$K \text{ (en cm/s)} = C (d_{10})^2$$

d_{10} : Diamètre en deçà duquel il y a 10 % des grains ou diamètre efficace en cm,

C : Coefficient variant entre 100 et 150 s.cm⁻¹.

Estimation de la perméabilité

2. Relation de Casagrande

Pour des sols à gros éléments (> 1 mm) dont les grains sont supposés cubiques, on peut exprimer la perméabilité en fonction de l'indice des vides e :

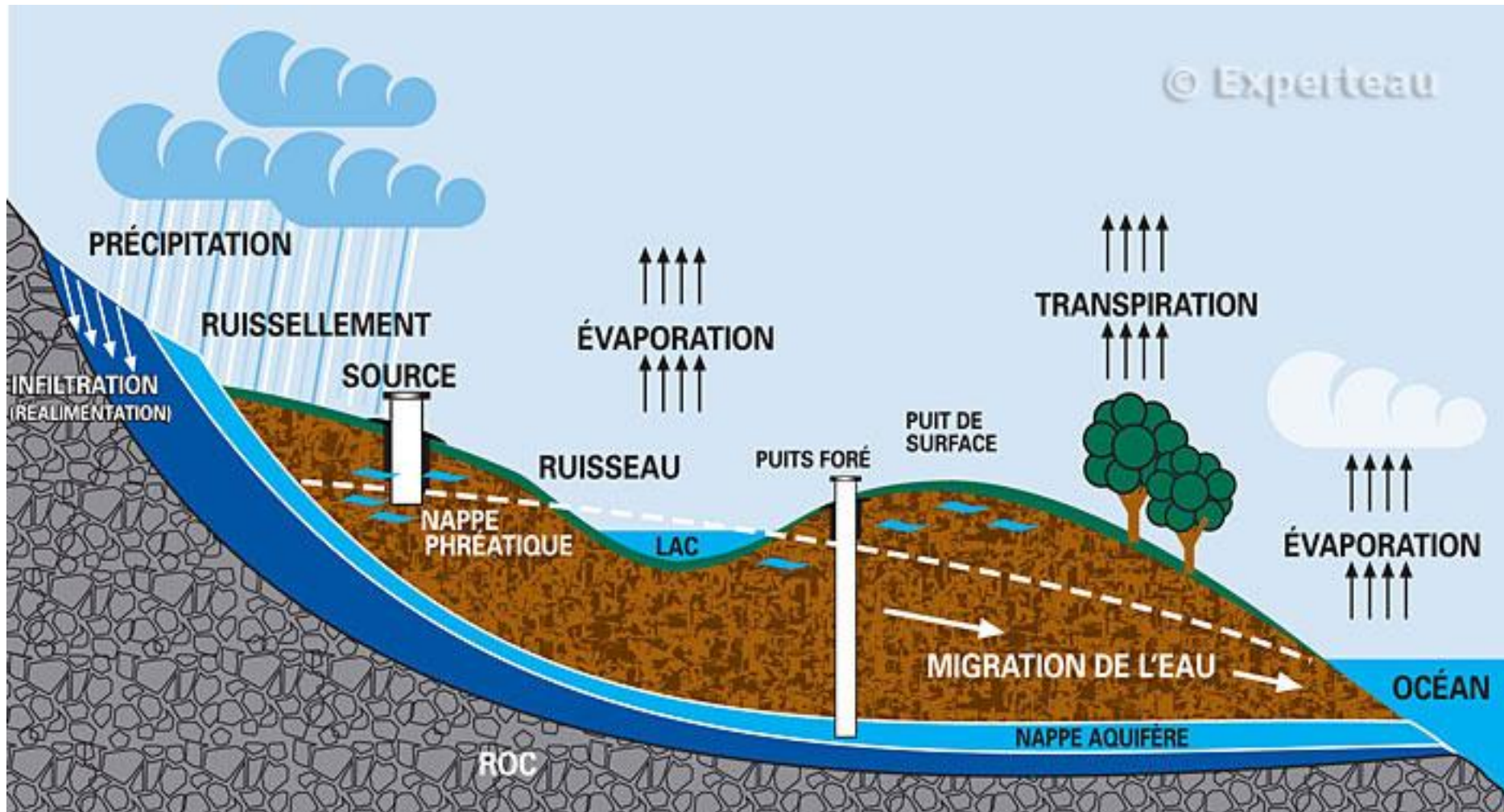
$$K = 1,4 K_{0.85} \cdot e^2$$

$K_{0.85}$ est la perméabilité pour $e = 0.85$. Il suffit donc de déterminer la perméabilité correspondant à une valeur arbitraire de e et on obtient les valeurs de K correspondant à d'autres valeurs de e au moyen de l'équation.

Ces relations ne tiennent pas compte de la forme des grains. Elles ne doivent être utilisées que pour les cas précis pour lesquels elles ont été définies.

Dans la pratique, elles sont inutilisables pour les terrains naturels qui ont des structures différentes et plus complexes que les sols étudiés.

Cycle de l'eau



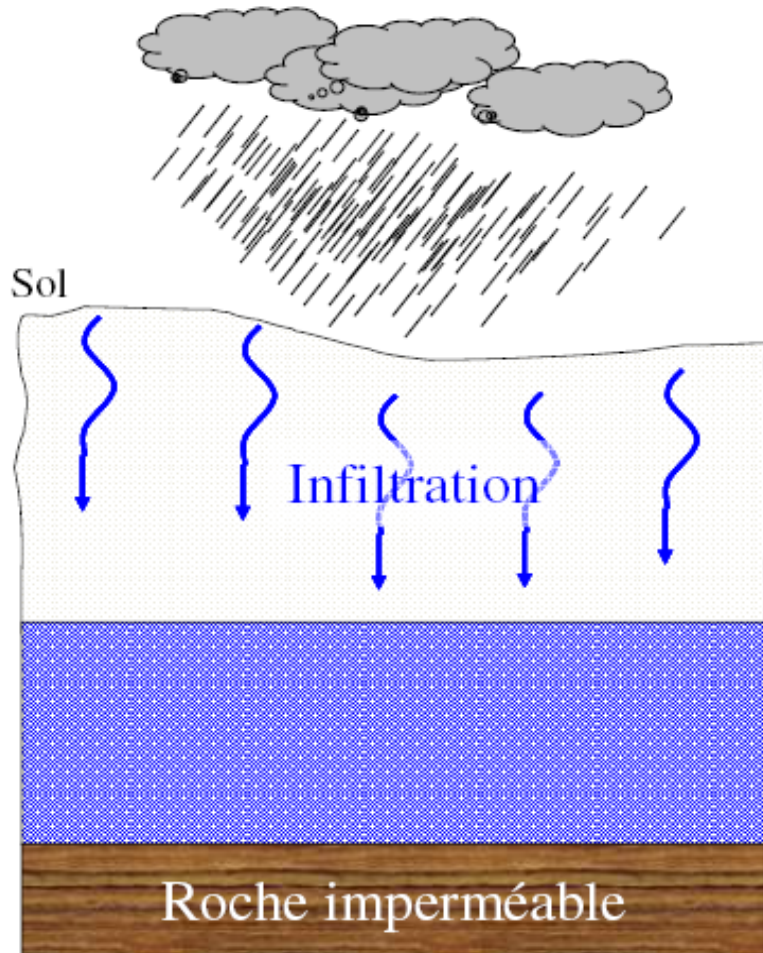
Types de nappes

La nappe libre: la surface piézométrique coïncide avec la surface libre de la nappe qui est surmontée par une zone non saturée. Elle est plus ou moins vulnérable aux pollutions de surface.

La nappe captive: excellente protection vis à vis des pollutions superficielles. Elle est en charge. La nappe est confinée car elle est surmontée par une formation peu ou pas perméable, l'eau est comprimée à une pression supérieure à la pression atmosphérique. A la suite d'un forage au travers du toit imperméable, l'eau remonte et peut jaillir, la nappe est dite artésienne.

Types de nappes

Notions de nappes libre et captive



Nappe libre

= contact direct avec l'atmosphère

Zone non saturée
(matériau + eau + air)

NP

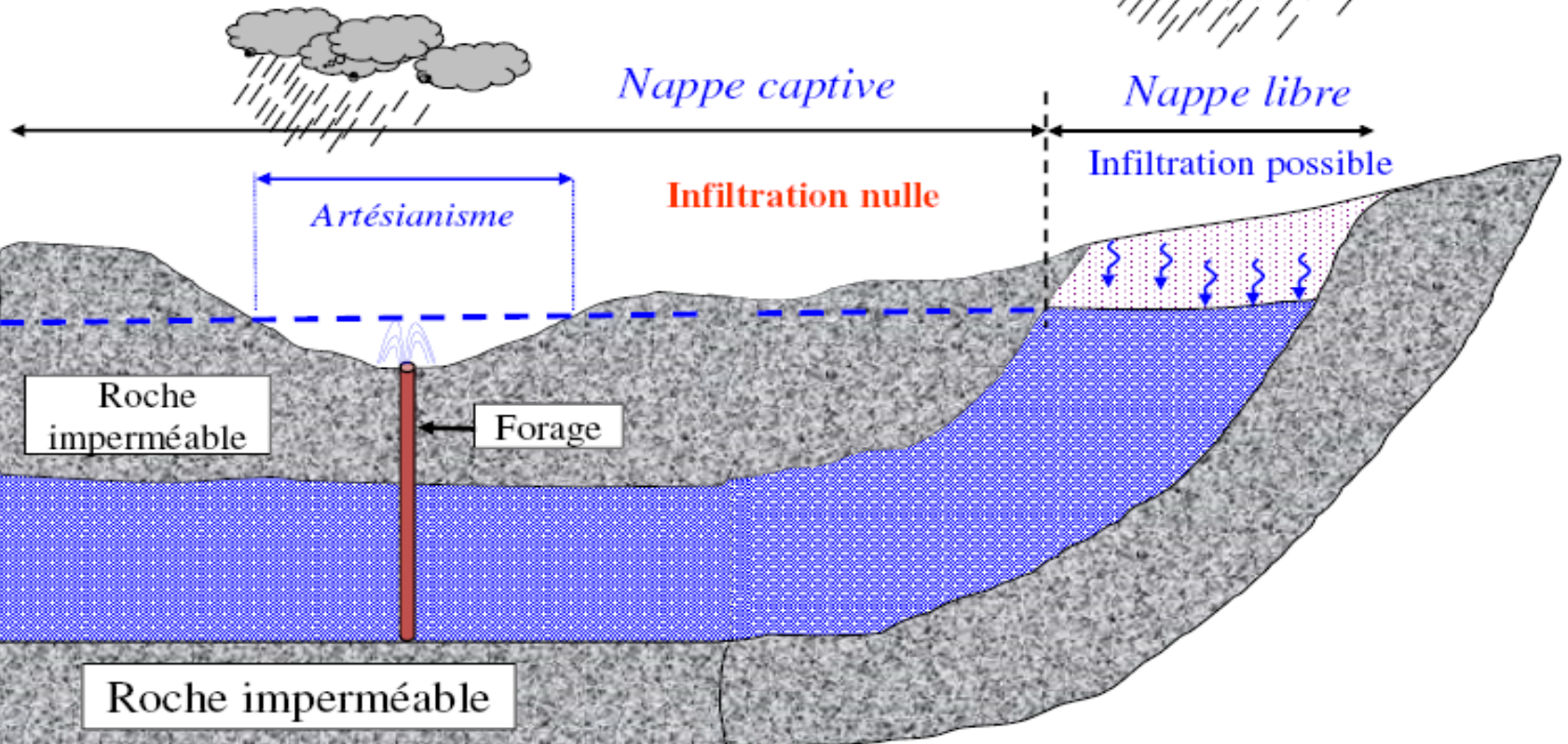
Zone saturée
Matériau = AQUIFERE
Eau = NAPPE SOUTERRAINE

Substratum imperméable (mur)

