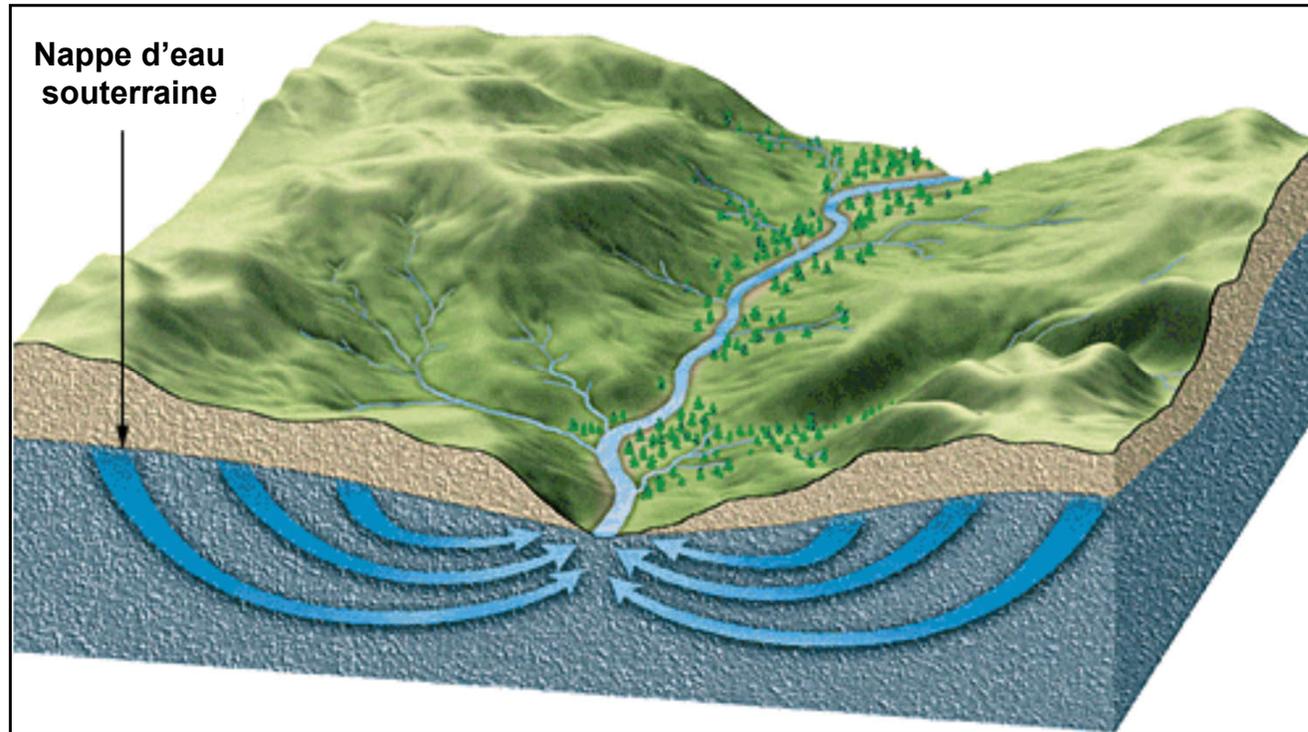


Les écoulements souterrains



Écoulements

- Phénomène dynamique
- Transferts hydrauliques
- Transport d'éventuelles pollutions

Souterrains

- Invisibles
- Mal connus / mal compris / mystérieux
- Difficiles à mesurer
- Délicats à exploiter

Hydrogéologie

Domaine de la géologie couvrant les processus de **circulation de l'eau dans le sol et le sous-sol**, la recherche des eaux souterraines, ainsi que leur captage, leur exploitation, leur protection et leur dépollution éventuelle..

1. Mécanismes hydrauliques

2. Mécanismes géologiques
3. L'eau dans le milieu souterrain
4. Les écoulements souterrains, transporteurs potentiels de pollution
5. Protéger les eaux souterraines

Témoins de la présence d'eau souterraine

Source



Puits fermier



Grotte, Aven, Gouffre (de Padirac)



Geyser



Douves en eau



Gravière



Puits de captage protégés des crues



Hydrogéologie expérimentale (1/4)

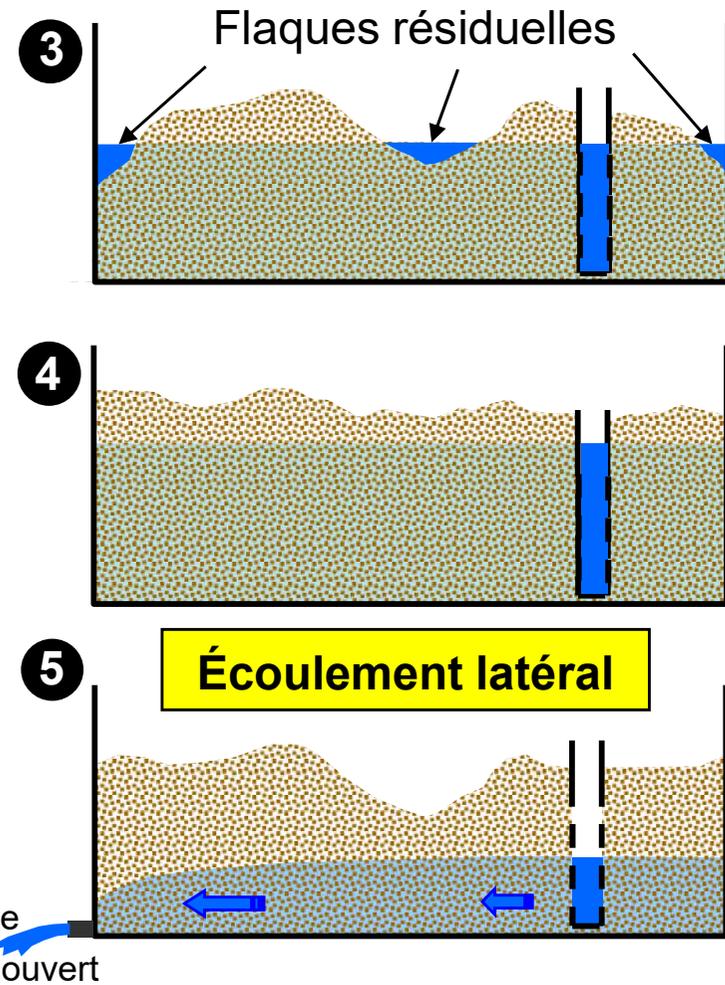
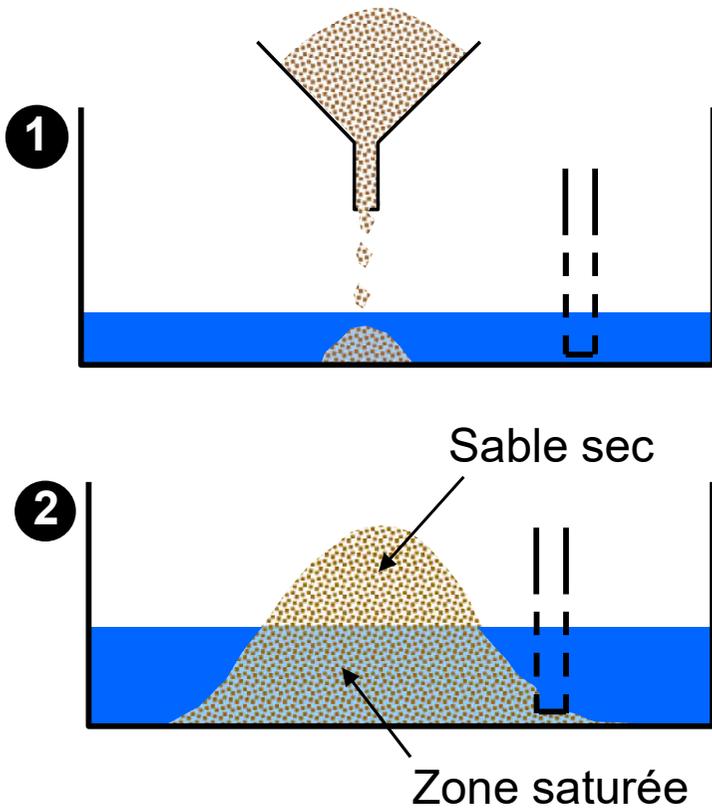


Première approche scientifique par Henri DARCY (1803-1858), pour l'alimentation en eau de Dijon.

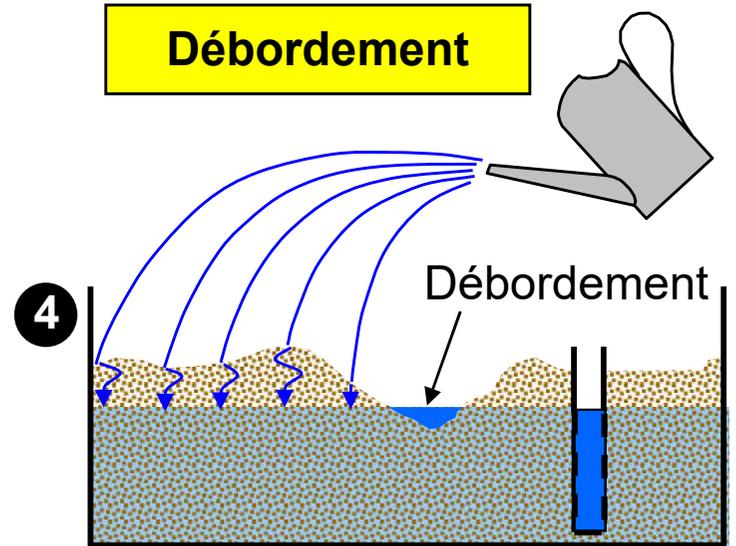
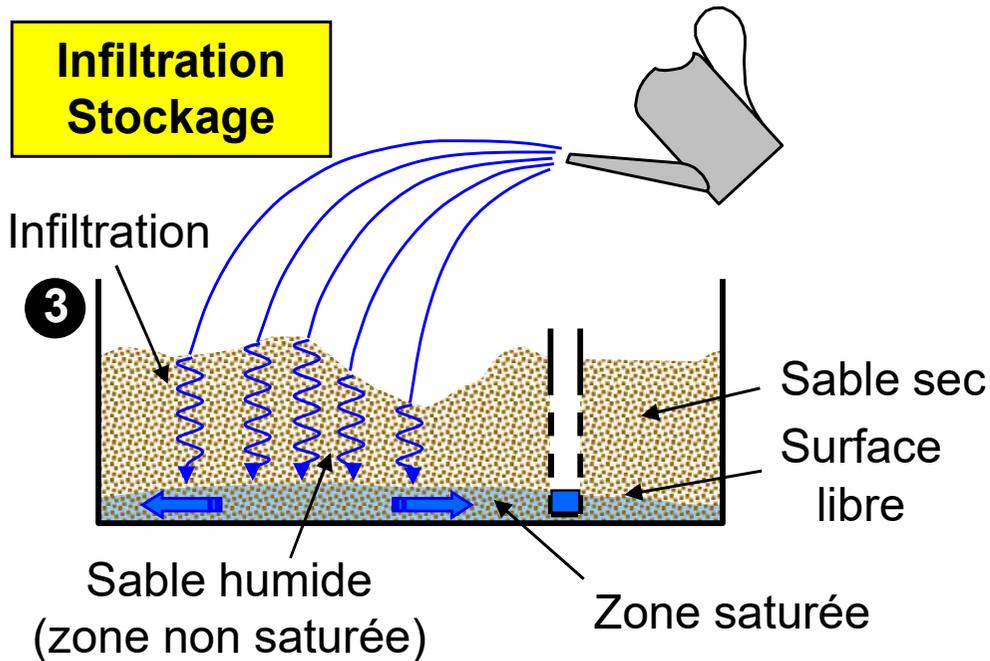
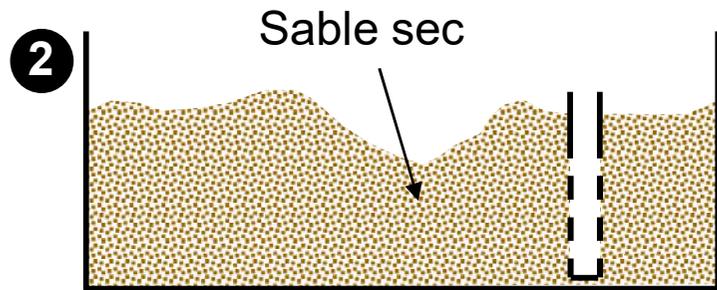
=> En 1847, Dijon est la 2^{ème} ville d'Europe - après Rome - pour les performances de son réseau de distribution d'eau (eau courante à tous les étages des immeubles et santé des habitants améliorée).