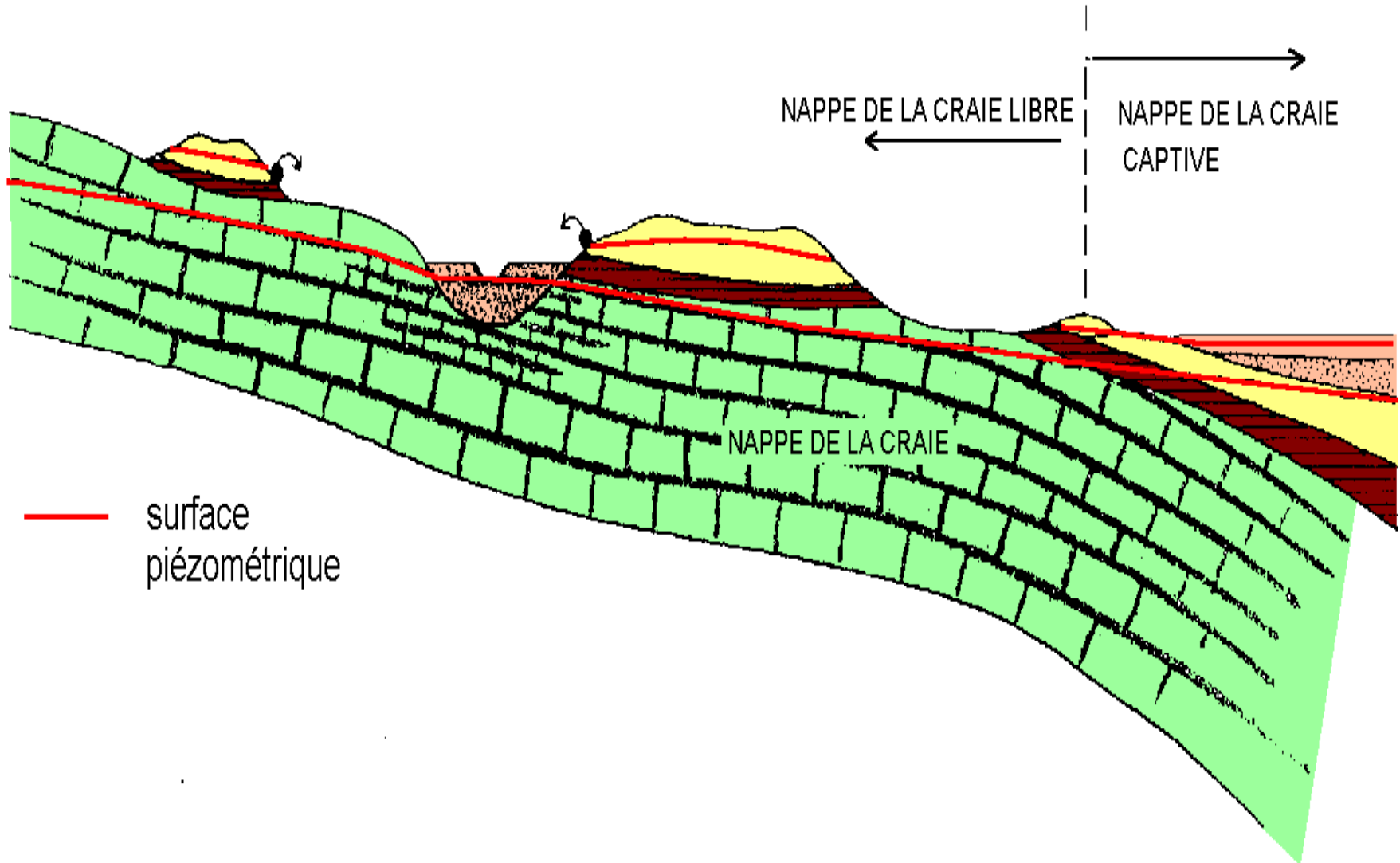
Types de nappes

Notions de nappes libre et captive

- Nappe captive**
= pas de contact direct avec l'atmosphère

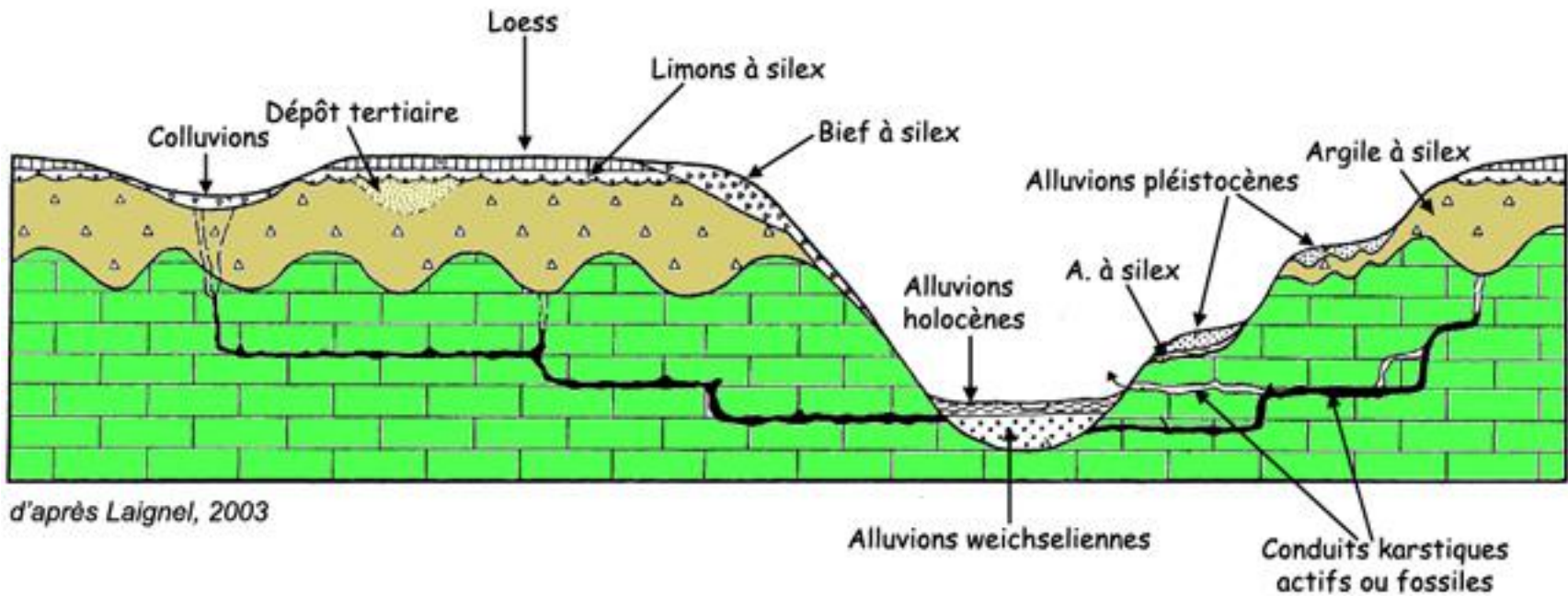


Types de nappes



Types d'aquifère

1) Aquifères alluvionnaires

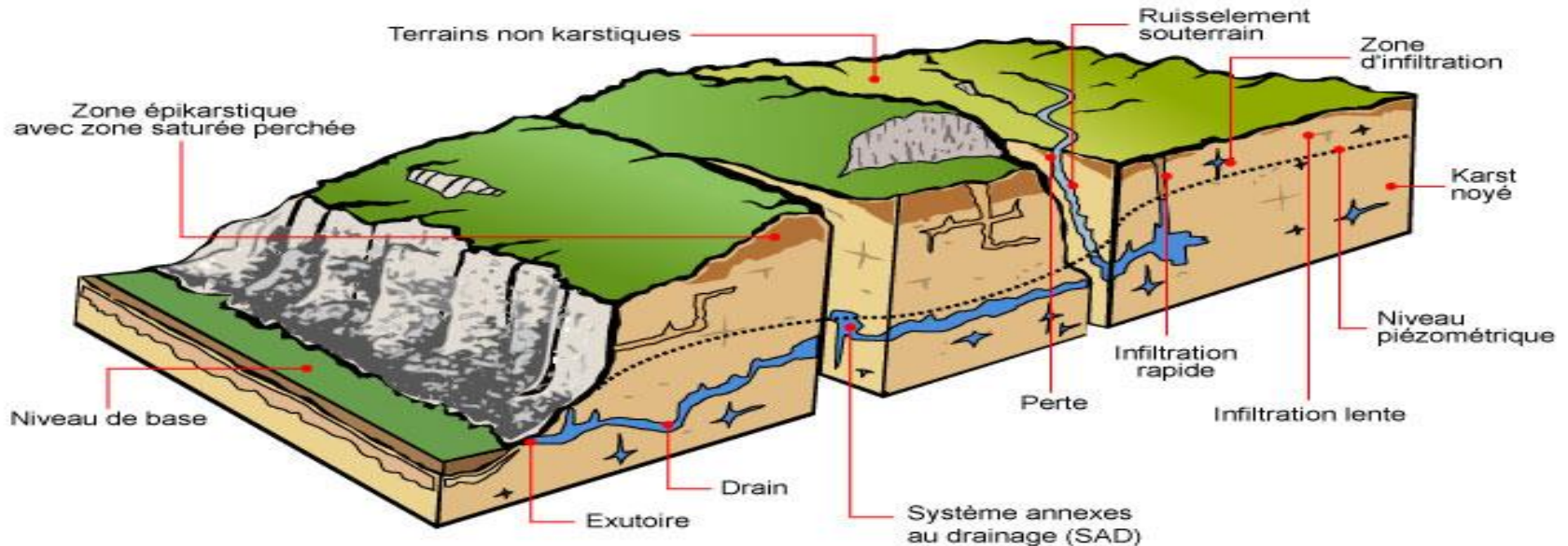


- Remplissage alluvionnaire,
- Limite zone saturée ZS et zone non saturée ZNS,
- Battement de la nappe,
- Définition possible d'une surface piézométrique.

Types d'aquifère

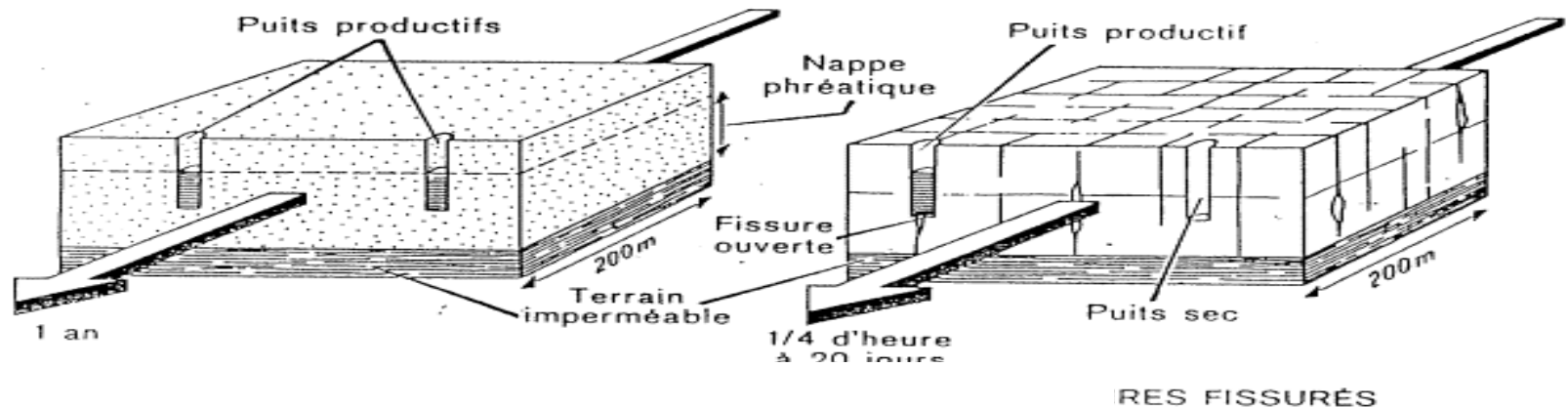
2) Aquifères karstiques

Calcite composante minérale essentielle



- **Circulation rapide**: Filtration peu efficace, dégradation incomplète de la matière organique, problèmes de qualité de l'eau (germes pathogènes, matières fécales, turbidité).
- **Système sensible aux crues**: Débit des sources variable, crues (pièges de spéléologues), qualité de l'eau très variable.
- **L'eau se fait rare en surface**: Peu de centres urbains sur les plateaux.
- **Difficile localisation de l'eau dans le sous-sol à partir de la surface**: Recherche d'eau fastidieuse, forages profonds.

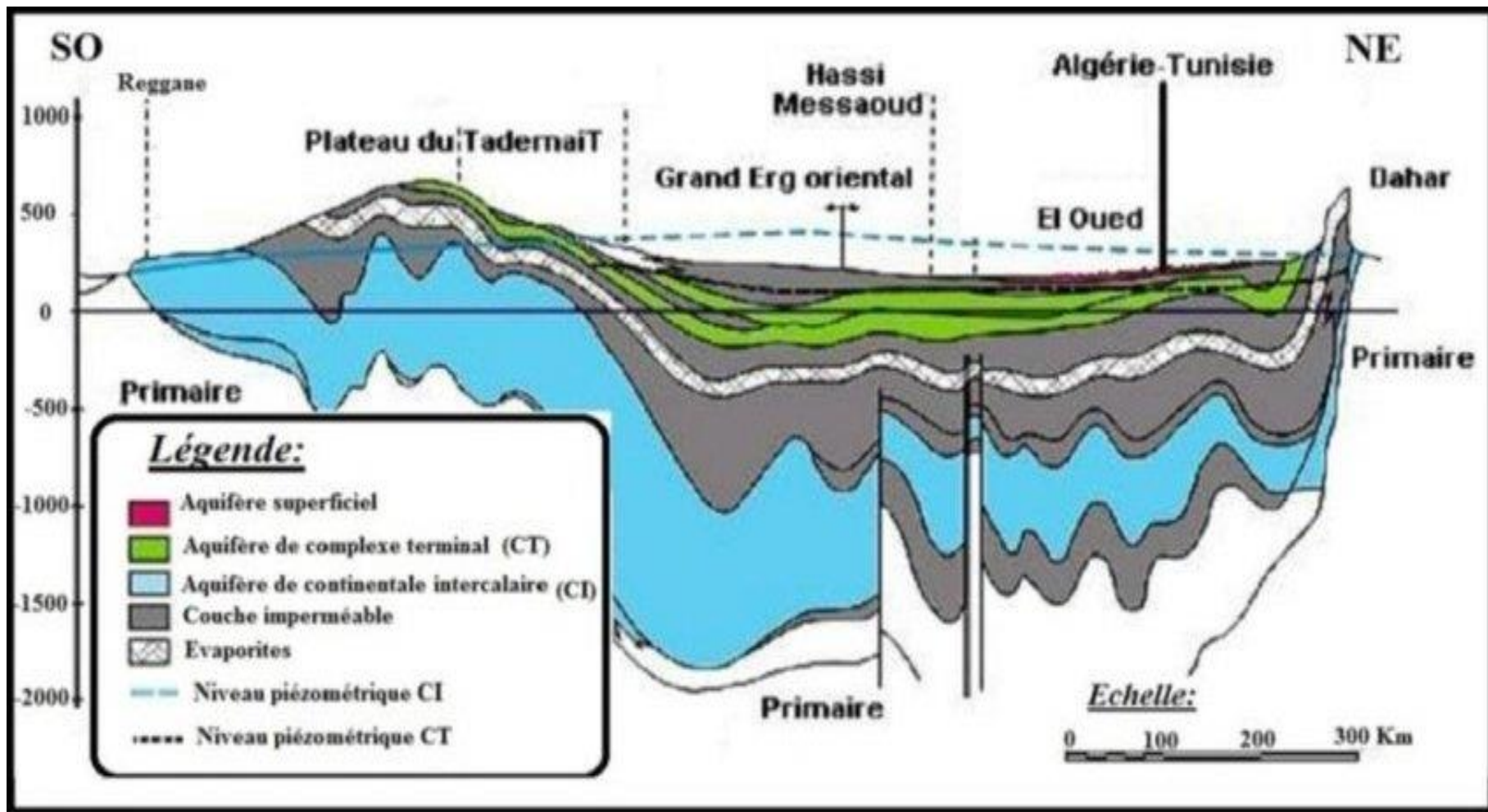
Aquifères alluvionnaires comparés aux milieux fissurés



Facilité de prédiction de la présence d'eau: La présence d'une zone saturée et d'un milieu poreux constitué de petits pores interconnectés (interstices entre galets, grains de sables.....) permet naturellement une facile prédiction du niveau d'eau dans le sous-sol d'un point à l'autre.

Bonne filtration, vitesse de circulation faible: meilleure qualité, effets de crues relativement 'tamponnés' par l'important 'volume' disponible en sous-sol (battements de nappes), etc.

Coupe hydrogéologique des aquifères du Sahara septentrionale



Exutoires

On appelle exutoires d'une nappe, les points privilégiés où l'eau sort de la nappe.

La source est l'exutoire de tout le bassin d'alimentation.

Les exutoires sont de différents types:

Écoulement de la nappe en conditions naturelles

Les sources

Émergence : la surface piézométrique recoupe la topographie



Écoulement de la nappe en conditions naturelles

Les sources

Déversement : le substratum force l'écoulement



Écoulement de la nappe en conditions naturelles

Les sources

Débordement : un horizon imperméable gêne l'écoulement



Écoulement de la nappe en conditions naturelles

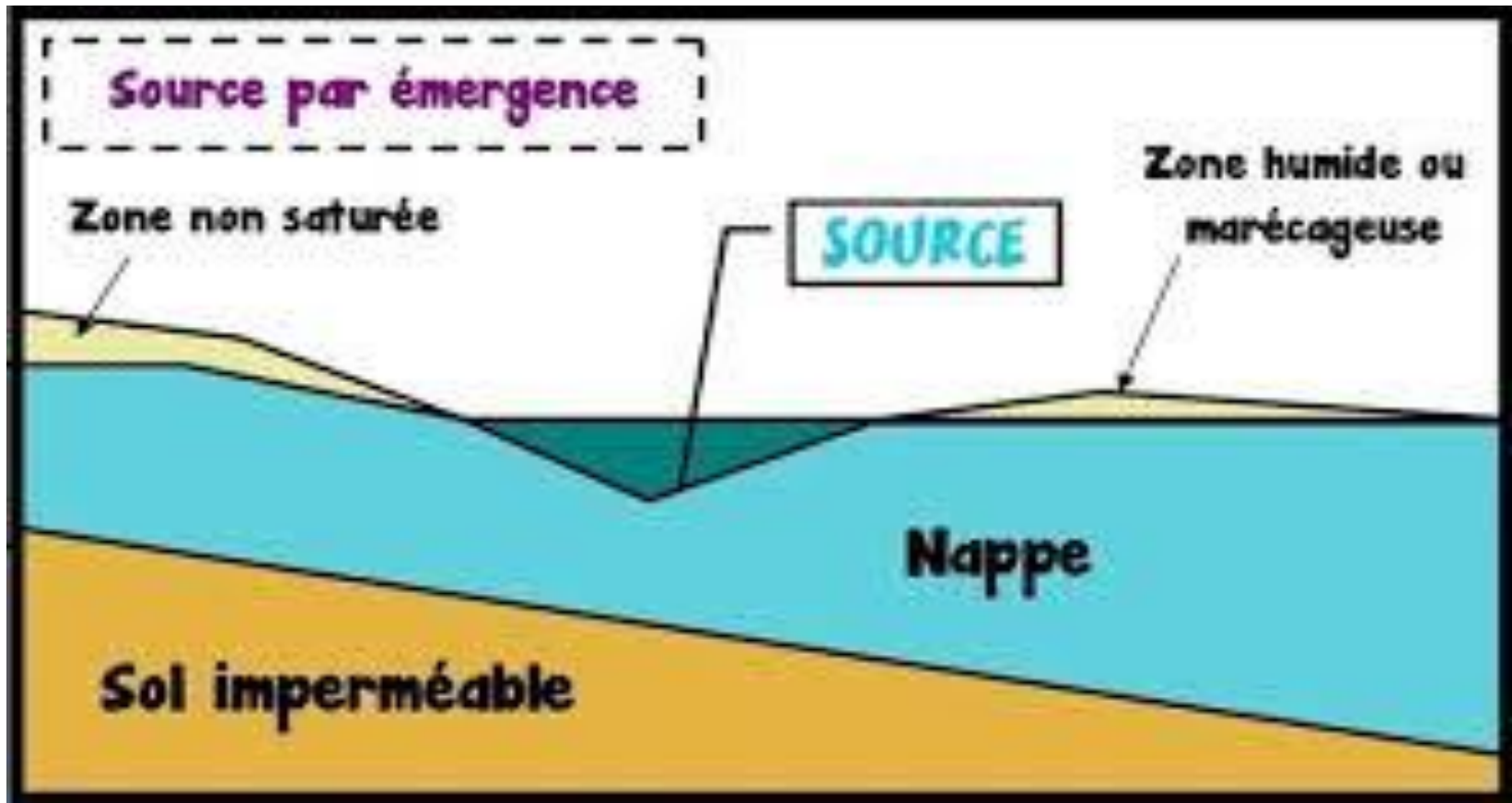
Les sources

Artésianisme : la nappe est en charge



Exutoires

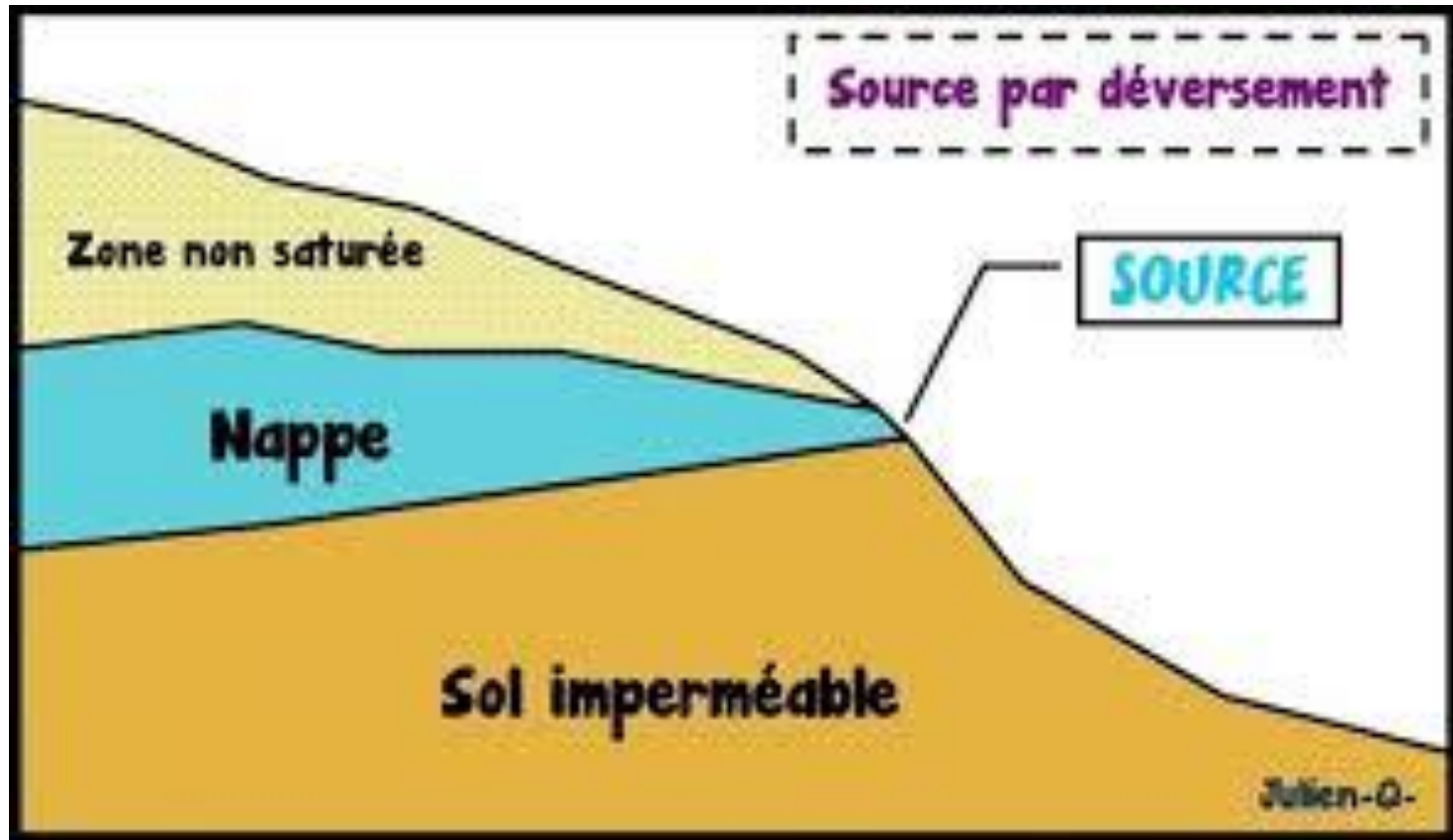
1- Source par émergence



Exutoires

2- Source de déversement

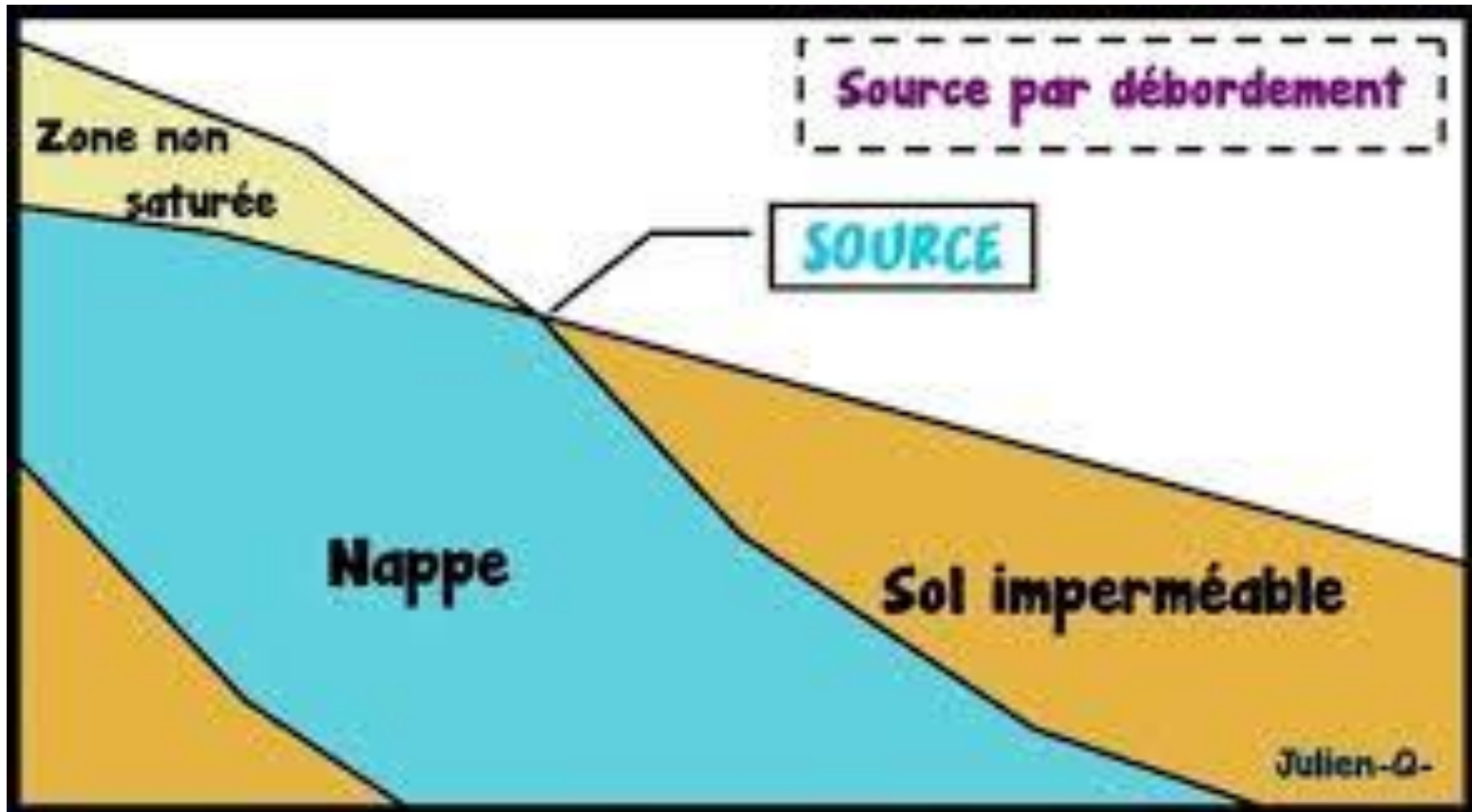
La totalité des filets liquides se meut en amont de la source, au-dessus du niveau de celle-ci.



Exutoires

3- Source de débordement

Une partie au moins des filets liquides se meut en amont de la source, au-dessous du niveau de celle-ci et l'eau se déplace dans le sens du pendage du terrain.



LE BILAN HYDROGEOLOGIQUE

$$P = ETR + R + I \pm \Delta L \pm \Delta RU$$

P: Pluviométrie

ETR: Evapotranspiration

R: Lambe d'eau ruisselée

I: Pluie efficace (Infiltration)

ΔRU : Variation de la réserve utile du sol

ΔL : Apports latéraux

Écoulement de la nappe en conditions naturelles



- dans la zone non saturée (ZNS)
infiltration selon un gradient vertical

Écoulement de la nappe en conditions naturelles



- dans la zone saturée (ZS)
écoulement gravitaire à dominante horizontale

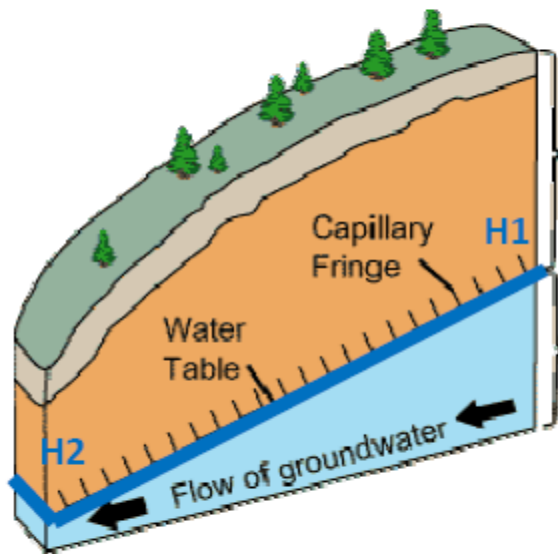
Écoulement de la nappe en conditions naturelles

Piézométrie

Isopièzes



DE L'EAU DANS LES ROCHES : RAPPELS

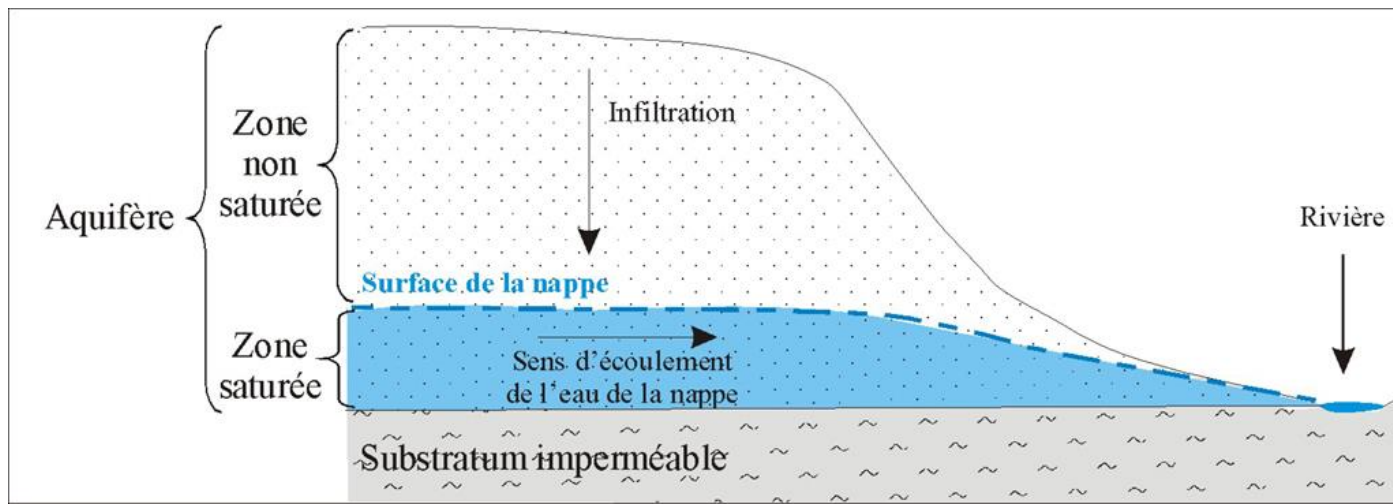
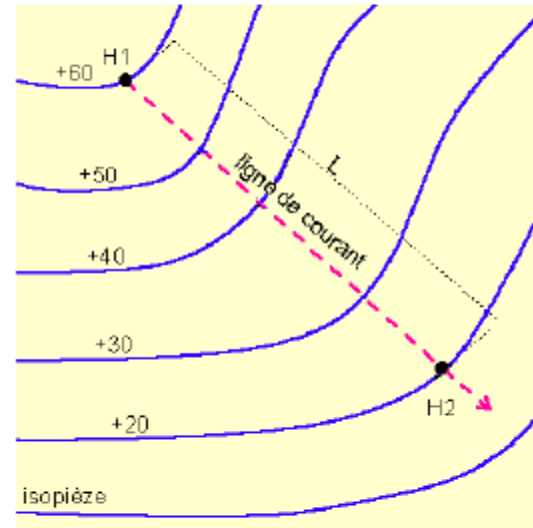