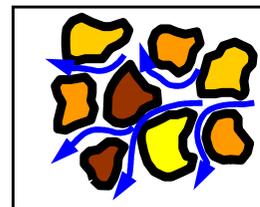
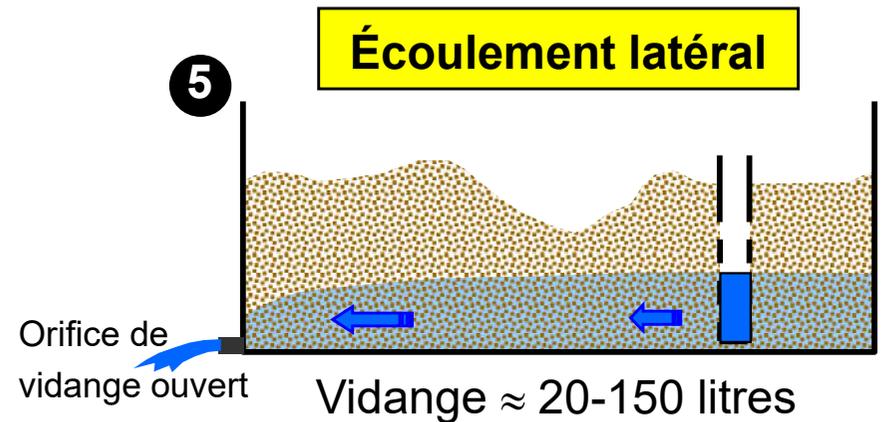
Arrivée d'eau au Jardin Darcy de Dijon



Hydrogéologie expérimentale (2/4)



Volume sable = 1 m³
Volume d'eau ≈ 50-200 litres

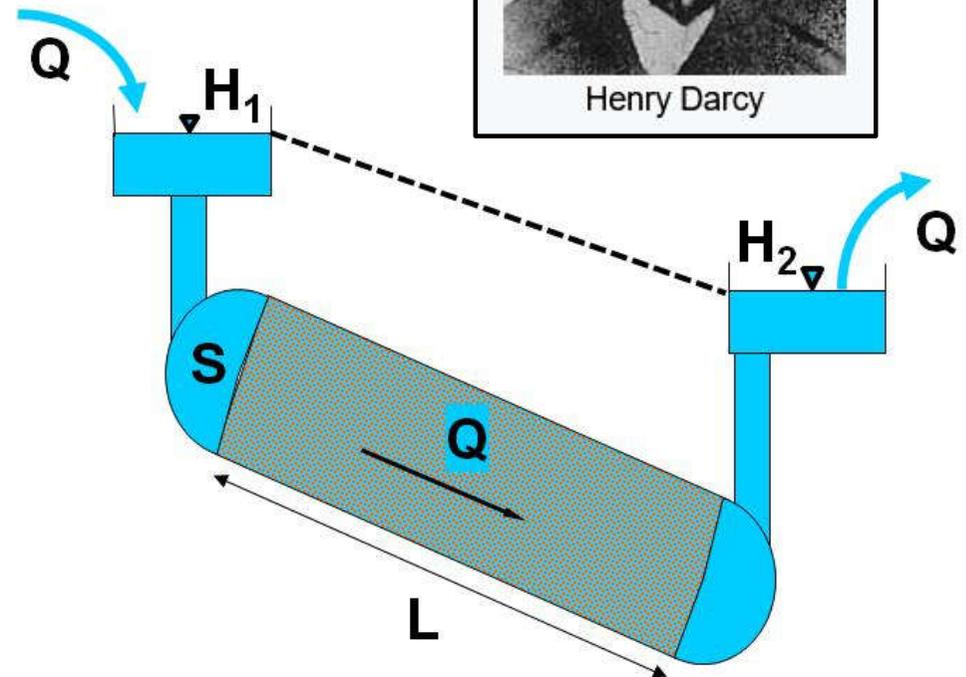
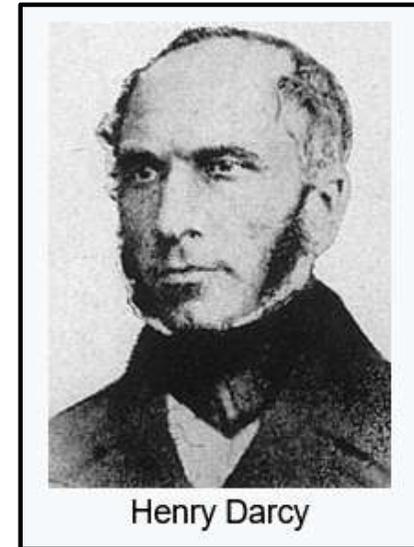


Frottements sur les grains de sable (pertes de charge)
=> réduction du débit et ralentissement de la vidange

Henri Darcy étudie l'écoulement de l'eau à travers une colonne remplie de sable homogène saturé d'eau (« perméamètre de Darcy »).

1856 : Publication du traité fondateur de l'hydrogéologie moderne « Les fontaines publiques de la ville de Dijon »

En faisant varier la longueur L , la section S , la différence de niveau d'eau entre l'amont et l'aval, il observe que le débit Q est directement proportionnel au gradient de charge hydraulique appliqué entre les deux extrémités ($H_1 - H_2$).



La **loi de Darcy** s'applique aux milieux :

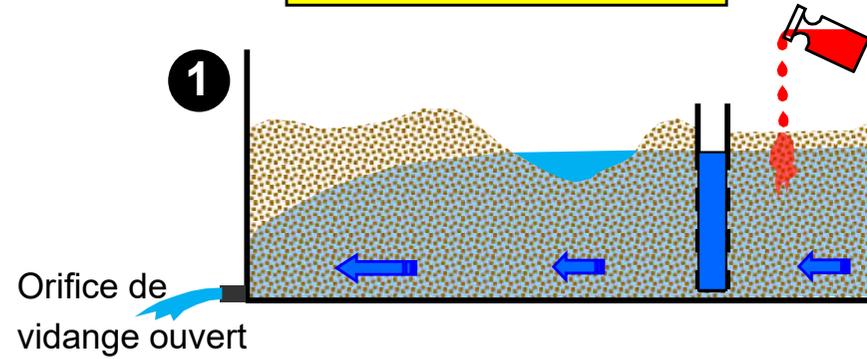
- poreux, homogènes et isotropes
- saturés par un fluide homogène

$$Q = K \cdot S \cdot (H_1 - H_2) / L$$

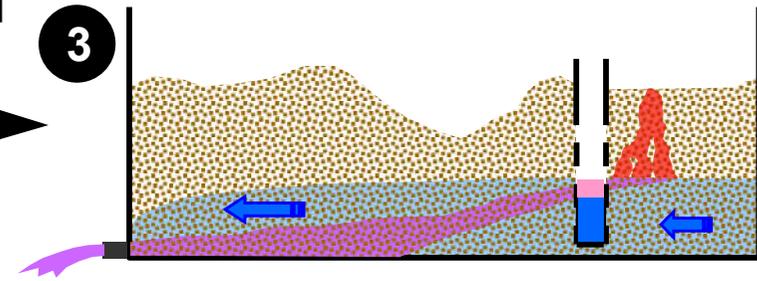
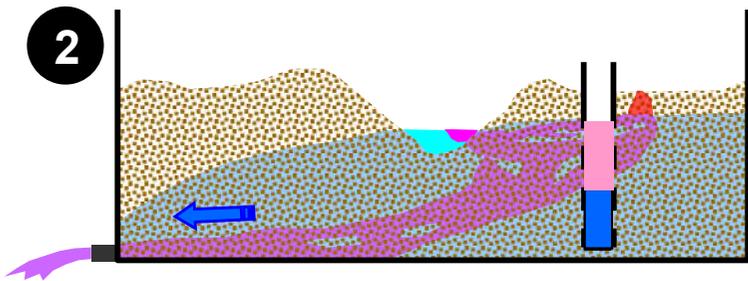
K : conductivité hydraulique ou perméabilité du milieu poreux (m/s)

Hydrogéologie expérimentale (4/4)

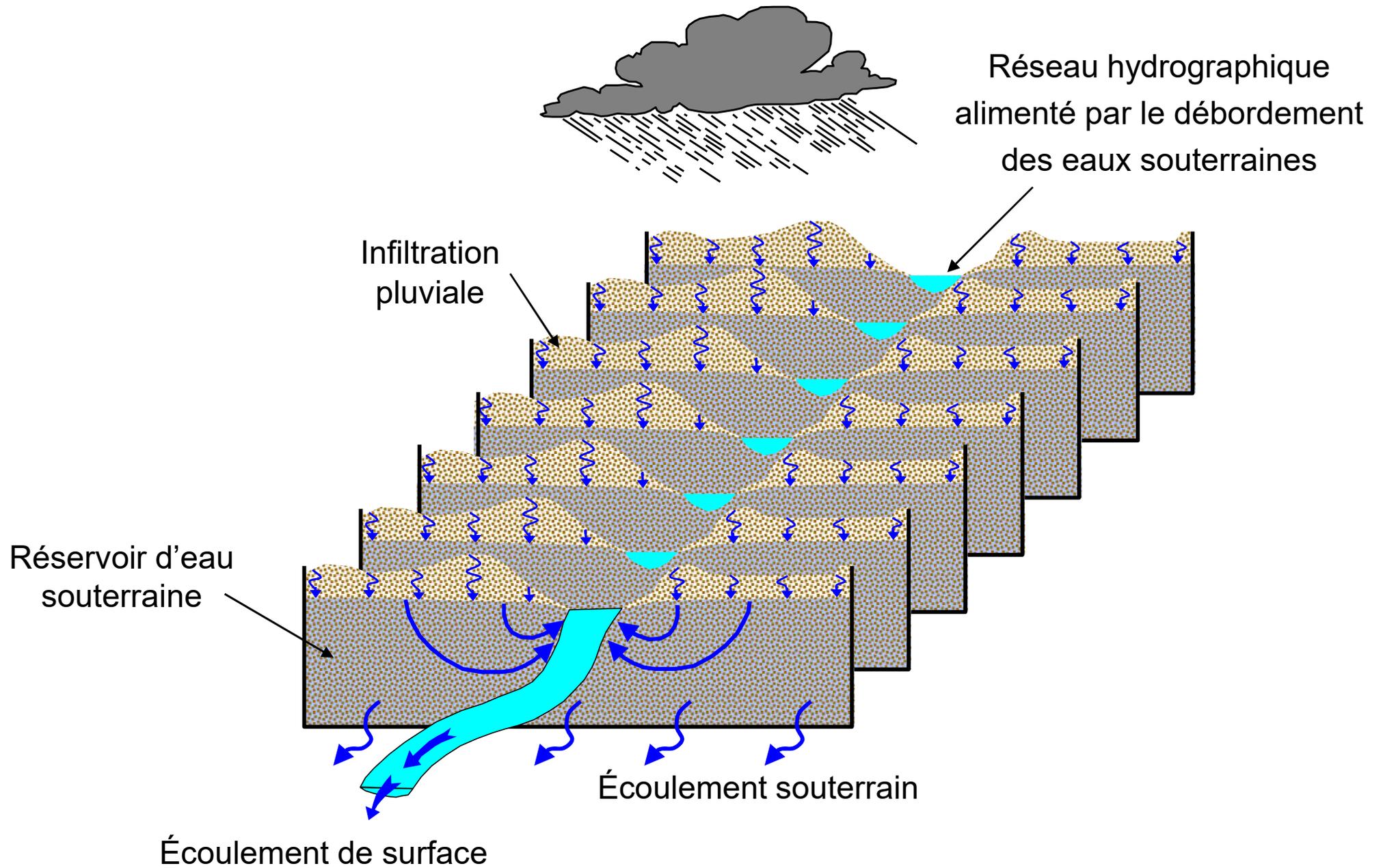
Infiltration d'un colorant liquide



Migration latérale



Hydrogéologie de terrain (1/2)



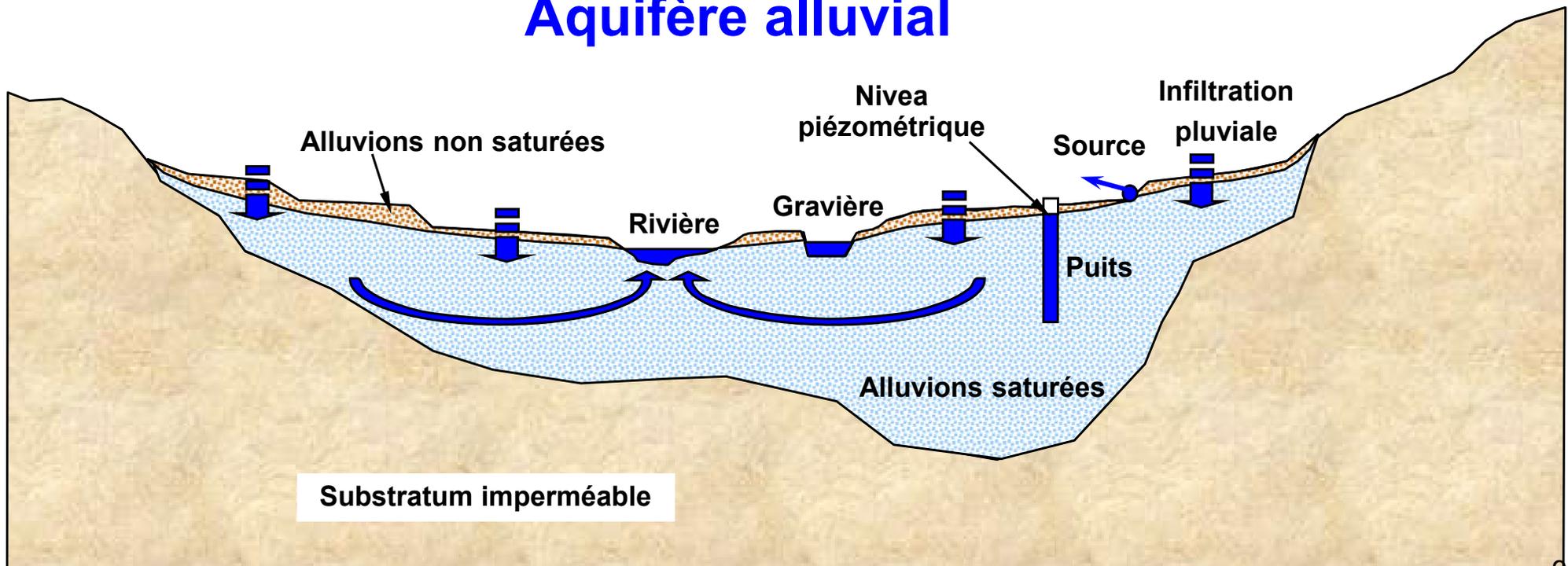
Qu'est-ce qu'un aquifère ?