Zone non saturée

Surface piézométrique

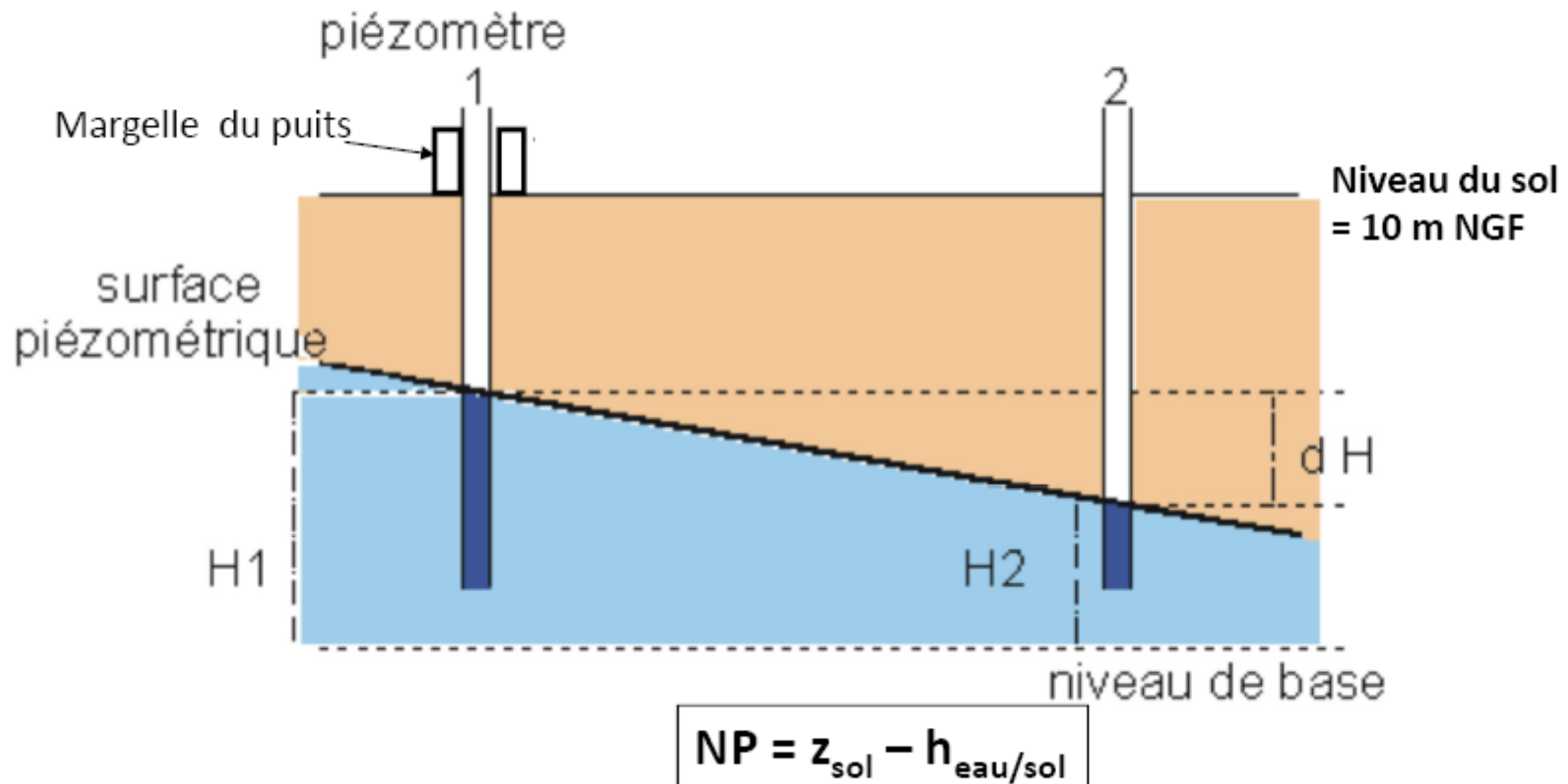
Zone saturée

Carte piézométrique



Notion de charge hydraulique / niveau piézométrique

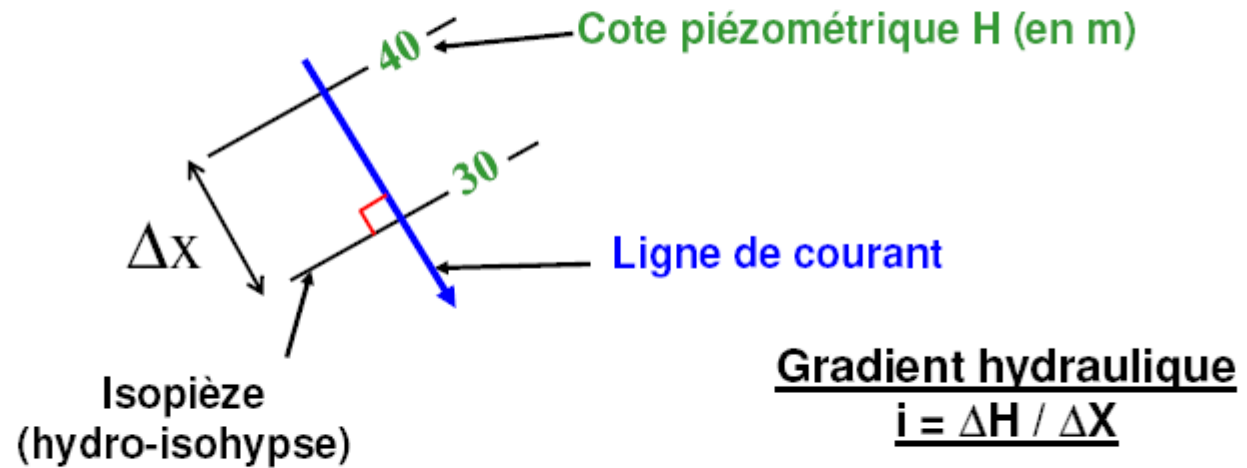
Niveau piézométrique: défini en chaque point par le niveau le plus haut (niveau piézométrique) atteint par l'eau d'une nappe montant dans un conduit de forage atteignant cette nappe.

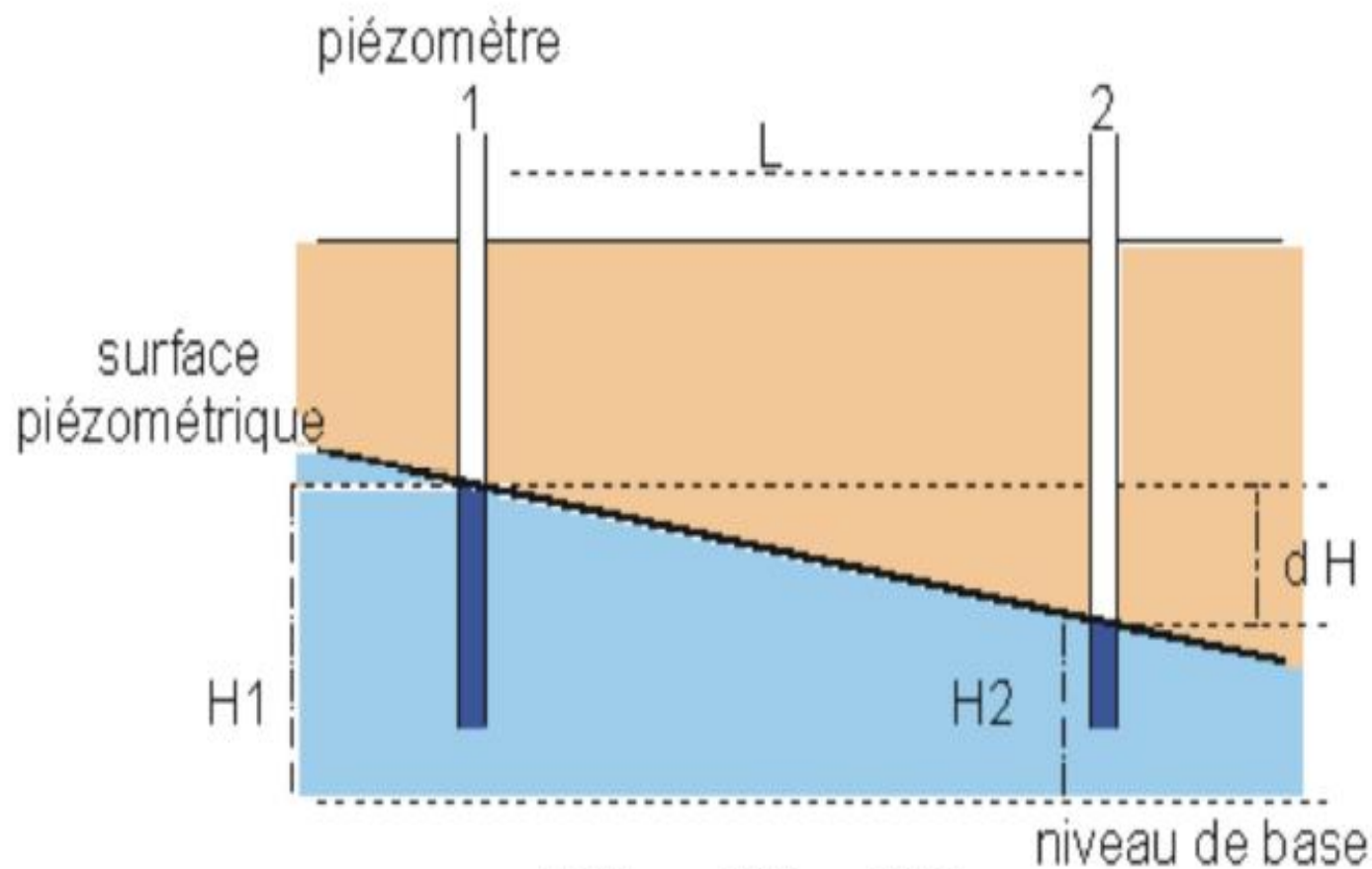


Le niveau piézo se mesure par rapport au niveau du sol, puis transformé en m NGF



Vocabulaire spécifique aux cartes piézométriques

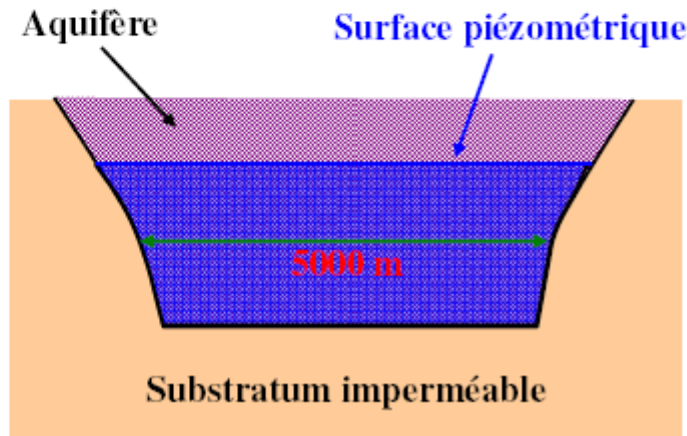
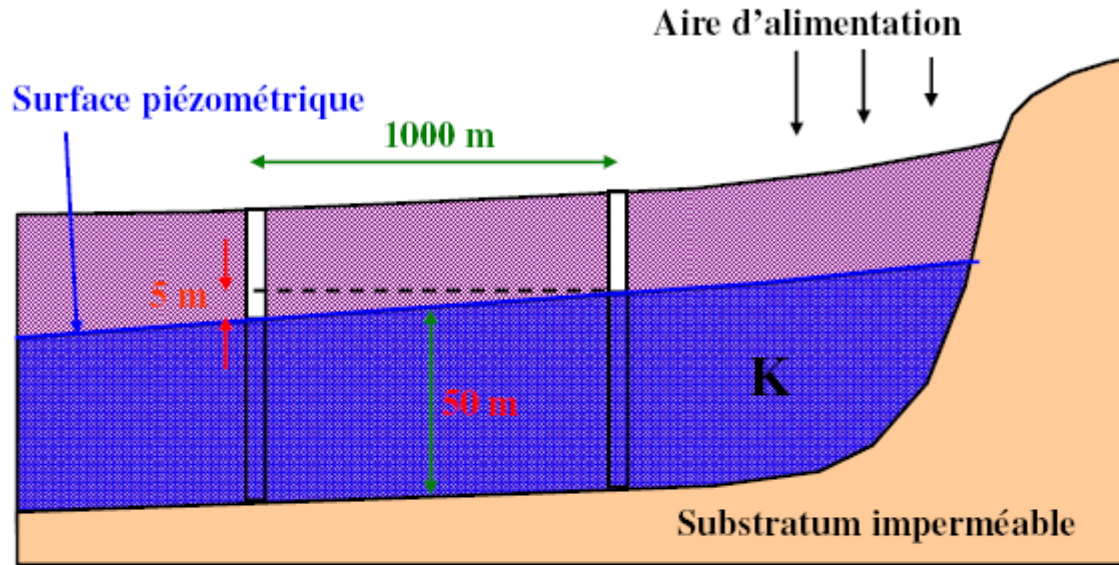




**Gradient
hydraulique**

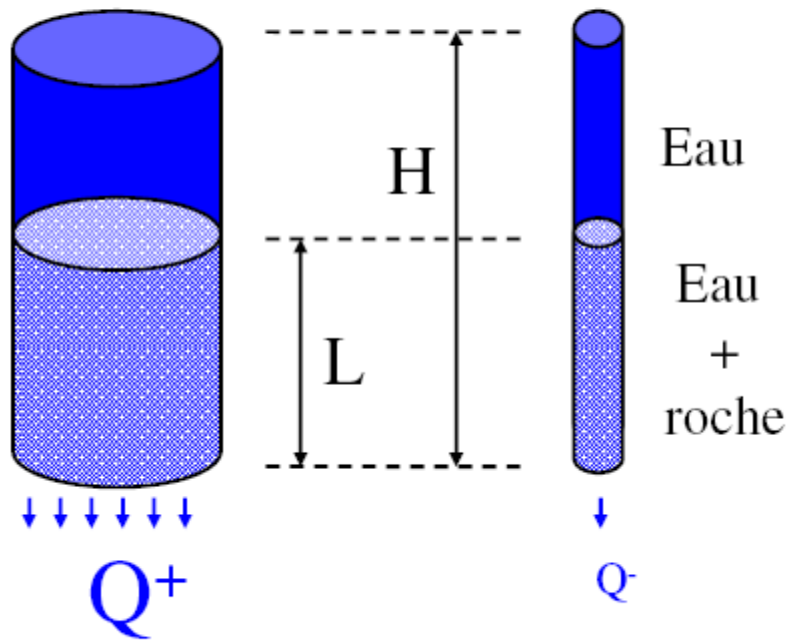
$$i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{H1 - H2}{L}$$

Perméabilité – loi de Darcy



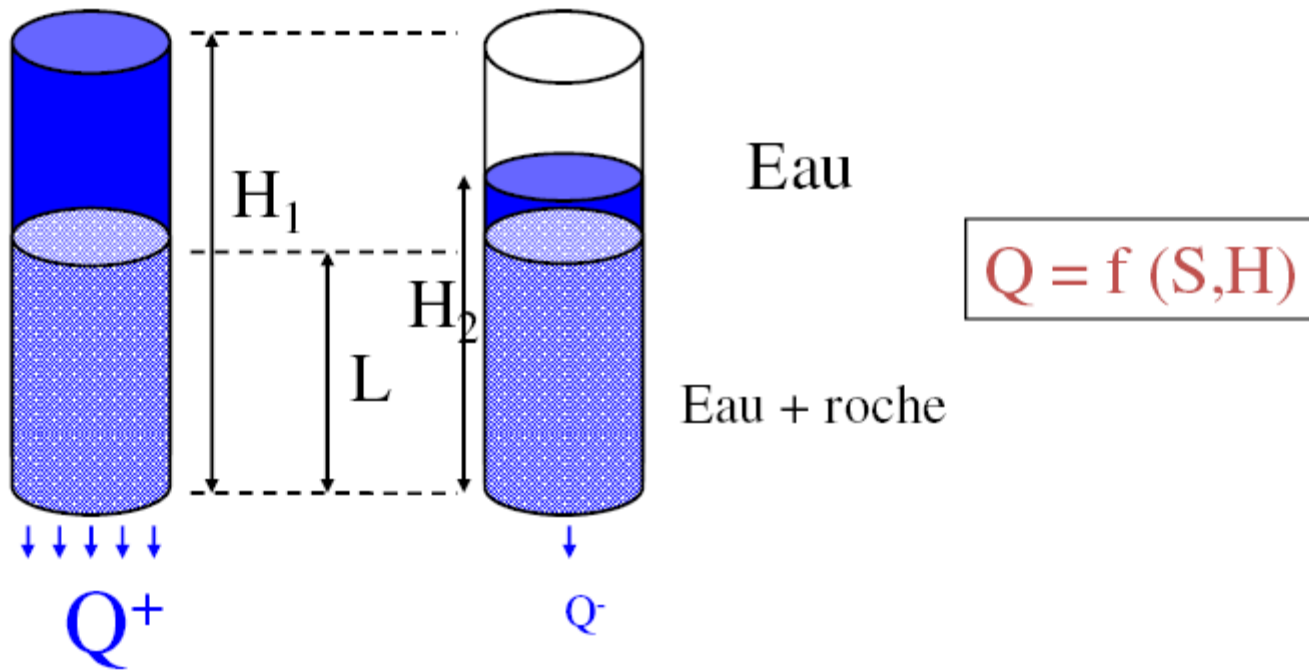
**Comment
s'écoulent les eaux
souterraines?**