Massif, couche ou ensemble de couches géologiques :

- Contenant des **roches perméables à l'eau**
- Ensemble géométriquement délimité reposant sur un substratum de roches moins perméables
- Comportant une **zone saturée** où l'eau occupe complètement les pores de la roche
- Conduisant suffisamment l'eau pour permettre :
 - l'**écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine**
 - le **captage de quantités d'eau appréciables**

L'aquifère est l'ensemble du milieu solide et de l'eau souterraine (la nappe)

Aquifère alluvial

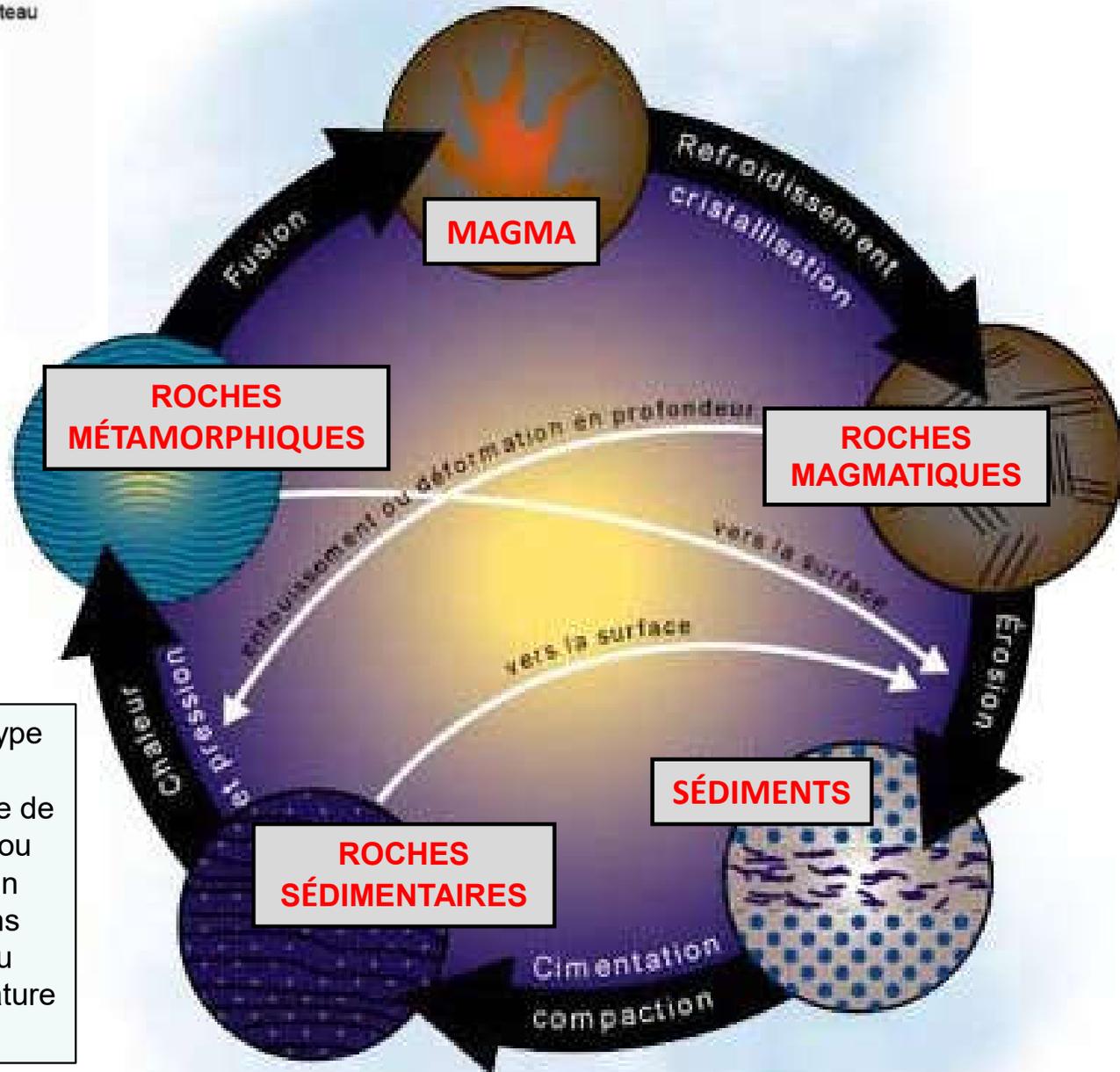
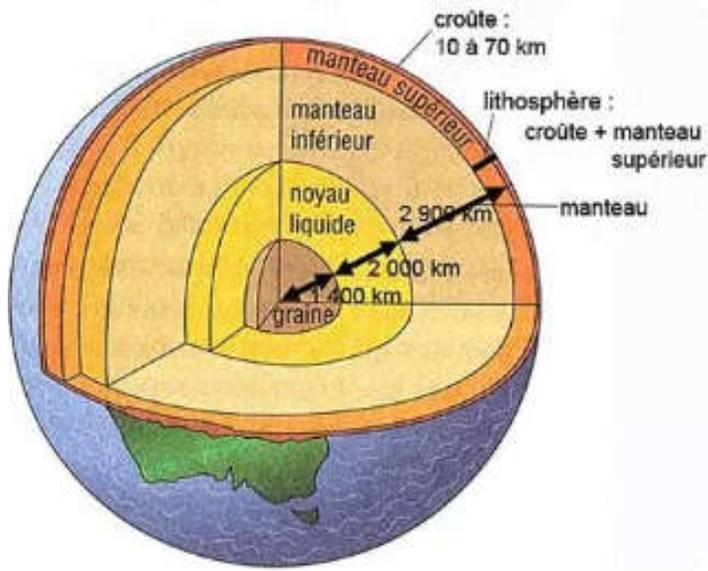


Hydrogéologie

Domaine de la géologie couvrant les processus de **circulation de l'eau dans le sol et le sous-sol**, la recherche des eaux souterraines, ainsi que leur captage, leur exploitation et leur protection.

1. Mécanismes hydrauliques
- 2. Mécanismes géologiques**
3. L'eau dans le milieu souterrain
4. Les écoulements souterrains, transporteurs potentiels de pollution
5. Protéger les eaux souterraines

Le cycle des roches



Une **roche métamorphique** est un type de roches dont la formation a pour origine la transformation à l'état solide de roches sédimentaires, magmatiques ou encore métamorphiques au cours d'un temps long, en raison de modifications des paramètres physico-chimiques du milieu (notamment pression, température et teneur en eau)

Les roches magmatiques

Refroidissement rapide

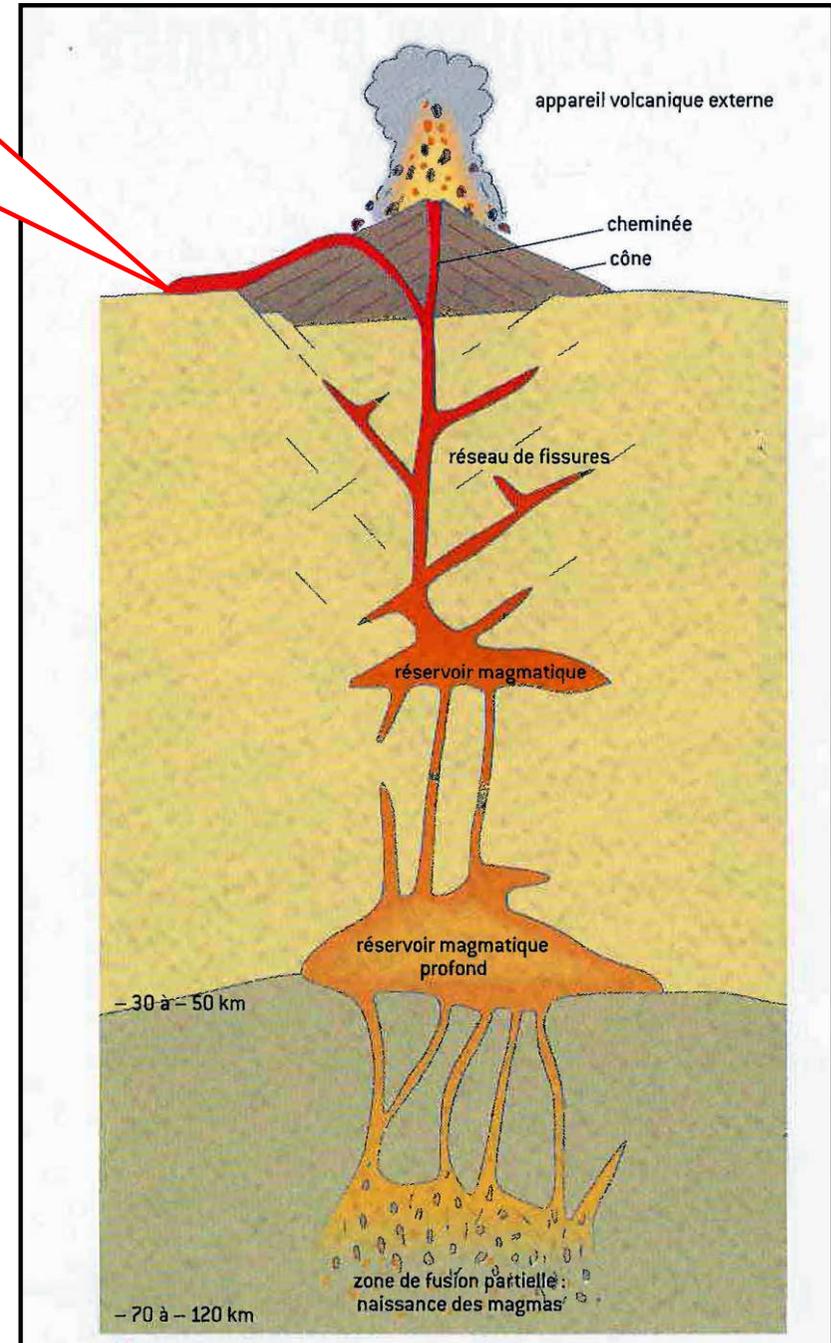
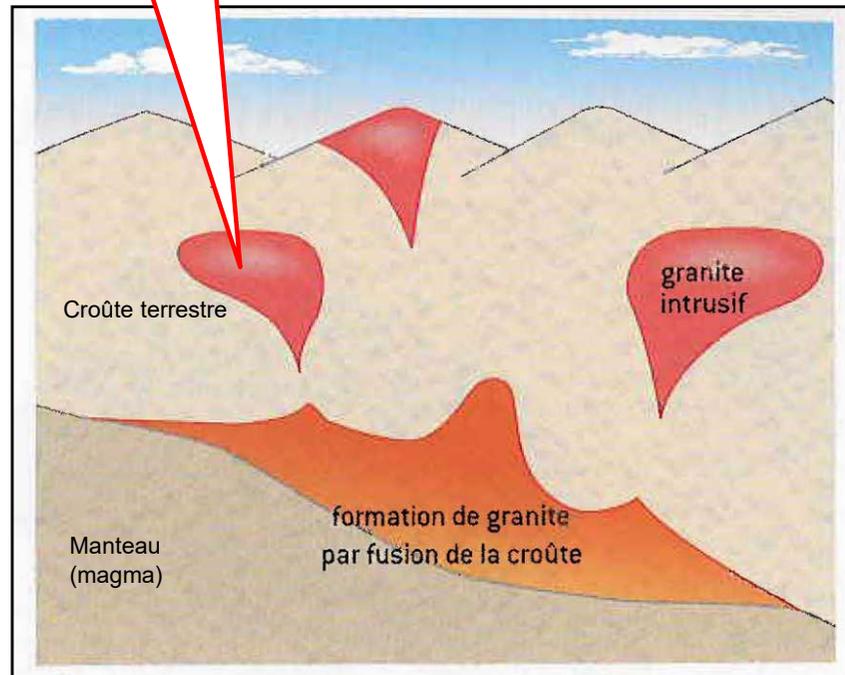
Roches volcaniques (extrusives)

Basalte, Andésite, Rhyodacite, Rhyolite, Trachyte

Refroidissement lent

Roches plutoniques (intrusives)

Granite, Granodiorite, Diorite, Gabbro, Syénite, Péridotite



Formation des roches sédimentaires

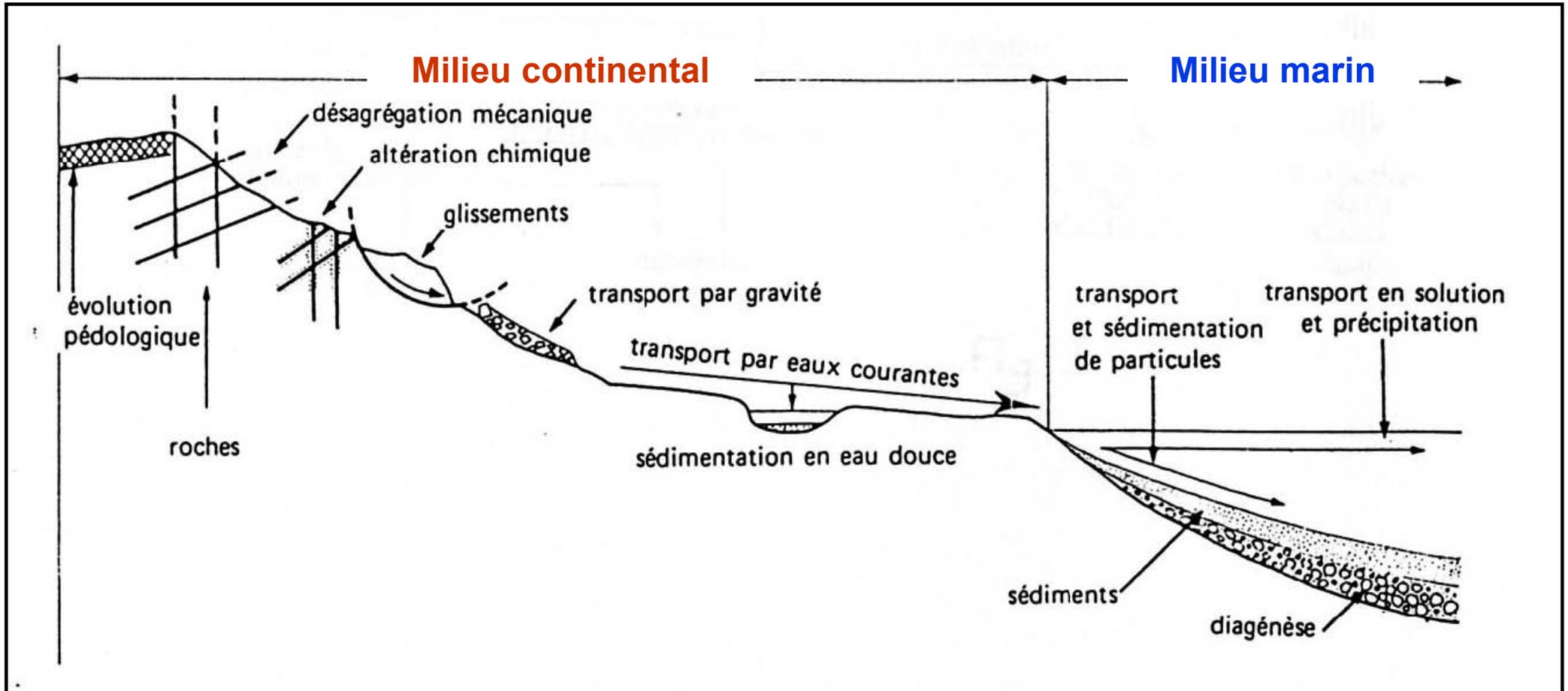
- (1) **Altération physique** (eau, gel ...),
chimique et biologique
- (2) **Transport** (gravité, eau, vent, glace ...)
- (3) **Sédimentation dans un bassin**
(continental ou marin)
- (4) **Diagenèse**

Diagenèse :