Influence de la section d'écoulement



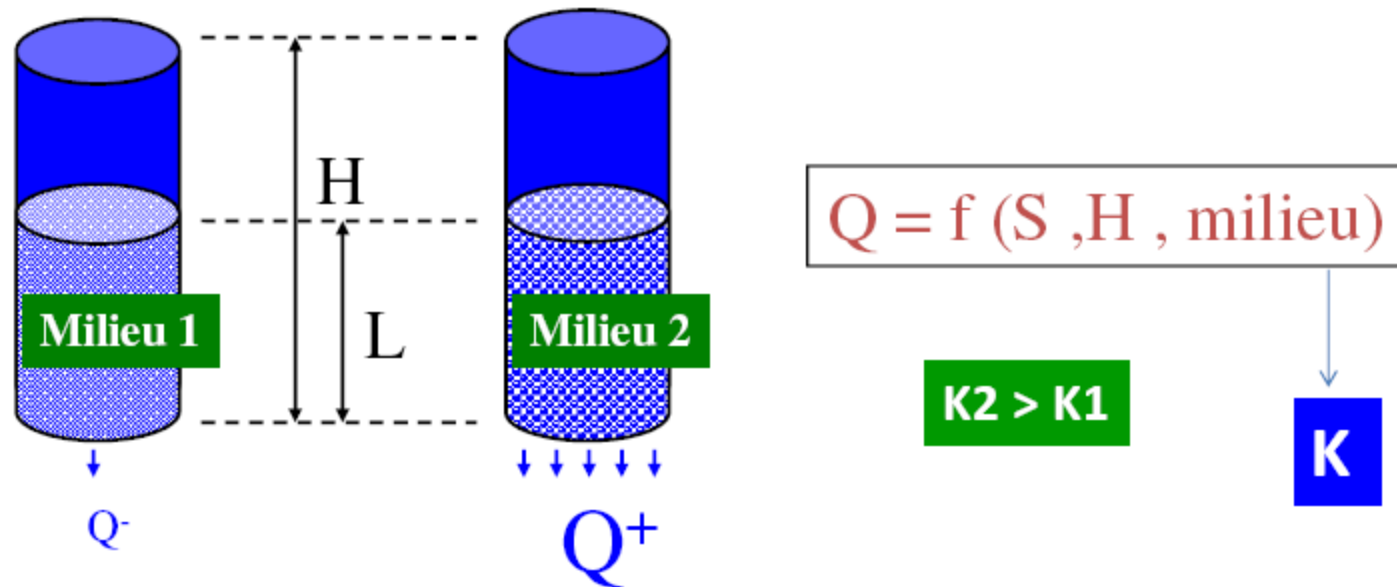
$$Q = f(S)$$

Influence de la charge hydraulique



Influence des propriétés du milieu

Notion de conductivité hydraulique / perméabilité



K représente l'aptitude du milieu à se laisser traverser par l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique

Exprime la résistance du milieu à l'écoulement de l'eau qui le traverse

Unité LT^{-1} , (m/s)

Loi de DARCY (1802-1858)

$$Q = S K \frac{H}{L}$$

Q : Débit (m³/s)

S : Section d'écoulement (m²)

K : **Conductivité hydraulique** (m/s)
(perméabilité)

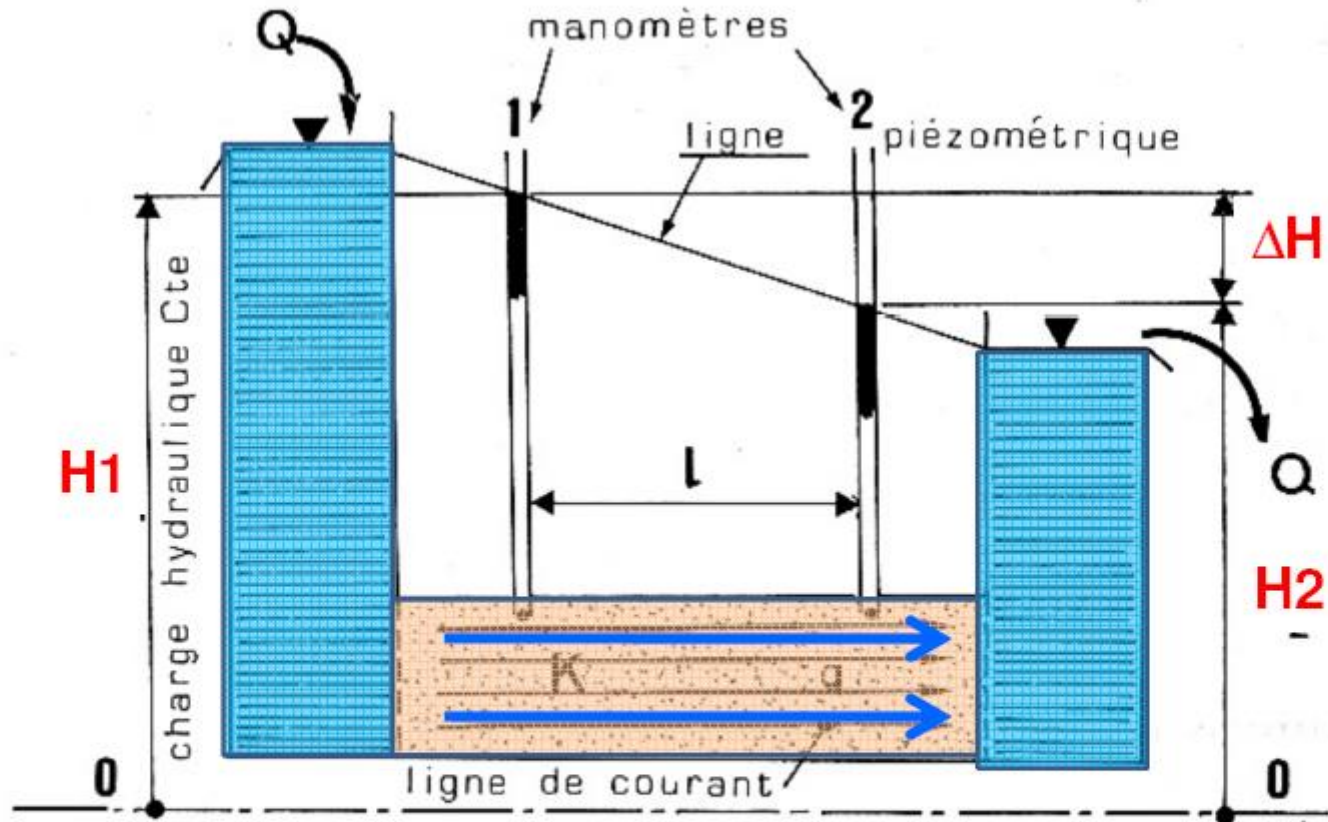
H : Gradient de charge (m)

L : Longueur du milieu poreux (m)

Conditions de validité de la loi de Darcy :

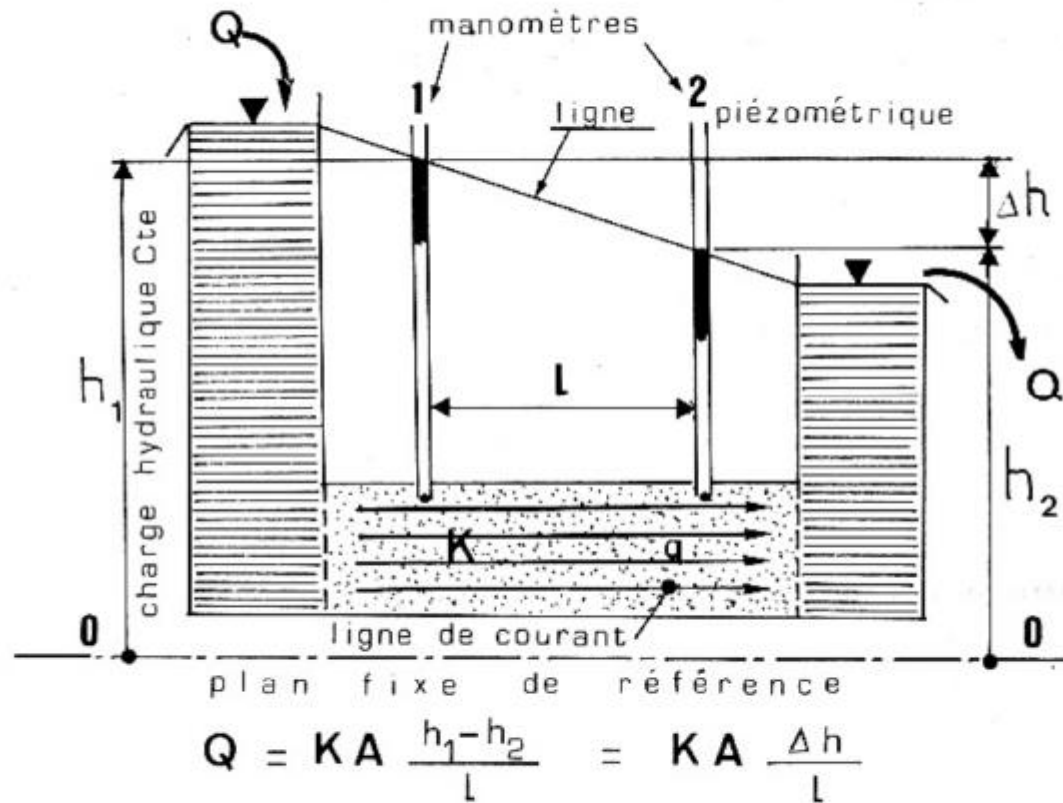
- écoulement laminaire (lignes de courant continues, rectilignes, individualisées),
- aquifère continu,
- milieu isotrope (K identique dans toutes les directions de l'espace),
- réservoir homogène.

Darcy pas applicable aux milieux très hétérogènes (karsts) et lorsque la vitesse est très élevée (au voisinage des captages).



$$Q = SK \frac{\Delta H}{L} = SK \frac{H_1 - H_2}{L}$$

Application : calcul d'un débit



Application : $K=10^{-5}$, $L=1\text{m}$, $h_1-h_2 : 1\text{cm}$

Vitesse de Darcy et vitesse réelle

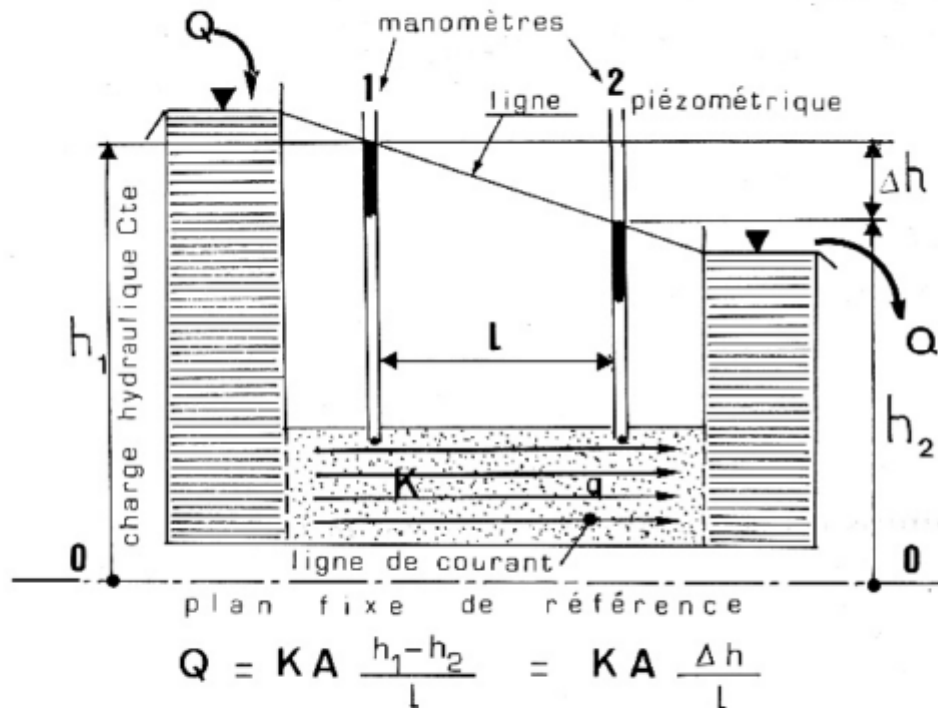
$$Q = S K \frac{H}{L}$$

$$V_{Darcy} = K \frac{H}{L}$$

La vitesse réelle dépend de la porosité efficace (n_{eff}) de l'échantillon

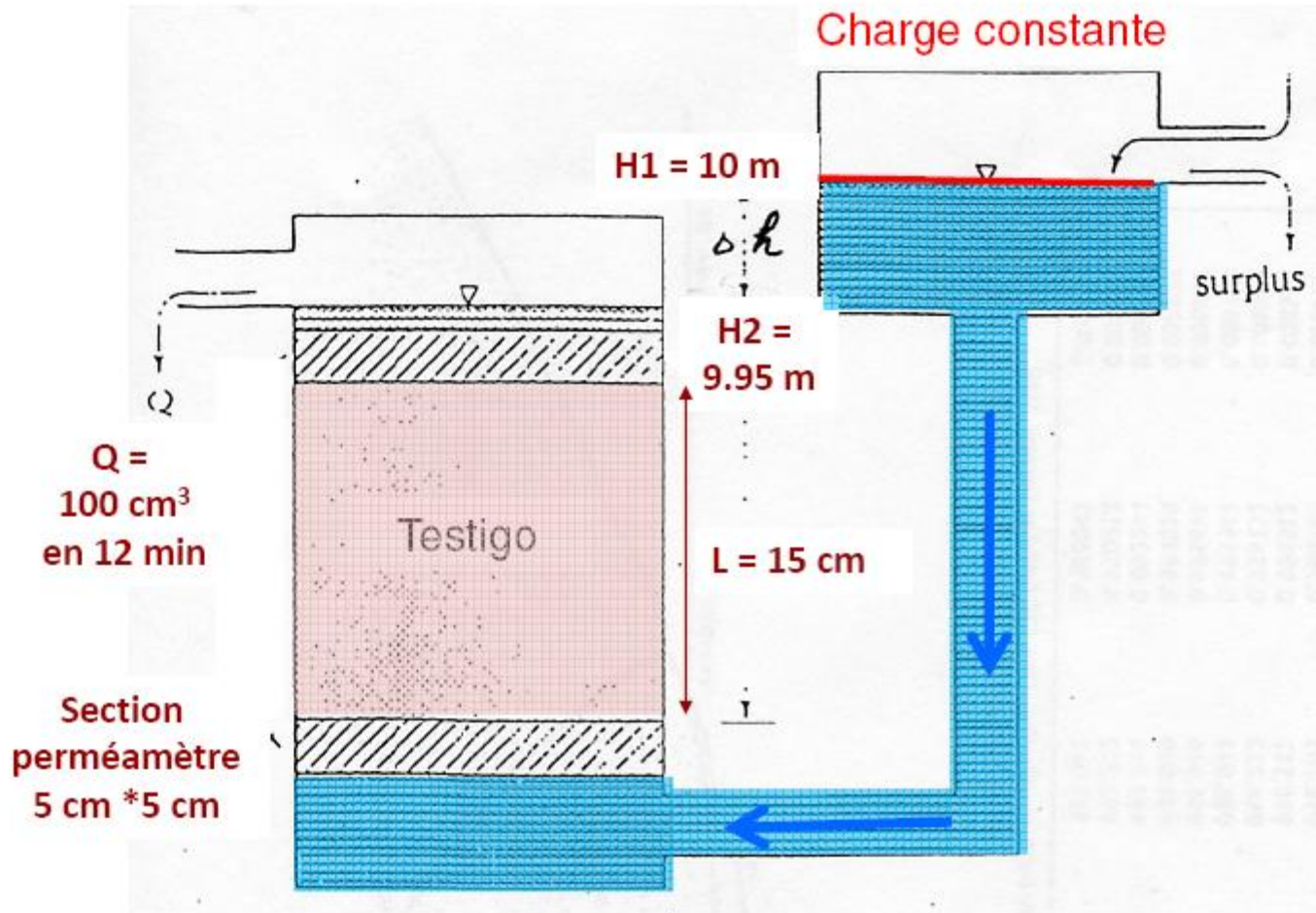
$$V_{réelle} = \frac{V_{Darcy}}{n_{eff}}$$

Vitesse de Darcy et vitesse réelle



Si l'échantillon est de porosité $n=0.1$, quelle est la vitesse réelle des particules de fluide ?