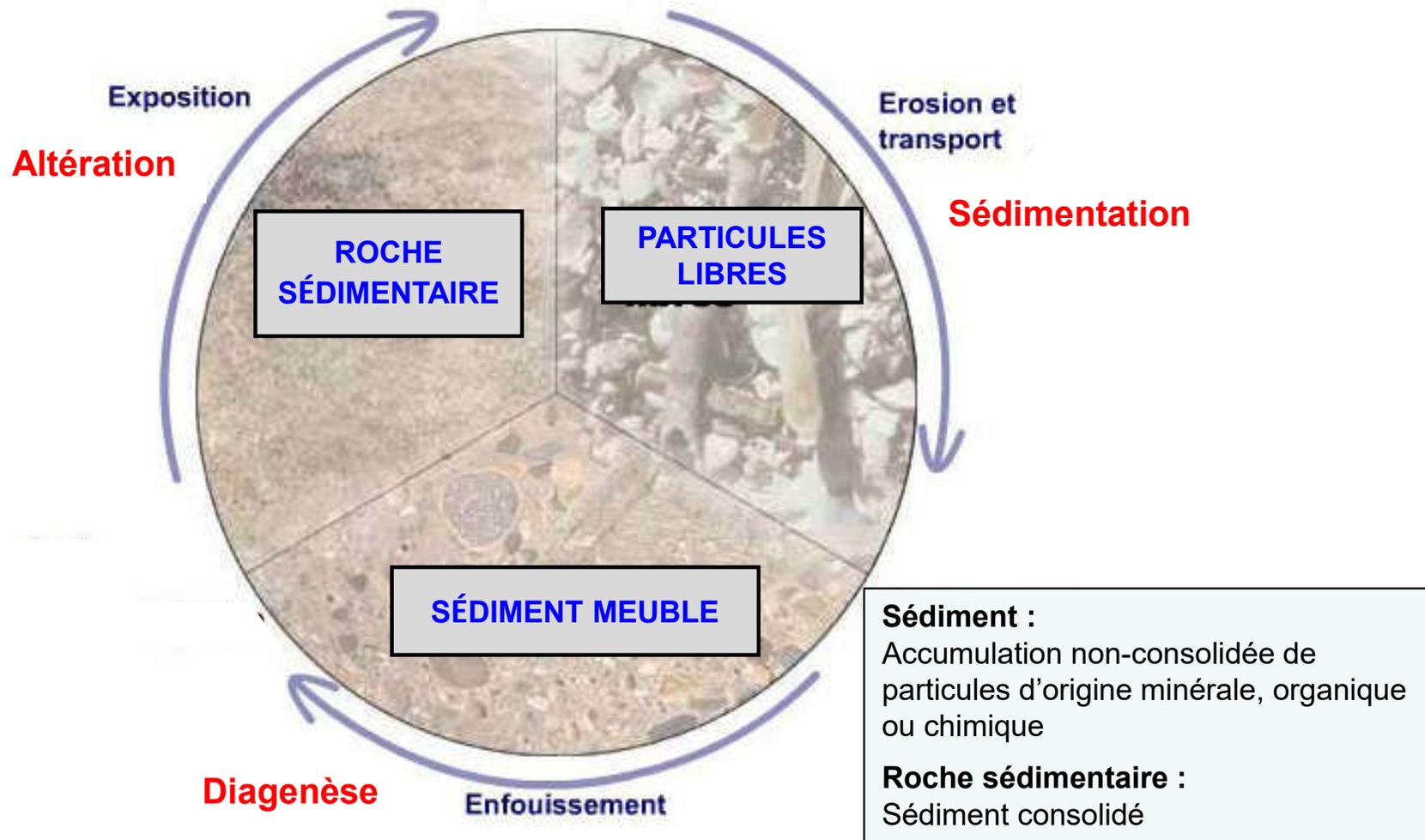
Transformation d'un dépôt sédimentaire en roche par :

- **compaction** avec perte d'eau (durcissement par dessiccation),
- **augmentation de température** par enfouissement,
- **dissolution et mobilisation de minéraux**,
- **cémentation** (précipitation de sels dissous provenant du dépôt sédimentaire ou de roches voisines).

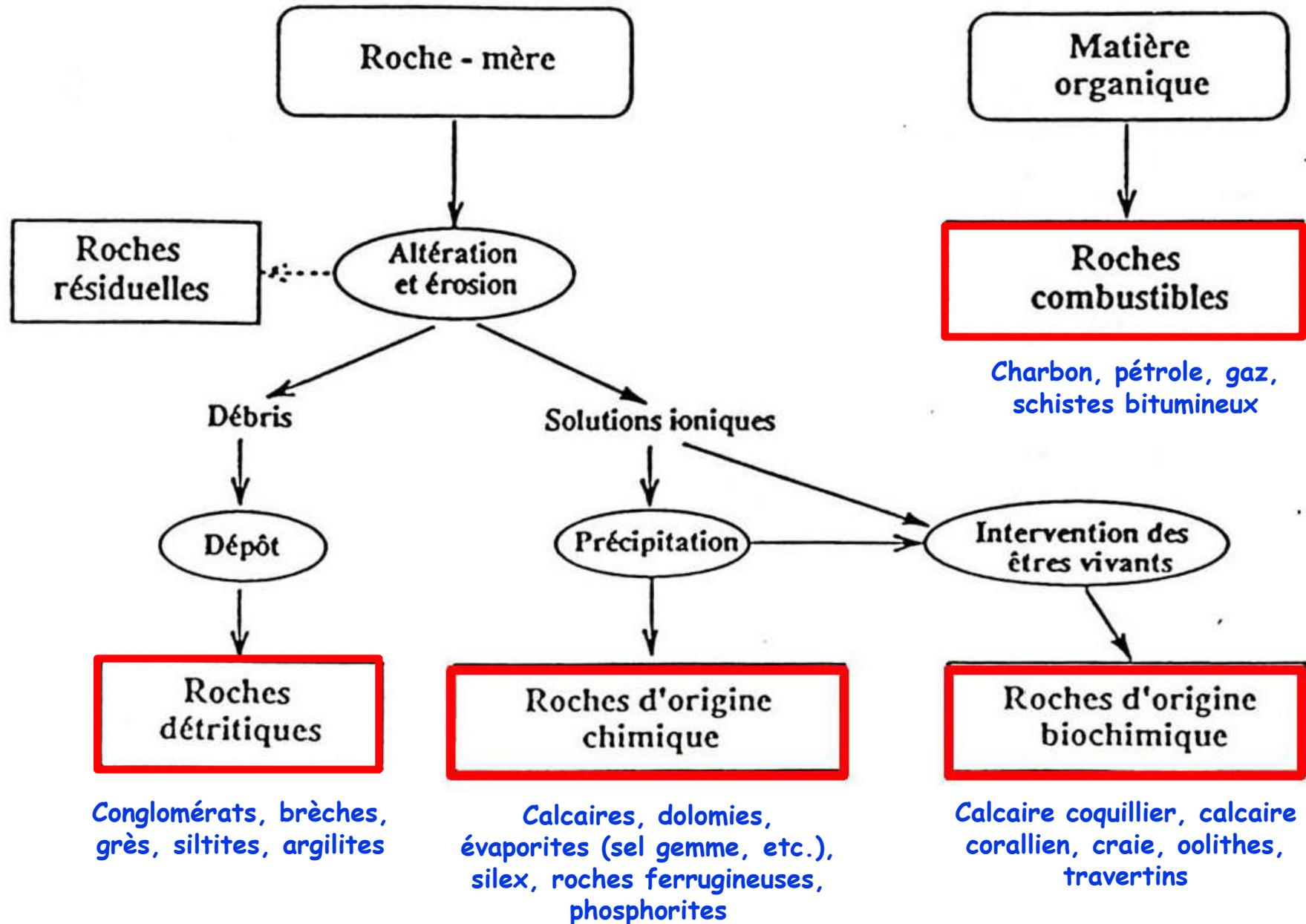
Dans les premiers décimètres, les **êtres vivants** peuvent apporter CO₂ et produits sulfureux.



Cycle des roches sédimentaires

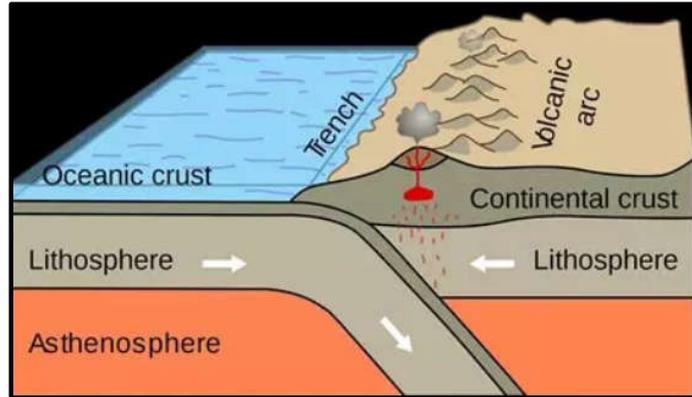


Classification des roches sédimentaires



Les roches métamorphiques

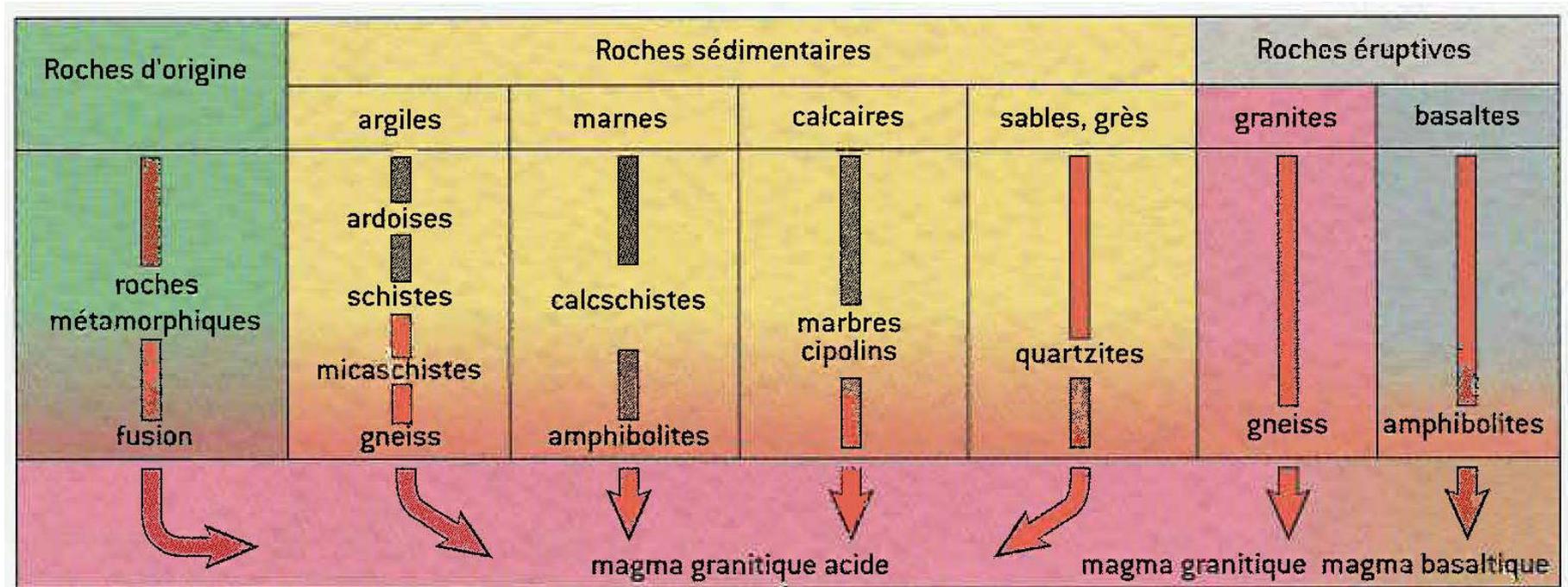
Zone de subduction au contact de plaques tectoniques océanique et continentale



Autres formes de **métamorphisme** :

- **de contact** autour d'une poche de magma intrusif
- **régional** dans les zones de collision continentale (ex. gneiss et schistes des Alpes et de l'Himalaya)
- **d'impact** au point d'impact d'un astéroïde
- **hydrothermal** autour des zones de remontées de fluides chauds
- **de surcharge**, sous le poids des sédiments accumulés (ex. ardoises dans les bassins sédimentaires)
- **dynamique**, sous l'effet de contraintes mécaniques dans les zones de failles (ex. mylonites ou brèches tectoniques)

Augmentation de pression et de température ↓

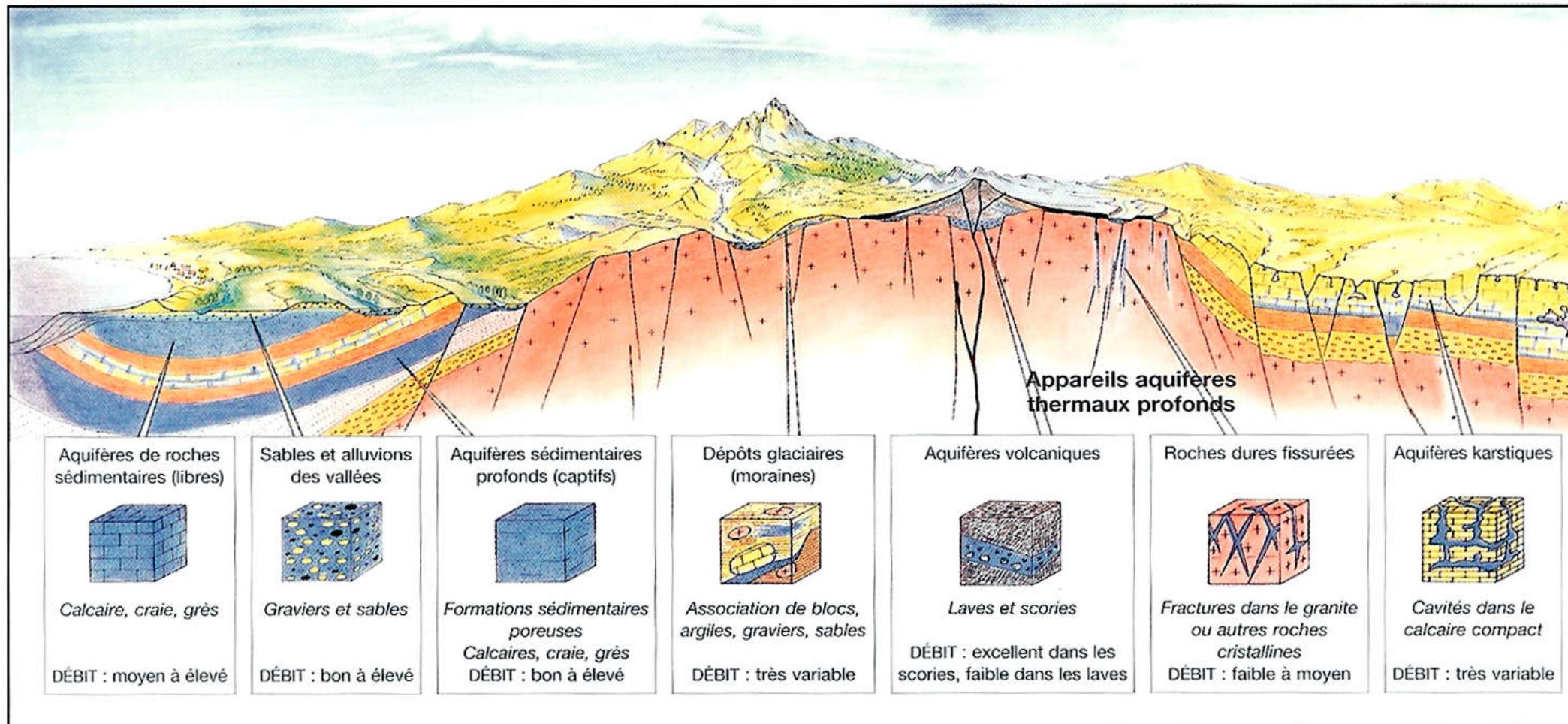


Hydrogéologie

Domaine de la géologie couvrant les processus de **circulation de l'eau dans le sol et le sous-sol**, la recherche des eaux souterraines, ainsi que leur captage, leur exploitation et leur protection.

1. Mécanismes hydrauliques
2. Mécanismes géologiques
- 3. L'eau dans le milieu souterrain**
4. Les écoulements souterrains, transporteurs potentiels de pollution
5. Protéger les eaux souterraines

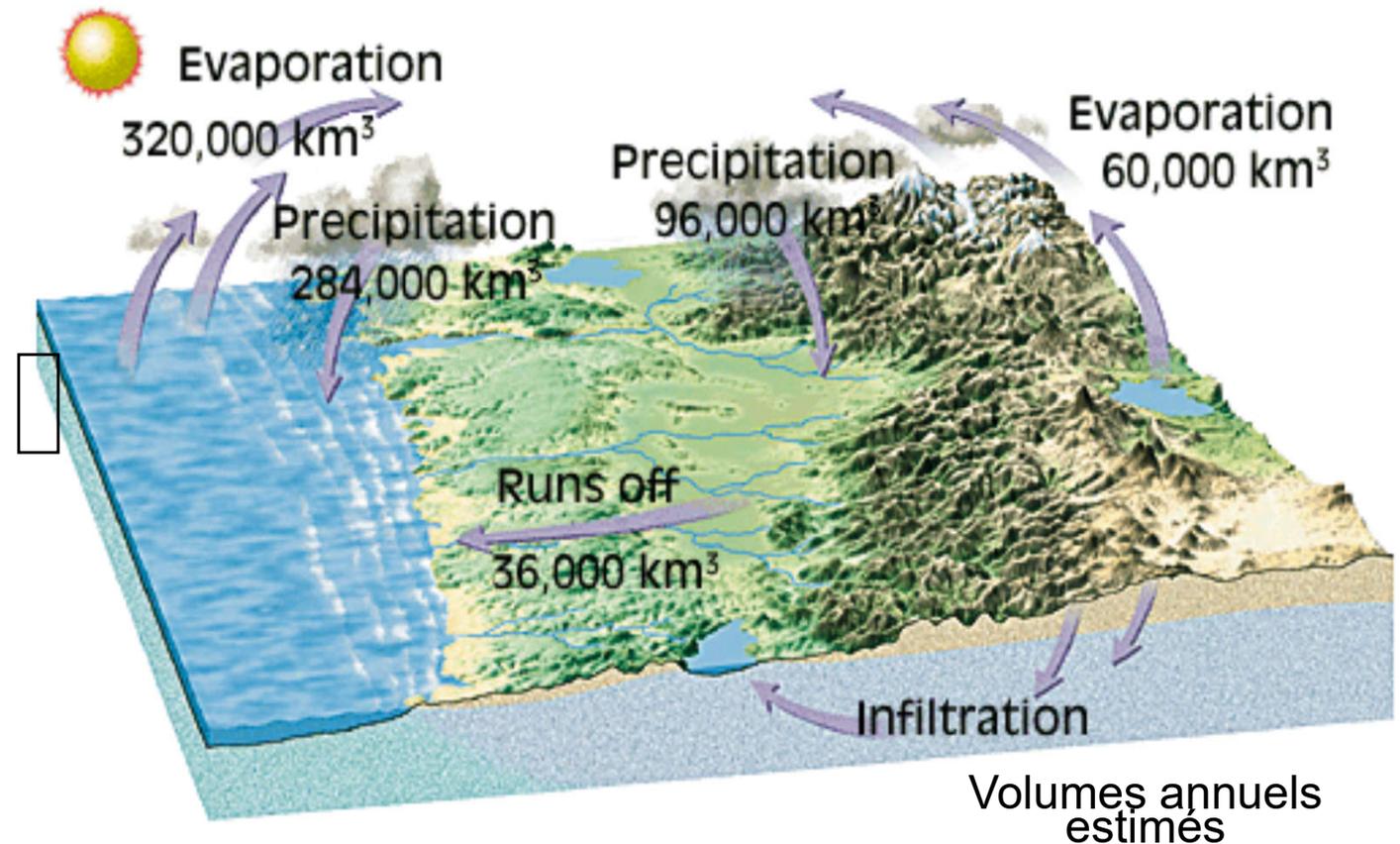
Grande diversité des contextes aquifères



Trois grands types d'aquifères :

- **continu : milieu poreux**
- **discontinu fissurés : milieu fissuré**
- **discontinu karstiques**

Le cycle de l'eau

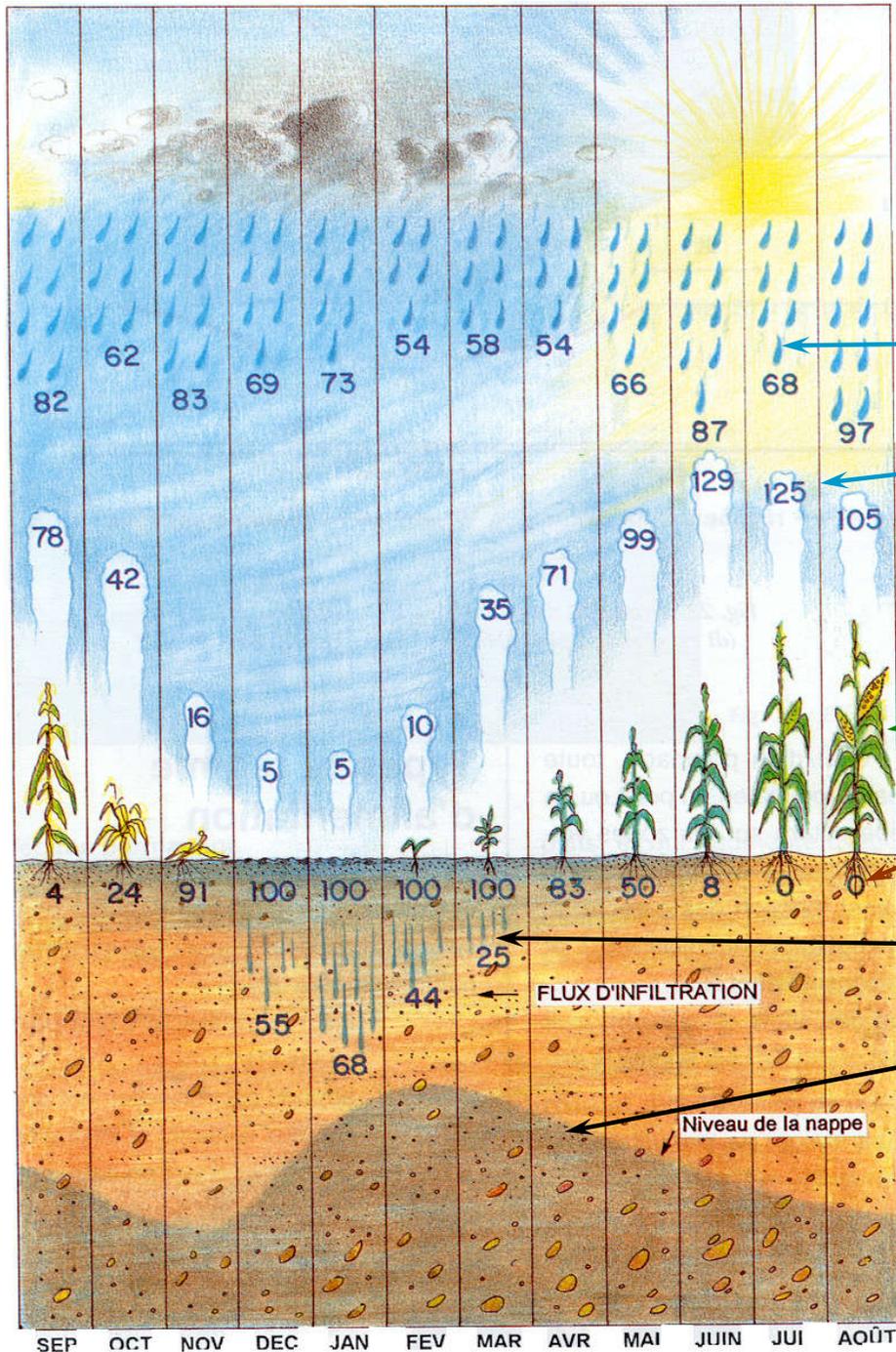


Circulation générale de l'eau, en circuit fermé et avec changements d'état, entre les réservoirs de l'hydrosphère - océans, atmosphère, surface et sous-sol des terres émergées - mettant en jeu des phénomènes :

- ◆ **aériens** : évaporation, convection, condensation et précipitation
- ◆ **superficiels** : ruissellement et écoulement
- ◆ **souterrains** : infiltration et écoulement, avec variation et renouvellement des stocks dans les réservoirs

Le cycle de l'eau, dont le moteur est l'énergie solaire, obéit aux lois de la gravitation. Il régule la distribution de l'eau à la surface de la Terre.

Pluie brute et Pluie efficace



N.B. : Valeurs mensuelles relatives à une zone plutôt humide

Précipitations (= 853 mm/an)

Évapotranspiration réelle (= 661 mm/an)
(évapotranspiration potentielle = 661 mm/an)

État de la végétation

Réserve en eau du sol
(Réserve utile maximale = 100 mm)

Infiltration = Pluie efficace (= 192 mm/an)

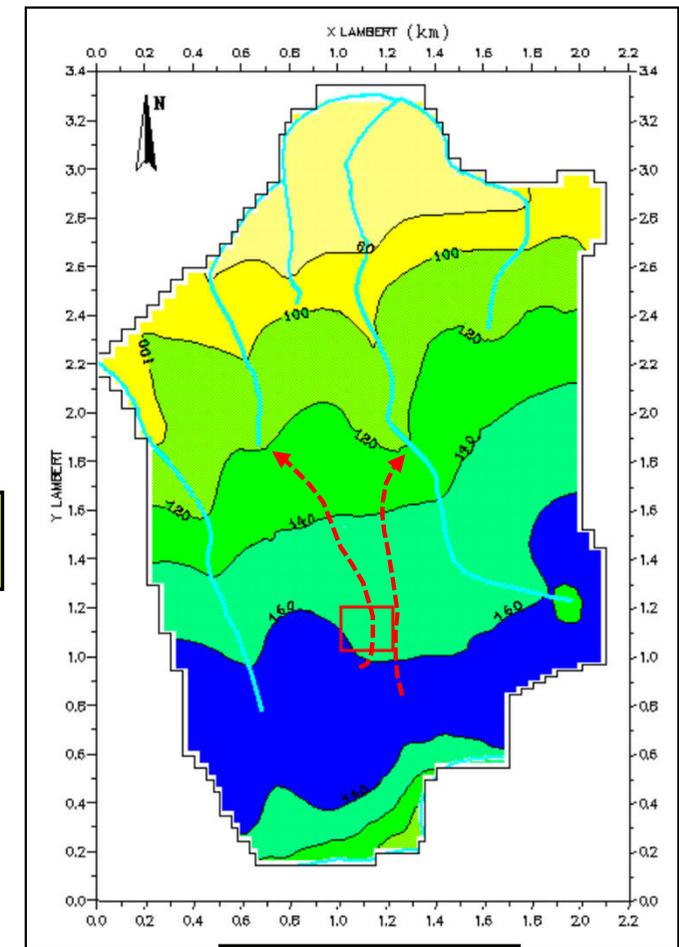
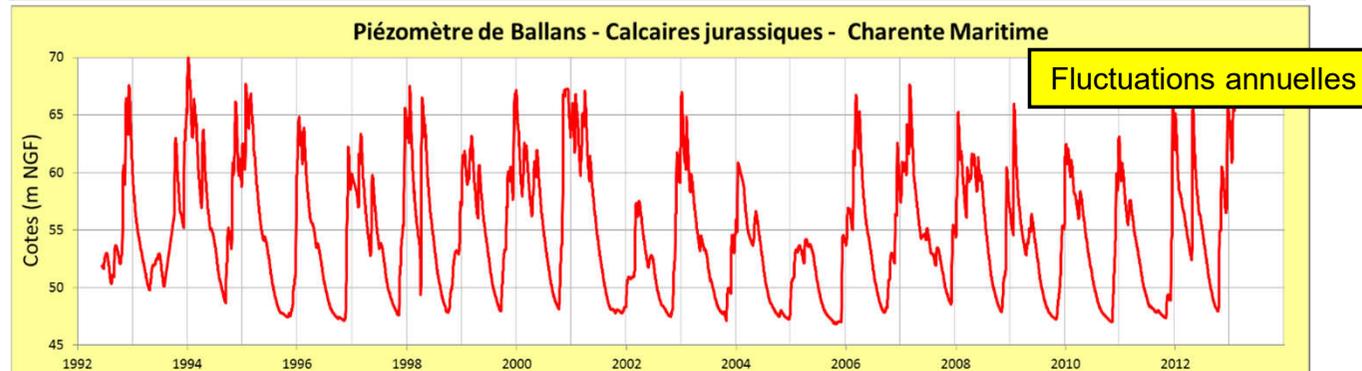
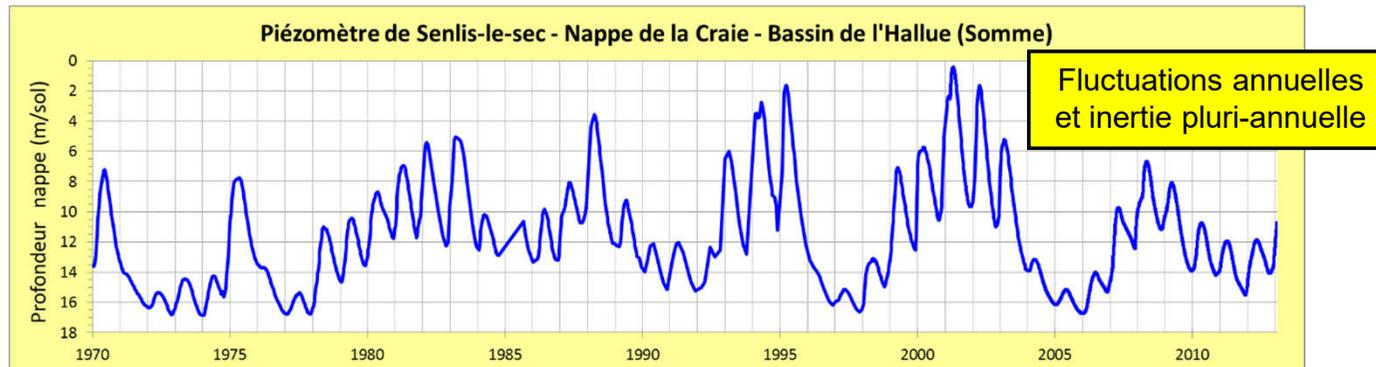
Niveau de la nappe

Infiltration = Pluie efficace (des hydrogéologues)
principalement de novembre à mars

Niveaux piézométriques : chroniques et cartes

Niveau piézométrique : altitude, exprimée en mètres au-dessus du niveau de la mer (m NGF), à laquelle l'eau se stabilise dans un forage, un puits ou un piézomètre (forage d'observation en petit diamètre).