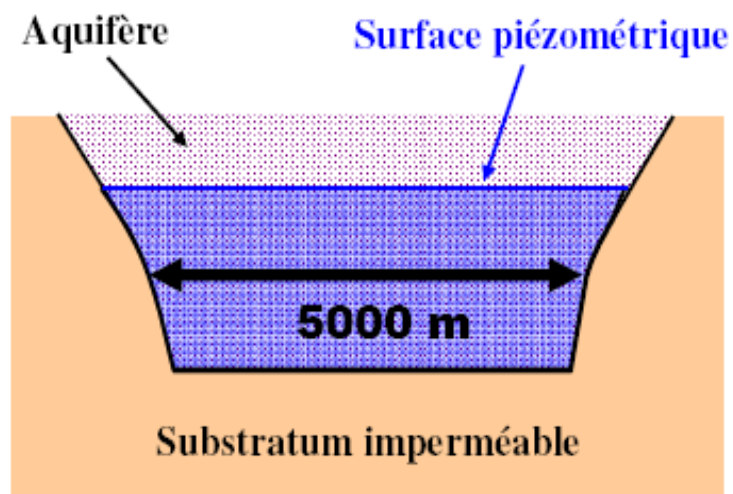
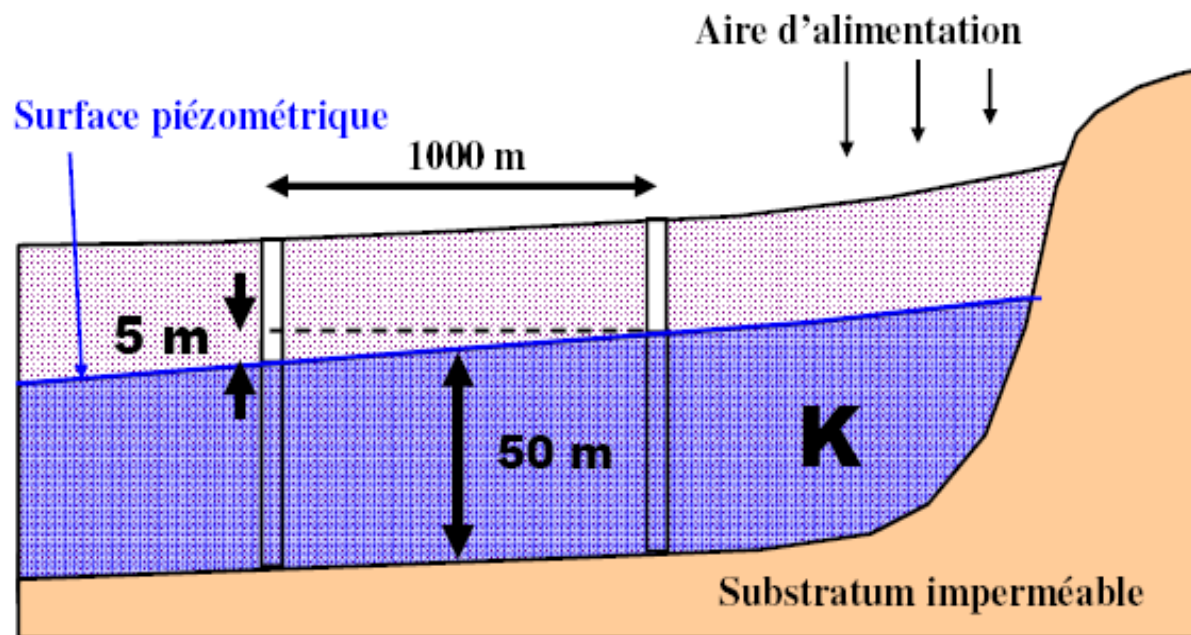
Exercice : Perméamètre à charge constante
Quelle est la perméabilité de l'échantillon ?



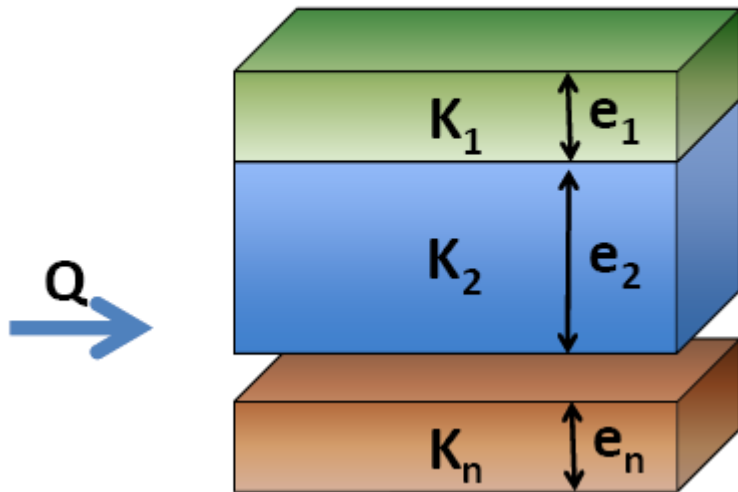
Exercice :

calculez le débit qui s'écoule dans cet aquifère.

Conductivité hydraulique :
 $K = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

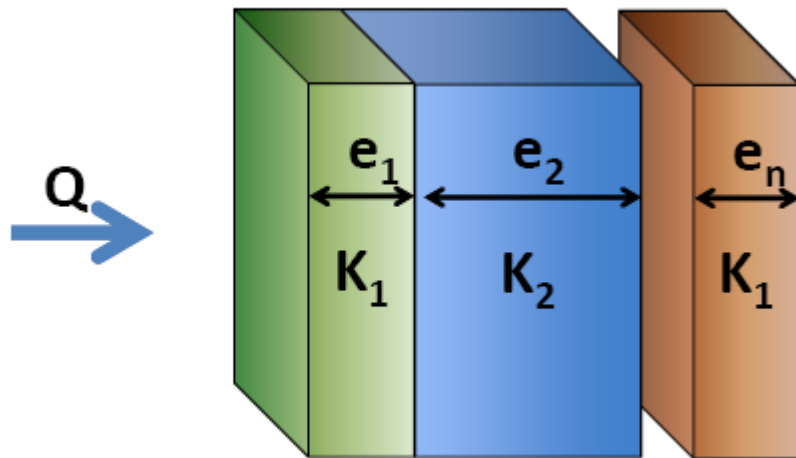


Les aquifères multicouches



EN PARALLELE
Couches parallèles à l'écoulement

$$K_{//} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} K_i e_i}{\sum_{i=1}^{i=n} e_i}$$

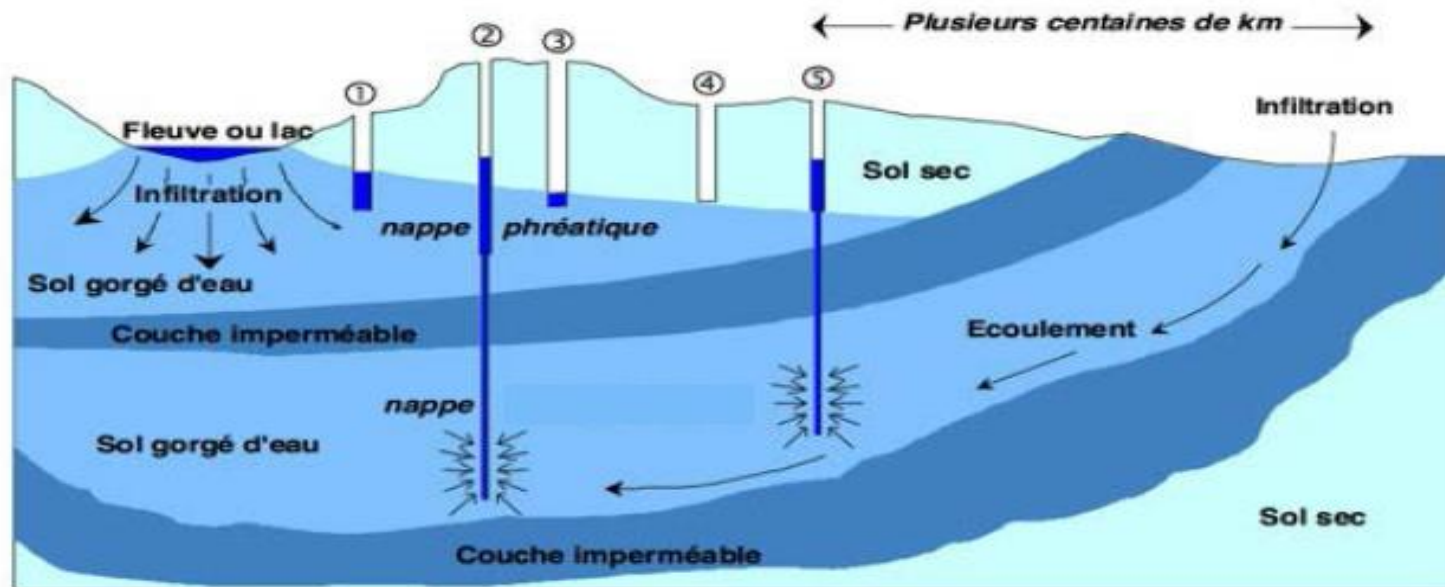


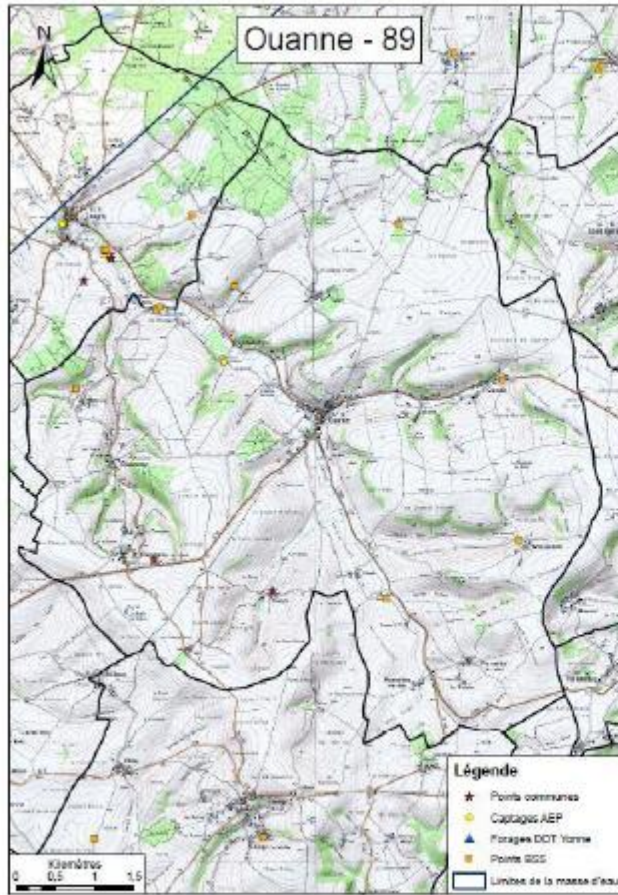
EN SERIE
Couches perpendiculaires à l'écoulement

$$K_{\perp} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} e_i}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{e_i}{K_i}}$$

1 - Intérêt de la piézométrie

- Définir le sens de l'écoulement souterrain
- Estimer le débit d'une nappe
- Evaluer la capacité d'un aquifère (réserves en eau)
- Evaluer la recharge naturelle (fluctuations de la surface piézométrique), régime d'alimentation de l'aquifère
- Explorer, apprécier les caractéristiques d'une nappe sur un territoire (propriétés hydrodynamiques, limites de l'aquifère, études géotechniques avant réalisation d'un ouvrage...)
- Surveiller une nappe exploitée (durabilité de l'exploitation)
- Etudier les relations de la nappe avec la surface (recharge, décharge)
-





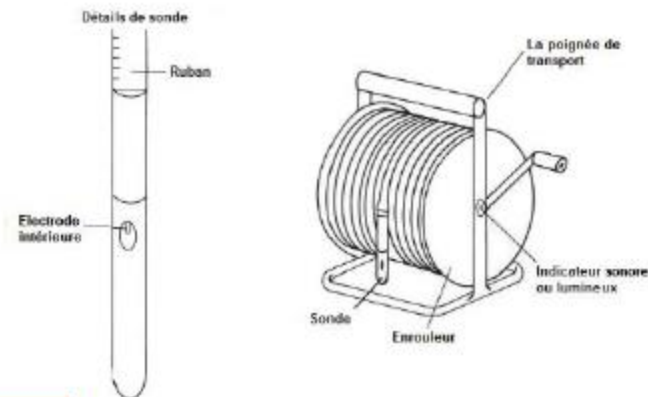
Carte topographique pour la campagne de terrain



Matériel utilisé lors de la campagne de mesure

Comment mesurer : sonde manuelle

- **Sonde manuelle capacitive (sonore)**
 - Différentes longueurs du ruban
 - La lecture manuelle : procédé
 - Indispensable au contrôle & traitement des données automatiques



Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Fiabilité de la mesure- Précision au cm près- Observation directe du niveau, état du piézomètre- Peu de panne	<ul style="list-style-type: none">- Fréquence faible de mesure (déplacements physiques d'un observateur, coût)- Références de la lecture (métadonnées, quelles données "écrites"?)- État/entretien de la sonde (fiabilité):<ul style="list-style-type: none">- ruban (coupé, effacé...)- Électrode- Changements d'opérateurs : décalages- Risque d'erreurs lors du passage au numérique

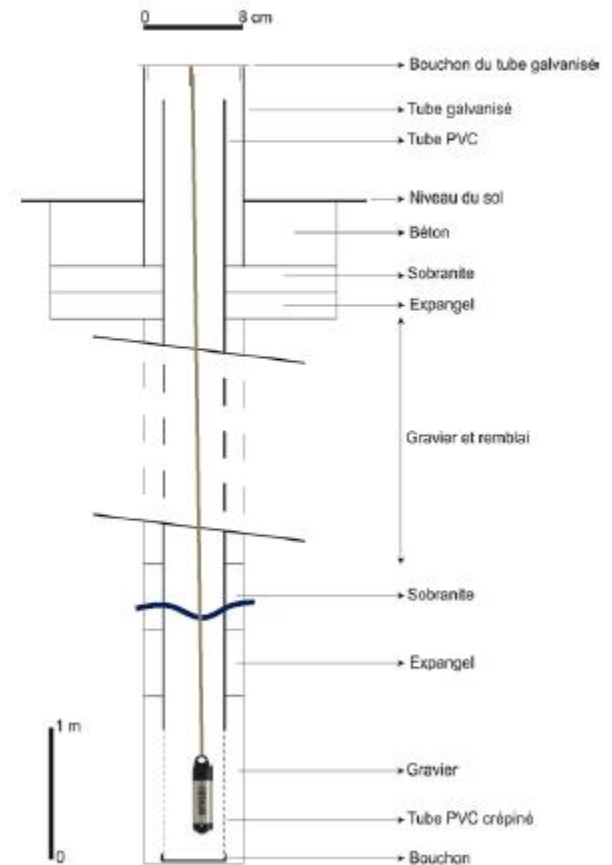
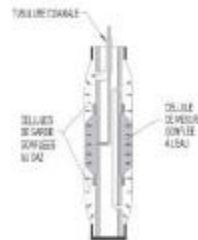


5 – Comment mesurer: système automatique

▸ Systèmes de mesure automatiques :