- Les mesures sont faites dans des ouvrages non captés ou, à défaut, après arrêt des pompages.
- Relevées en différents points à une époque donnée, les mesures permettent de tracer des **cartes piézométriques**, où des **courbes isopièzes** relient les points de même niveau piézométrique (comme les courbes de niveau sur une carte topographique).
- Répétées à différentes dates, les mesures permettent de tracer des **chroniques piézométriques** montrant l'évolution des niveaux de nappe au cours du temps.

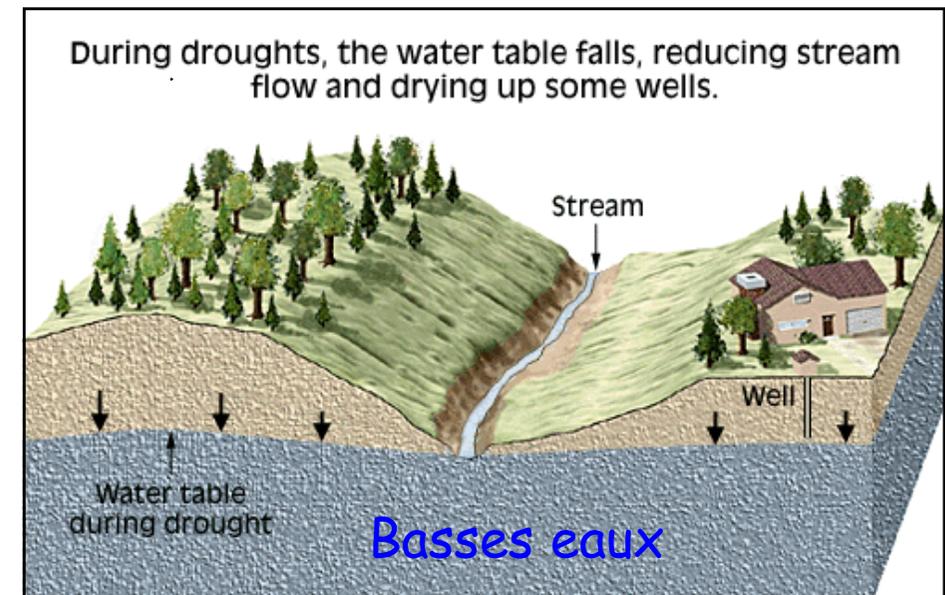
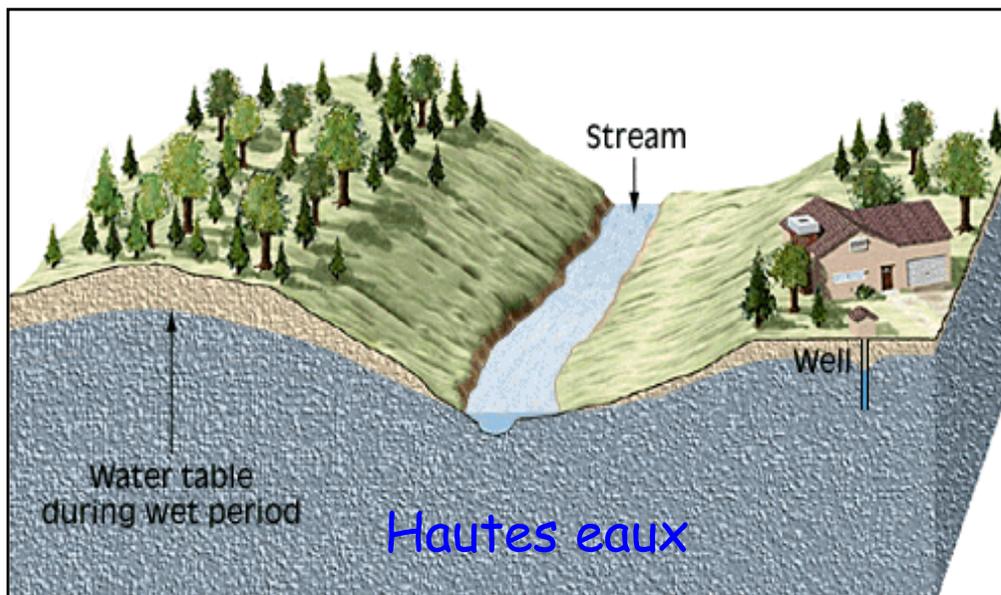
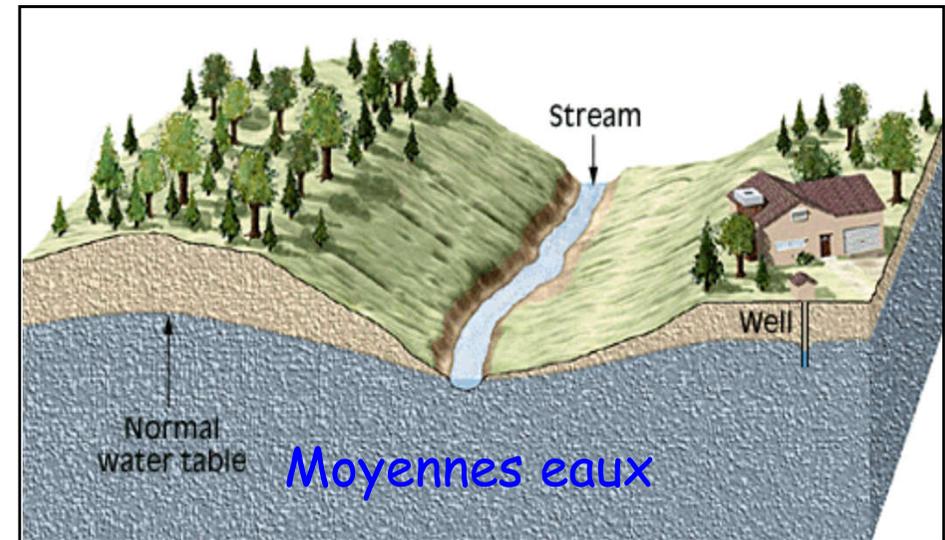


Carte piézométrique

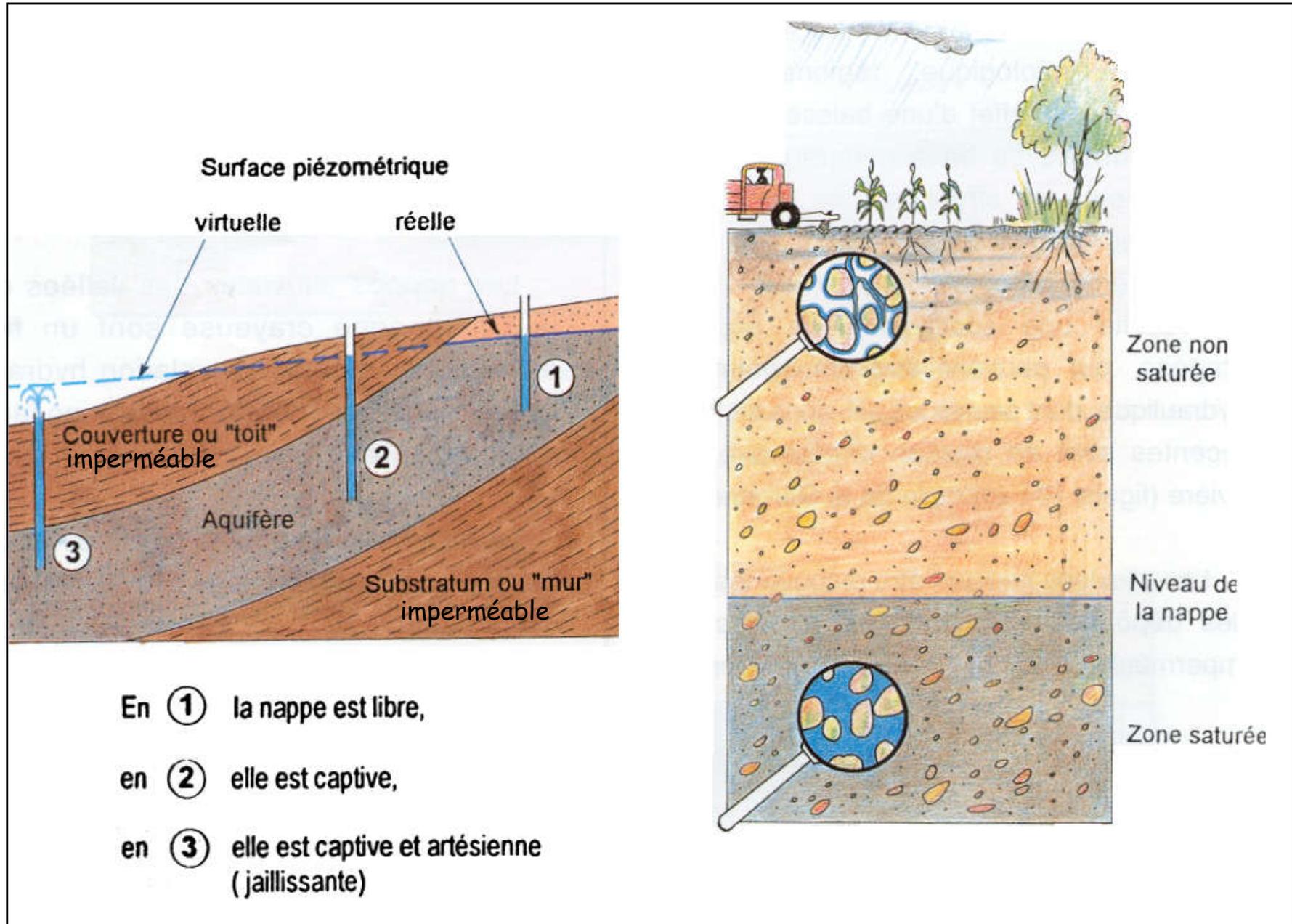
— — — — — Trajectoire d'écoulement, perpendiculaires aux isopièzes

Fluctuations piézométriques

Les nappes sont influencées par les recharges pluviales et par les pompages qui y sont effectués
=> fluctuations piézométriques saisonnières et interannuelles pouvant assécher les sources et les puits en période de basses eaux.

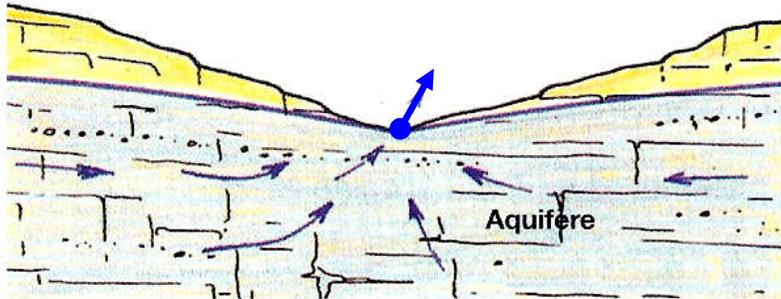


Nappes libres et nappes captives

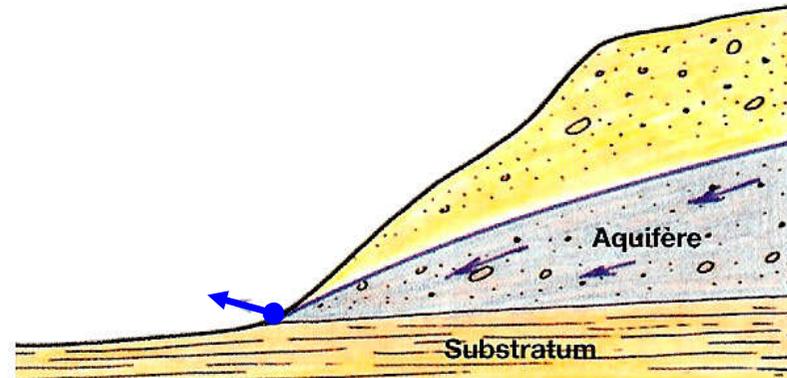


Différents types de sources

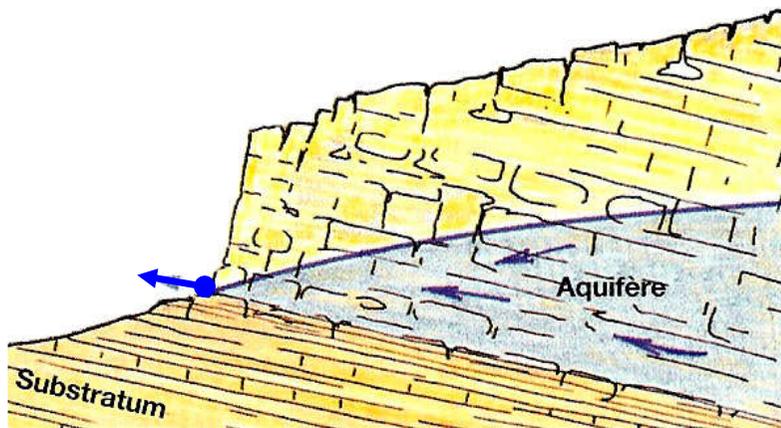
Source : "lieu et phénomène d'apparition et d'écoulement naturel d'eau souterraine à la surface du sol, assez bien individualisé"