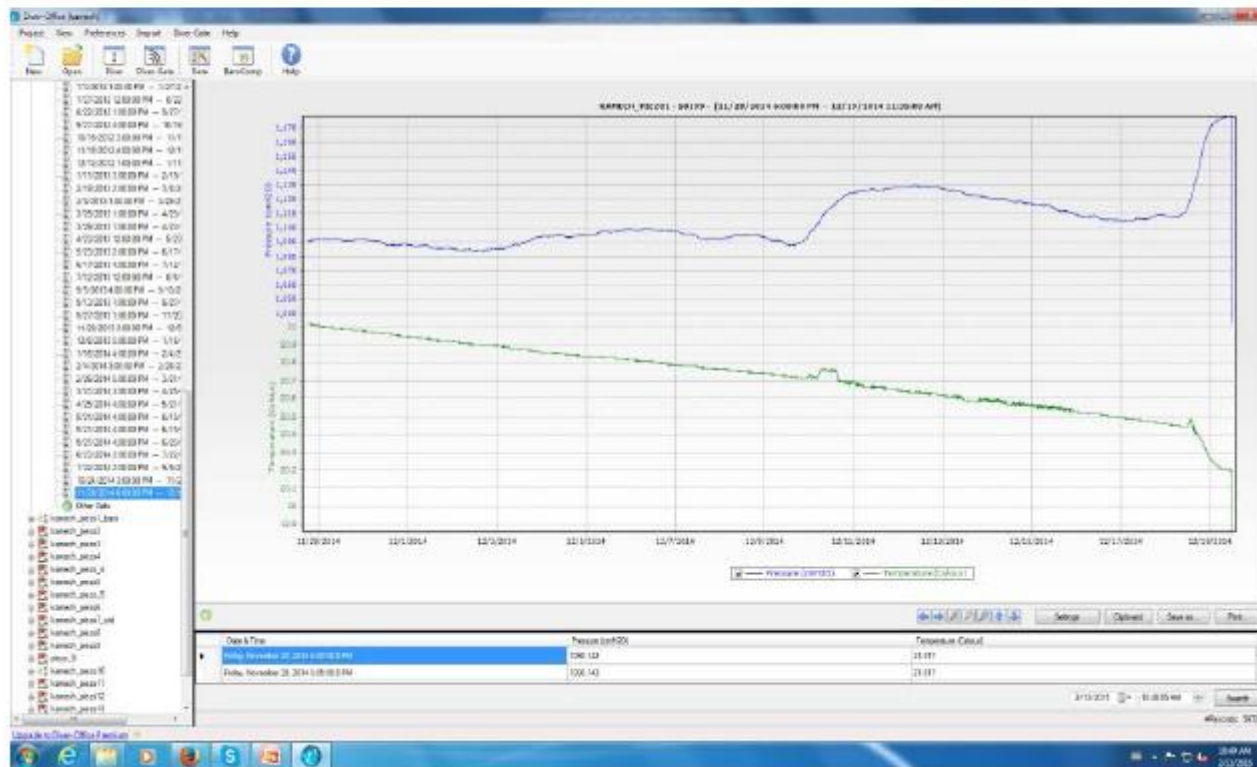
- Couple: capteur + logger (numérique ou papier, interne ou externe)
- Déchargements (manuels, télétransmission)

- Flotteur Thalimède
- Capteurs de pression immergés: avec mise à air libre ou pression absolu



Comment mesurer: systèmes automatiques

Systemes de mesure automatiques : exemple de logger numérique (logiciels de déchargements)



3 – Comment mesurer: systèmes automatiques

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Représentativité de l'aquifère (temps et espace): fréquence élevée et réseau important- Programmation à l'évènement possible via un logger externe: au delà d'une variation, déclenchement via un autre capteur- Précision de la donnée (capteur)- Interface numérique: traitement et valorisation simplifiés, base de données- Métadonnées inscrites automatiquement dans fichier de chroniques- Structuration en BDD, archivages automatiques et visualisation directe des données- Main d'oeuvre limitée / quantité de données; mise en oeuvre facile	<ul style="list-style-type: none">- Lacunes: mémoire pleine (capacité de la mémoire) problèmes d'alimentation (batterie, piles), pannes, dysfonctionnements (capteur, logger) par rapport à la fréquence de déchargements (lacunes)- Dérives possibles du capteurs: identification, corrections- Stabilité du capteur (système de fixation: colliers, fils non extensibles...)- Références de mesures (niveau du capteur, logger papier)- Risques d'erreurs : conversion et changements de formats, numérisation (logger papier)- Obstruction: tube de mise à l'air, cellule de capteur- Compensation: localisation et fréquence du capteur de pression atmosphérique (influence altitude, topographie)- Coût important : milliers de DT (un sonde 1000DT, une centrale 5000 DT)

Mais que mesure-t-on?

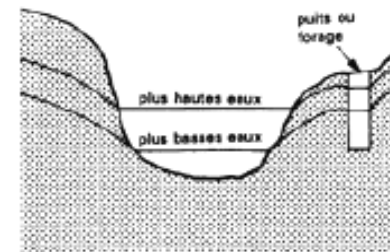
- **Niveau statique:** Niveau piézométrique non soumis à pompage ni à injection ni à recharge → non perturbé. Niveau à l'équilibre.
- **Niveau dynamique:** Niveau piézométrique en cours de réajustement suite à une perturbation locale

Quel est le niveau statique?

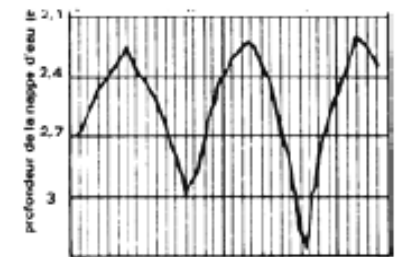
Dans quel "sens" la nappe se réajuste après perturbation(s)?

Perturbations du niveau statique : onde ou flux

- Prélèvements (pompages) : rabattement de la nappe
- Recharge : élévation de la piézométrie
- Charge de la marée, Marée terrestre



variations saisonnières de la profondeur



variations saisonnières du plan de la nappe phréatique

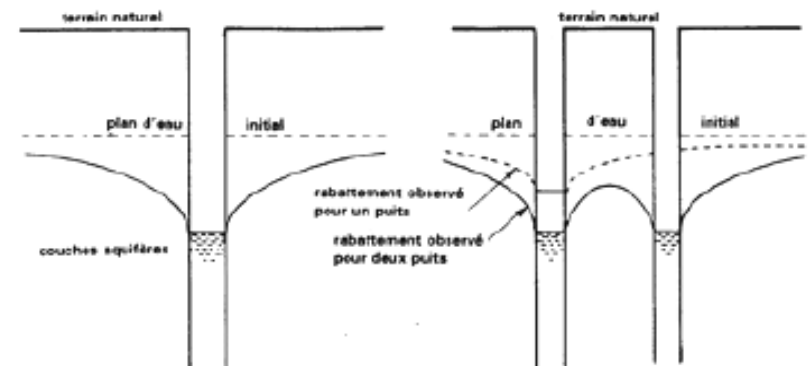
! Importance des références !

→ Toujours identifier les niveaux « min » et « max » pour éviter la surinterprétation (baisse ou hausse)

Concrètement : en fin de saison sèche en milieu semi-aride, la nuit en contexte de pompage...

! Importance du « spatial » !

- 1 « point » s'interprète avec ses points voisins
- cohérence dans les perturbations (atténuation, phasage)



cône de dépression des eaux souterraines

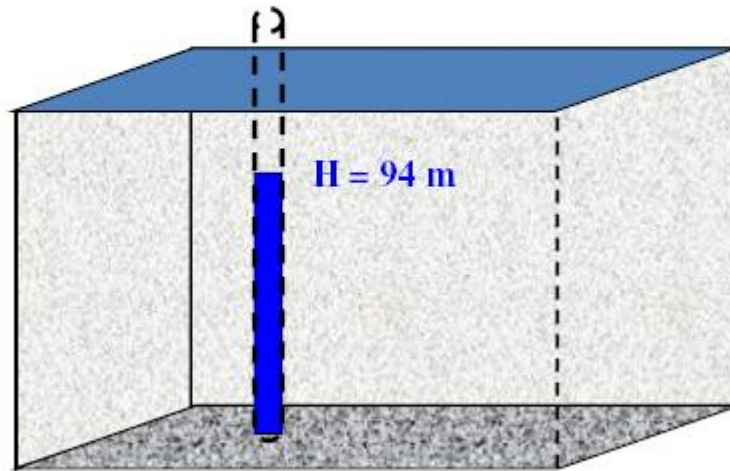
exemple d'interférence de deux forages très voisins l'un de l'autre



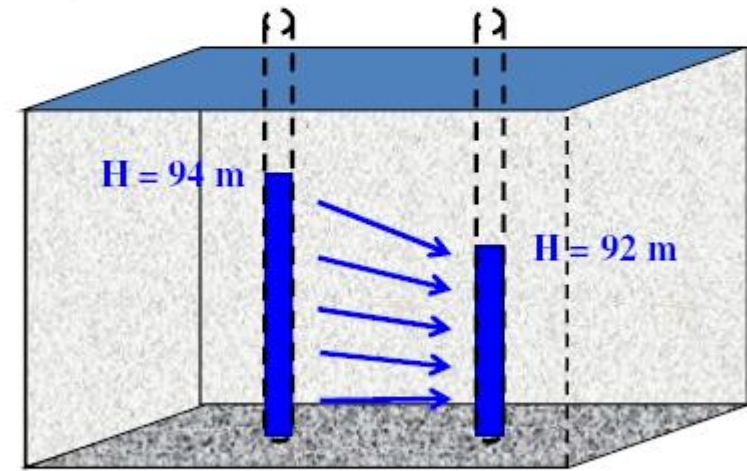
Mesure du niveau piézométrique dans un puits communal

Réalisation d'une carte piézométrique

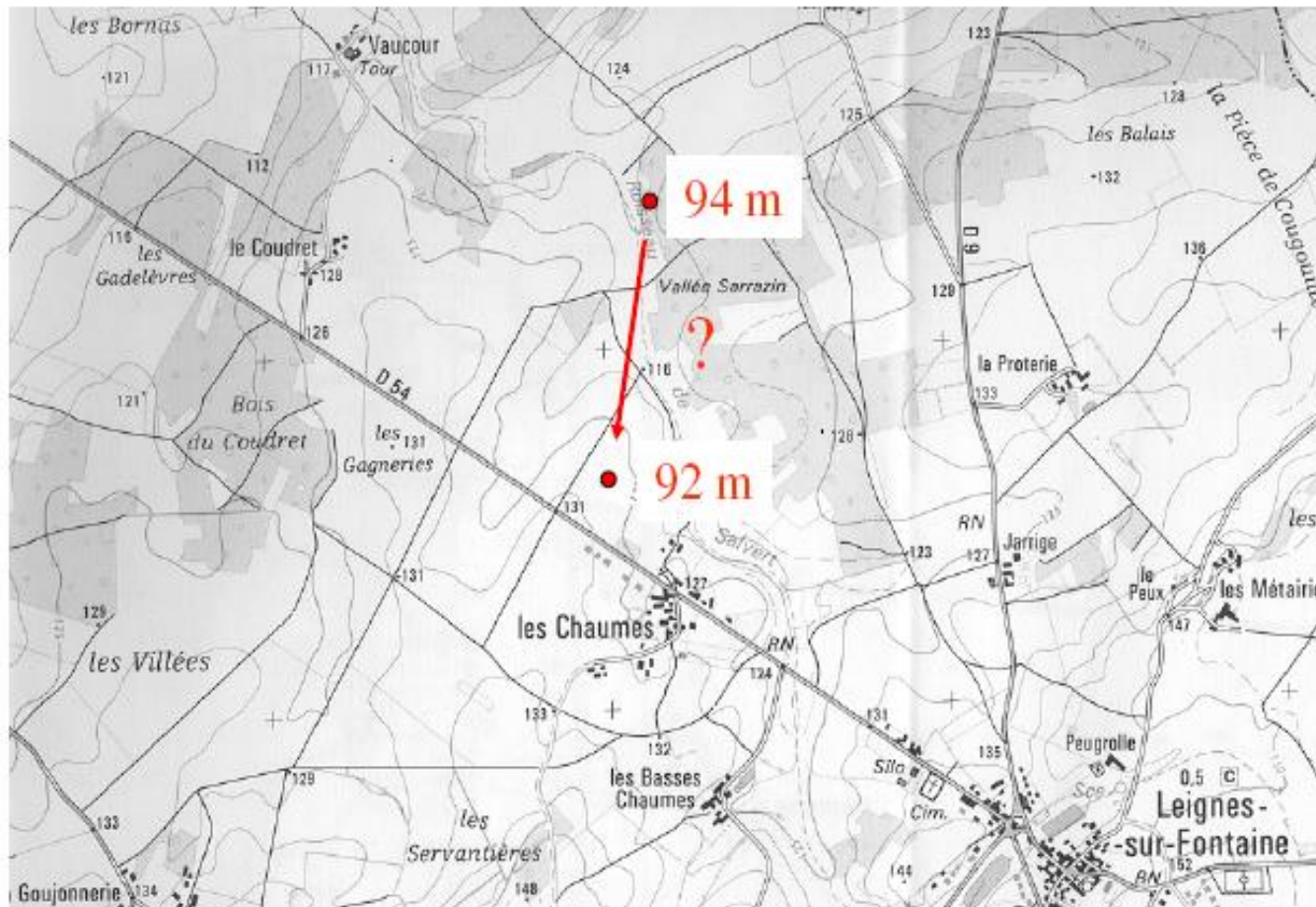
► Réalisation d'un premier forage



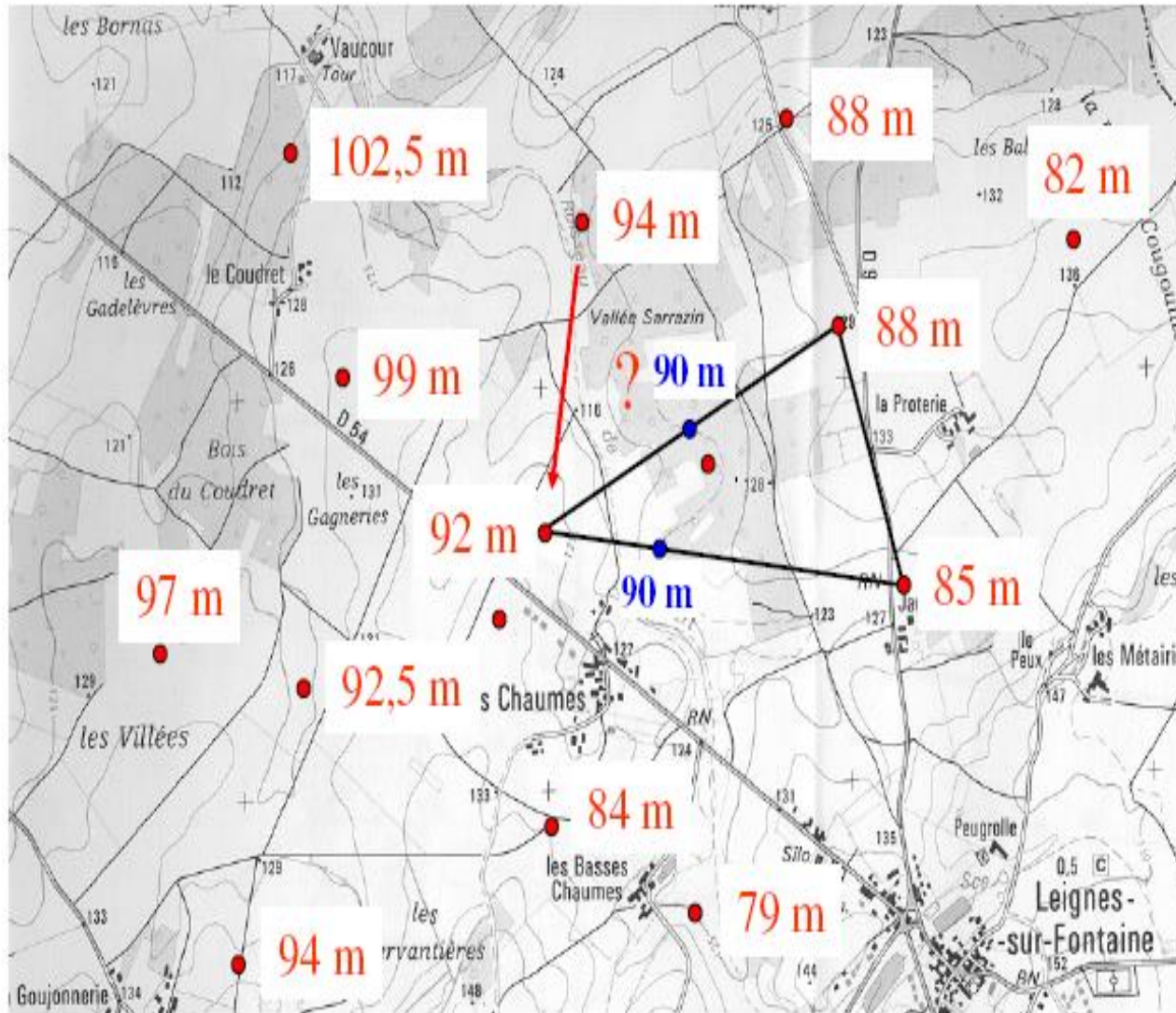
► Réalisation d'un second forage



Réalisation d'une carte piézométrique



Cartographie hydrogéologique

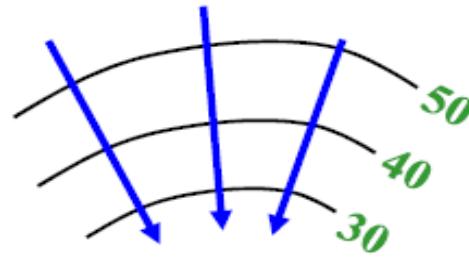
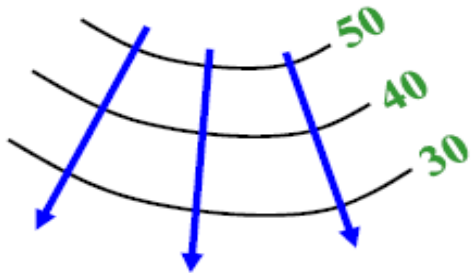


● Points d'observation : puits, forage, piézomètre, source

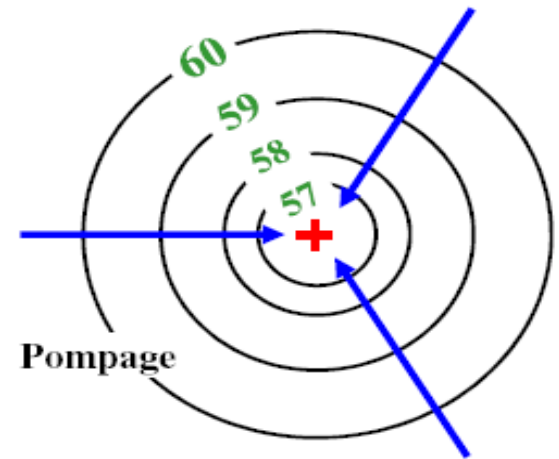
● Cote piézométrique interpolée

Diverses configurations d'écoulement

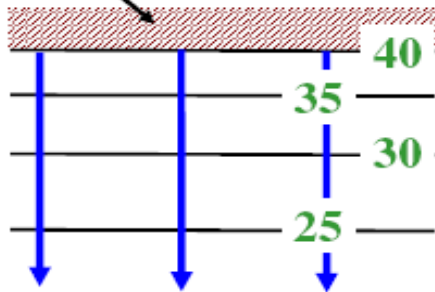
Zone divergente



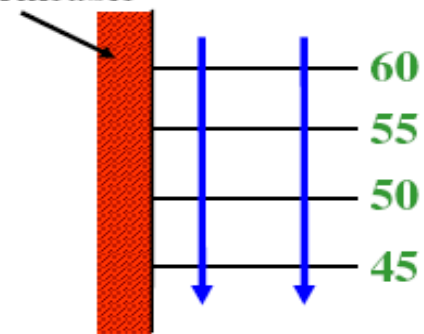
Zone convergente



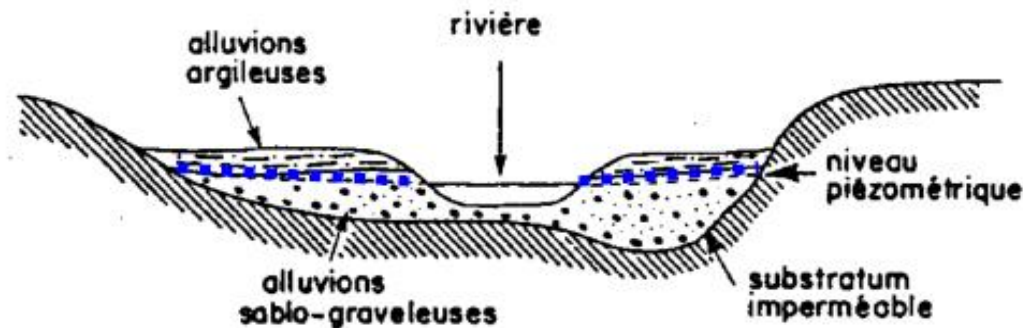
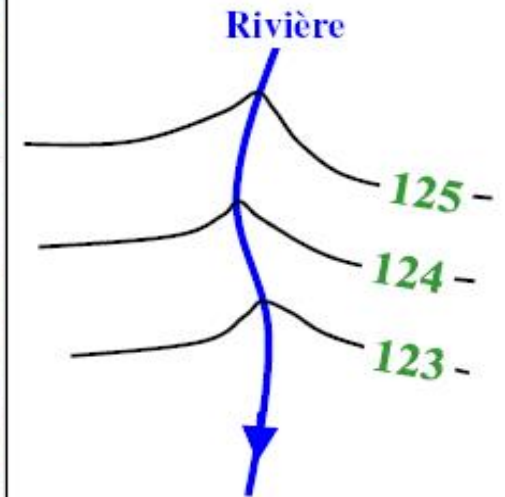
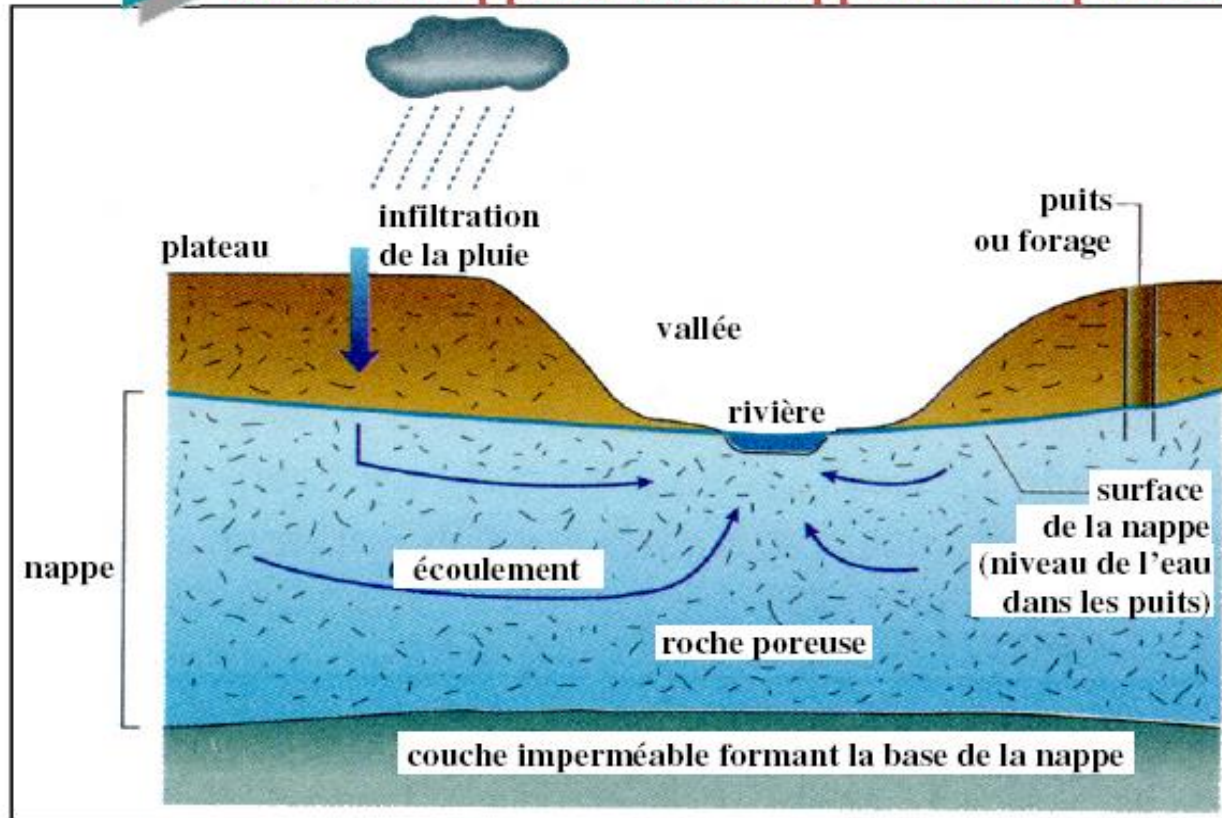
Zone d'alimentation



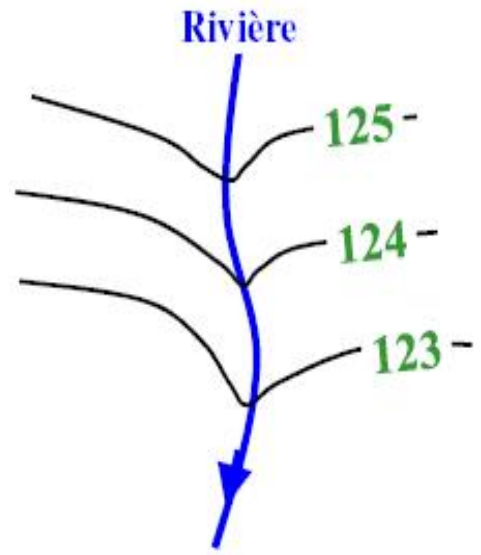
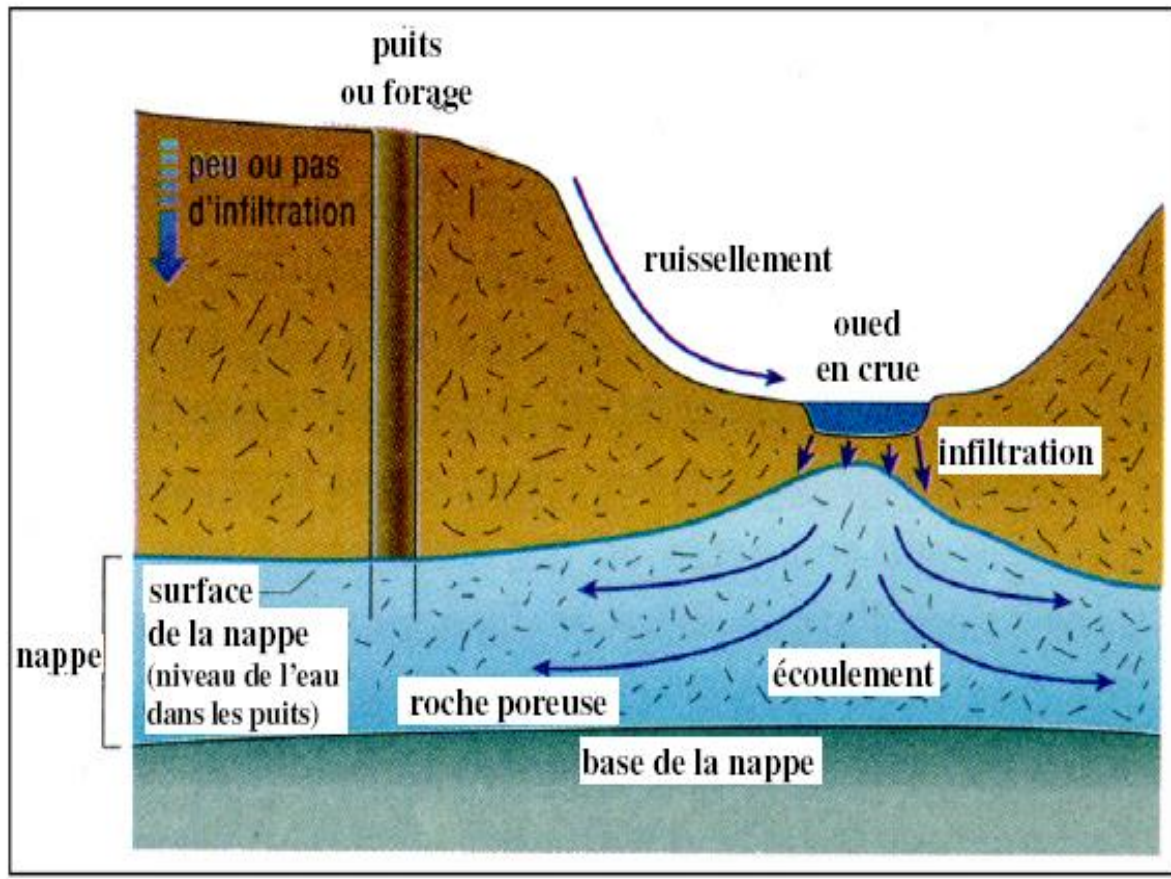
Barrière imperméable

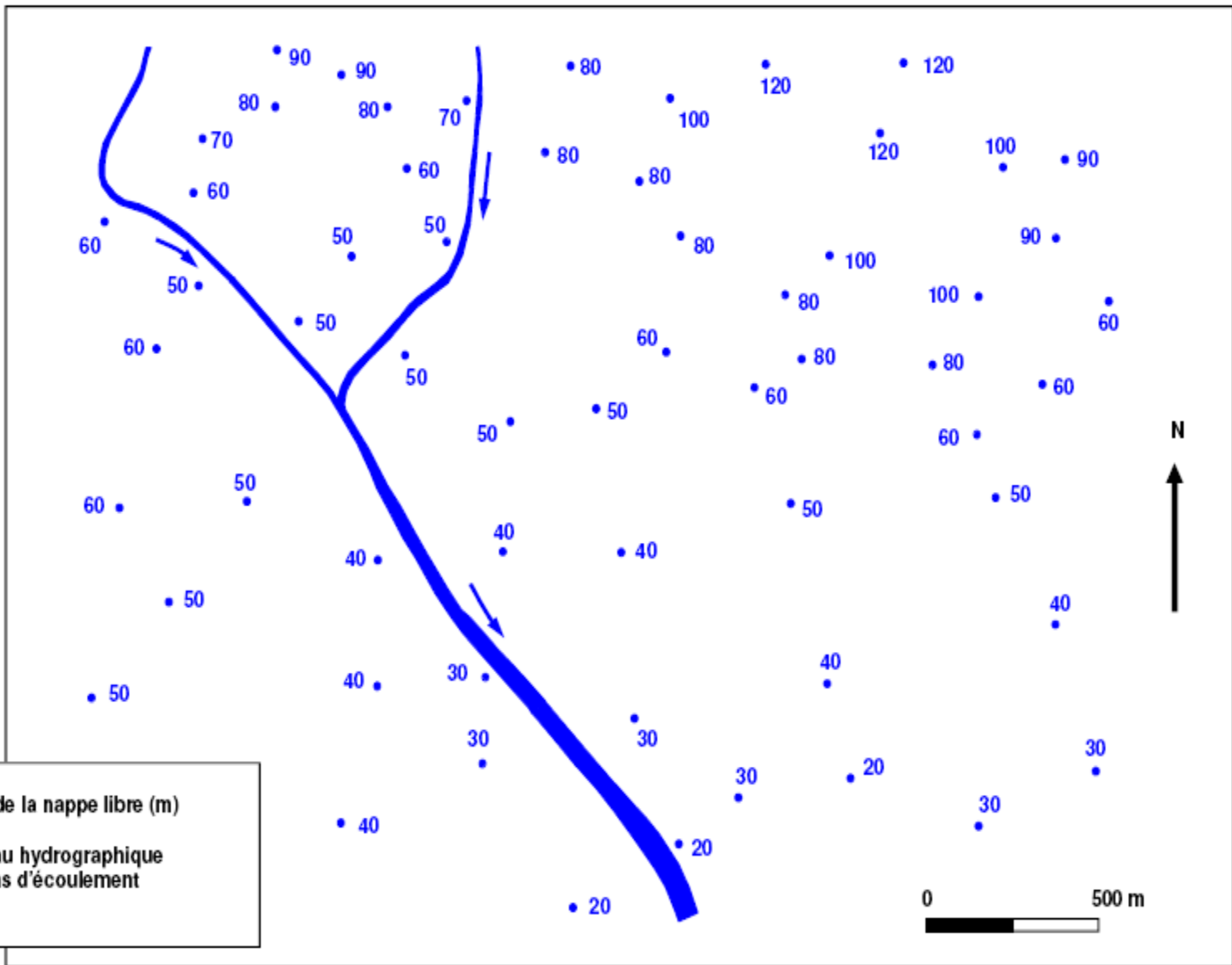


Relation Nappe/Rivière : nappe drainée par la rivière



Relation Nappe/Rivière : nappe alimentée par la rivière







**MERCI POUR VOTRE
ATTENTION !**

Dr. K. BABA-HAMED