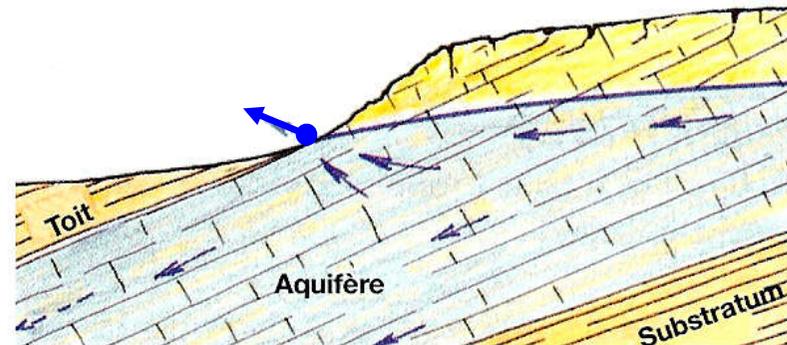
Source de dépression
Exemple : la craie de Picardie



Source de déversement
Exemple : la basse plaine de l'Ain

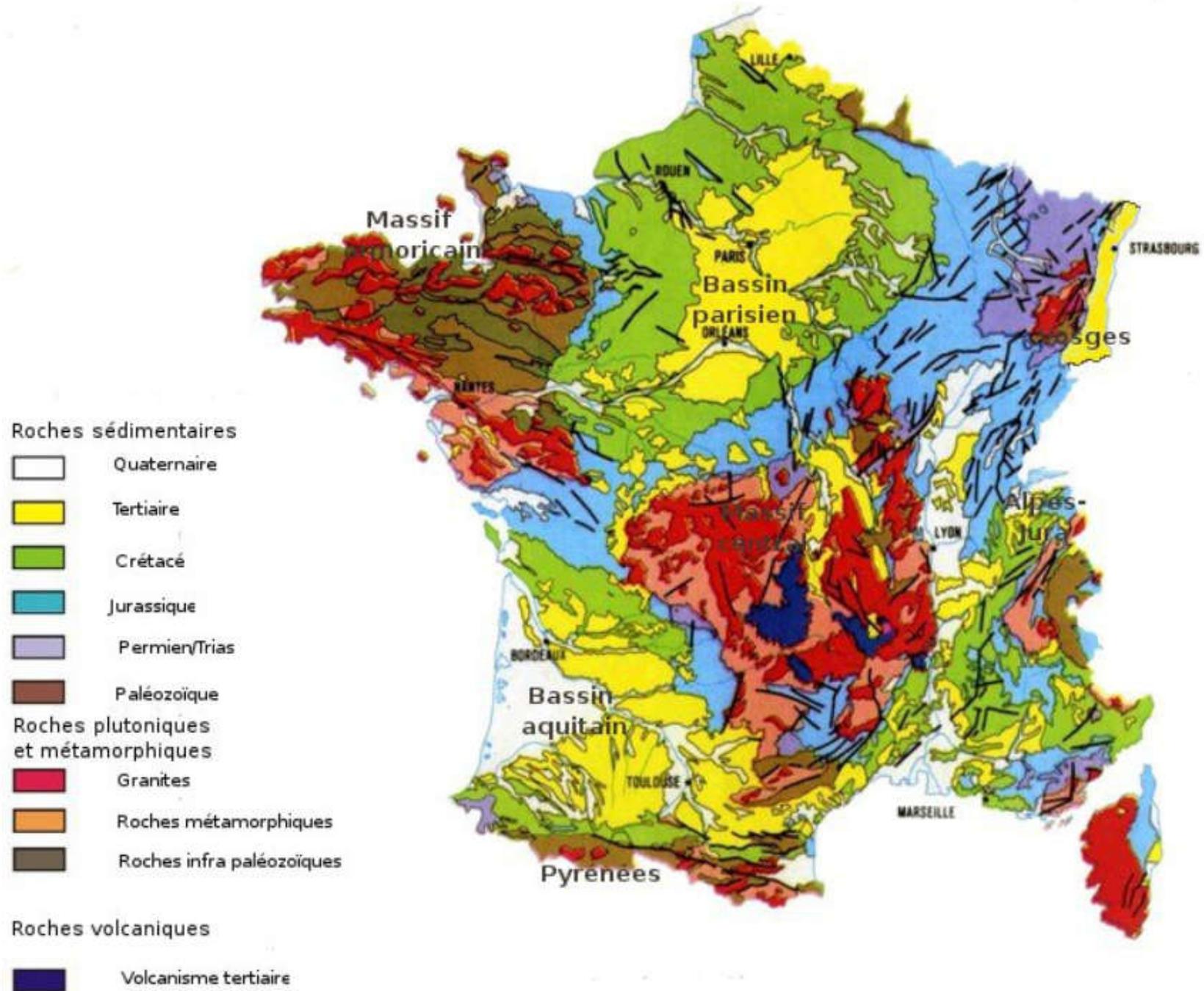


Source de débordement
Exemple : une falaise du plateau jurassien



Source de trop-plein
Exemple : le pourtour du bassin de Paris

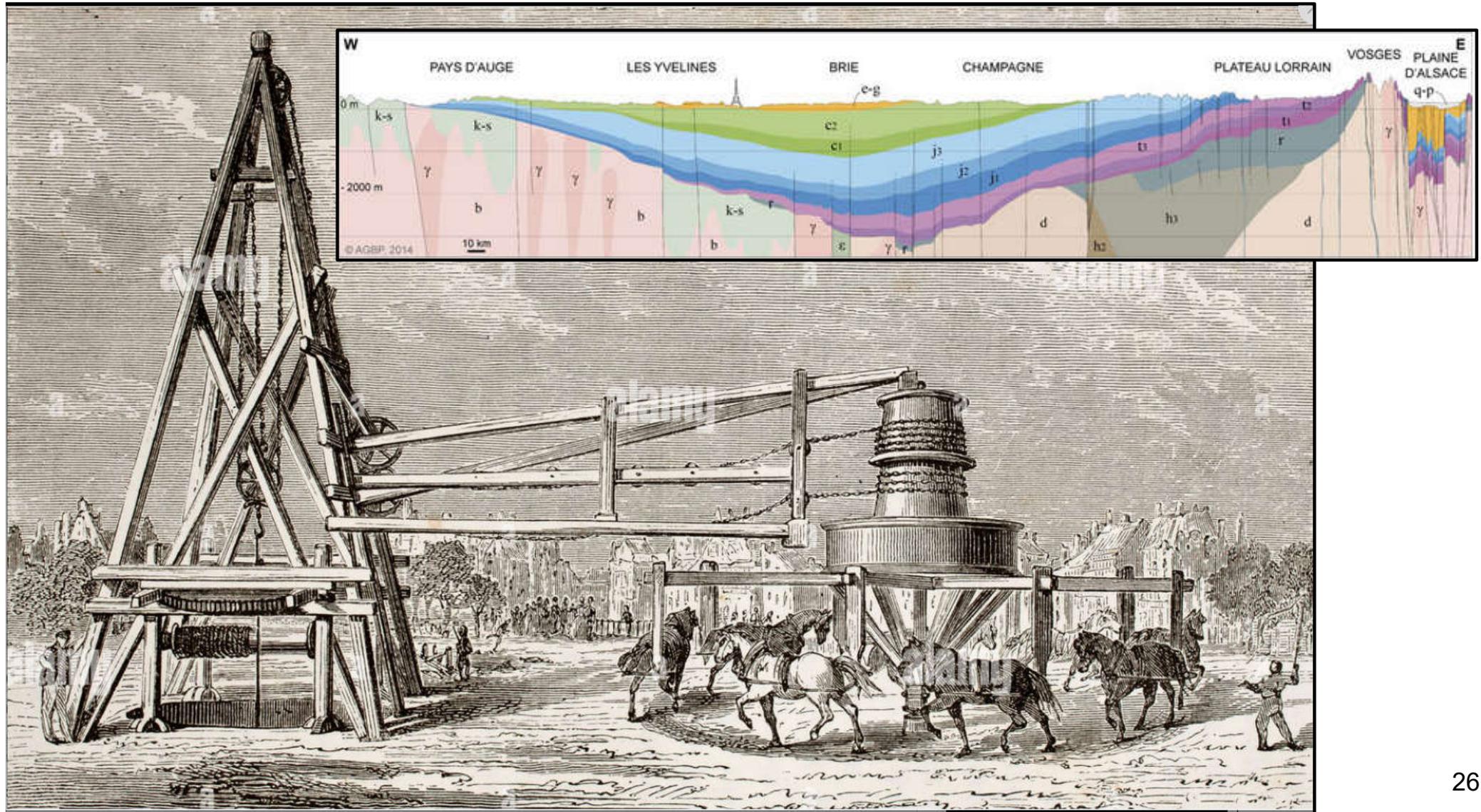
Carte géologique (simplifiée) de la France



Le puits artésien de Grenelle (1841 - 506 m/sol)

PARIS
ÉDITIONS DU MUSÉUM
36, rue Geoffroy-Saint-Hilaire (V^e)
1939

LE PROJET D'ARAGO. — Arago, alors maire de PARIS, jouissait d'un grand prestige. Dans une étude géologique audacieuse, il avait prévu le passage des Sables verts albiens sous PARIS, évalué leur profondeur et par suite la hauteur du forage. Bien que la stratigraphie et la tectonique du bassin de Paris fussent embryonnaires à cette époque, il ne se trompa que de quelques mètres, résultat qui, malgré nos connaissances actuelles, nous remplit encore d'admiration et d'étonnement.



Foration du 24/12/1833 au 26/02/1841 Profondeur atteinte : 506 m/sol
 Débit 4000 m³ en 24 h, soit 166 m³/h (≈ 50 L/s) Cote artésienne : 126 m
 Température 27,4°C => gradient géothermique 3,01°C / 100 m
 Sables Verts de l'Albien (dernier étage du Crétacé inférieur, -113 à -100 Ma)

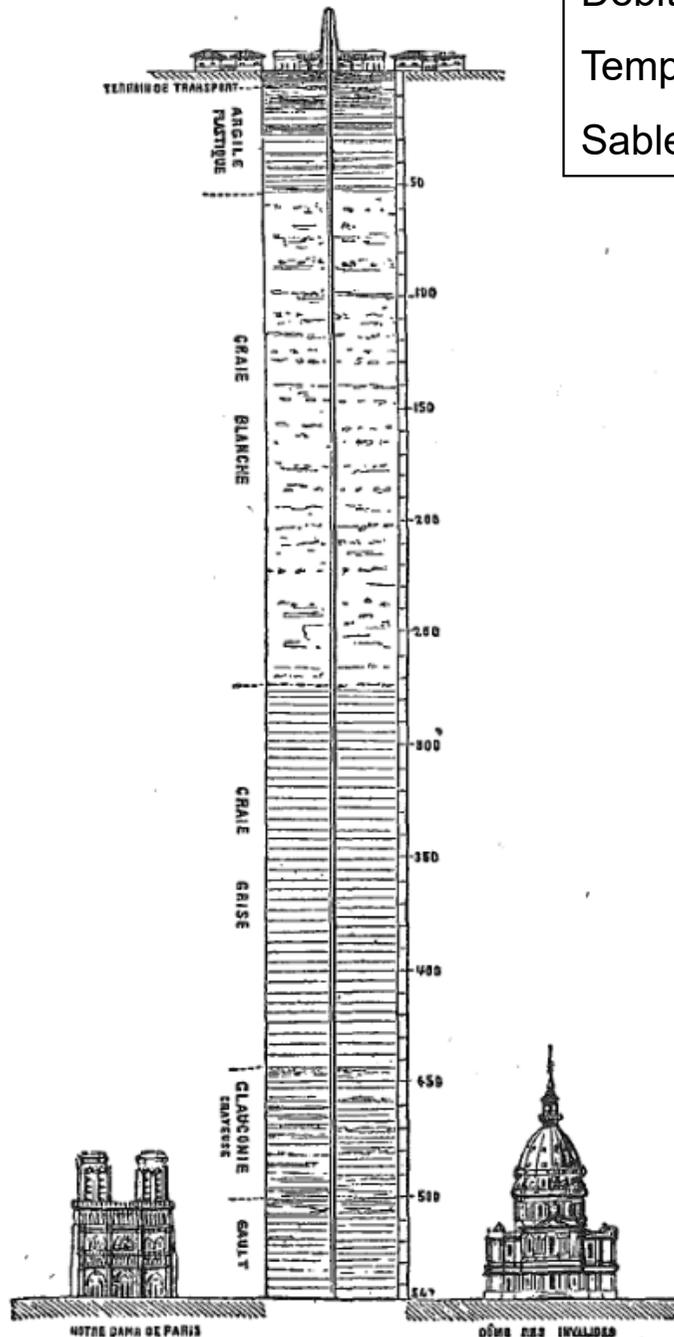


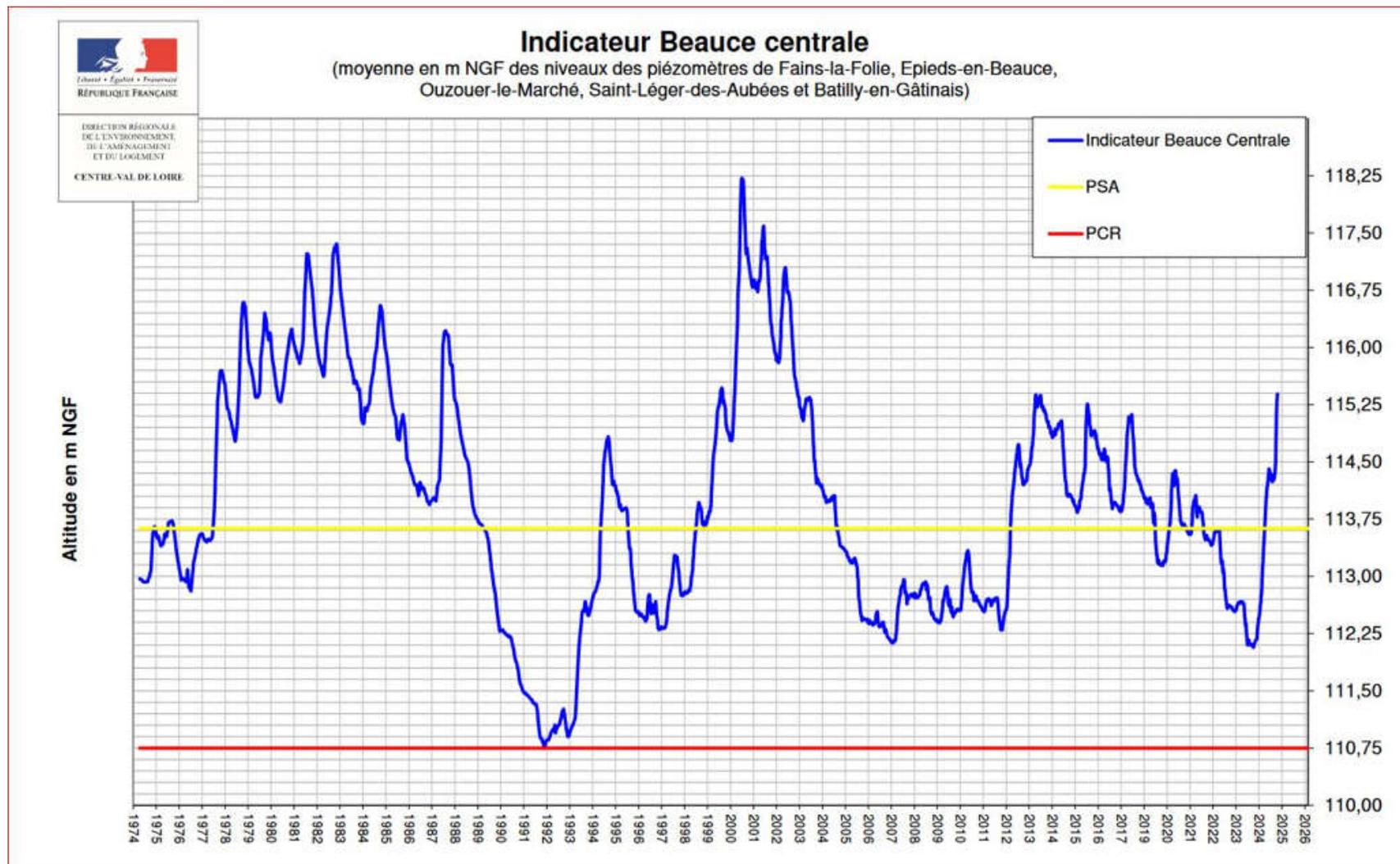
Fig. 42. — Coupe géologique du puits de Grenelle (d'après Daubrée, 1888).



Gestion volumétrique de la nappe de Beauce

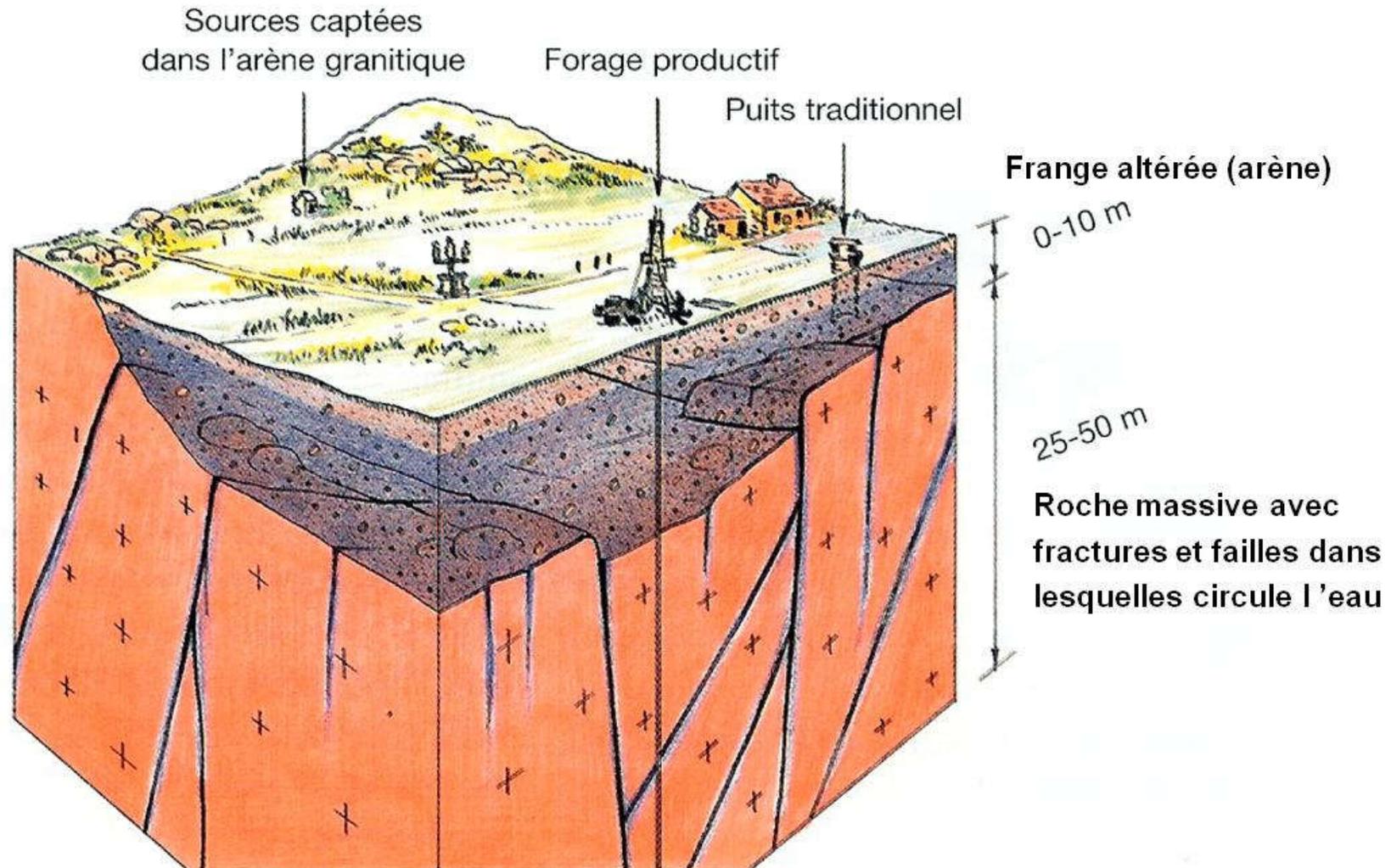
Les pompages en nappe pour l'irrigation de la Beauce (6 départements) font l'objet d'une gestion volumétrique depuis 1999. Chaque année :

- **À la sortie de l'hiver, un volume maximal est attribué à chaque irrigant en fonction du niveau de la nappe**
- En cours de campagne d'irrigation, des restrictions complémentaires peuvent être prises au regard des débits des cours d'eau exutoires de la nappe : **interdiction d'irrigation de 24h ou 48h par semaine.**

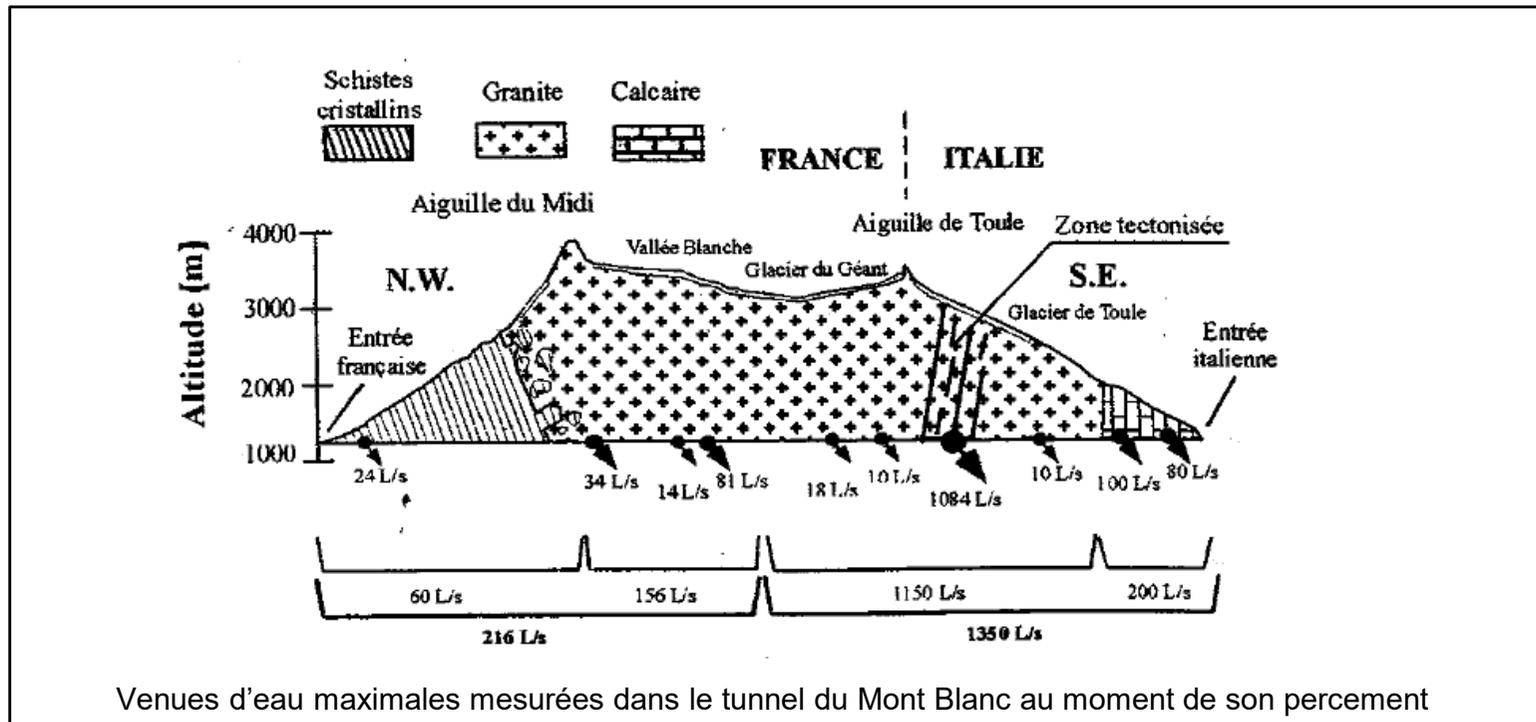
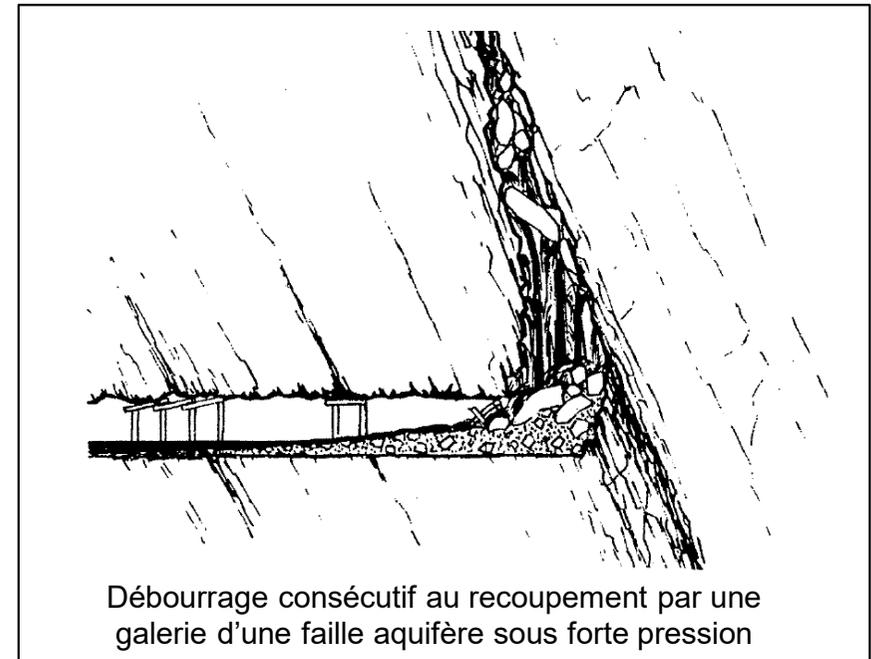
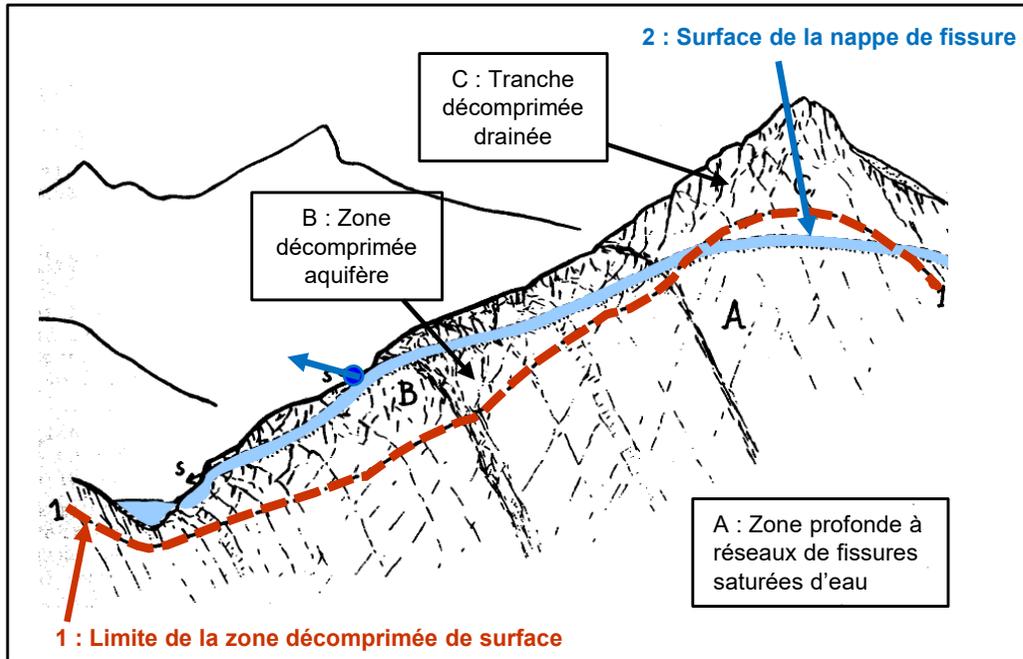


Aquifères (discontinus) fissurés

La roche elle-même est très peu perméable
=> l'eau est contenue dans les fractures



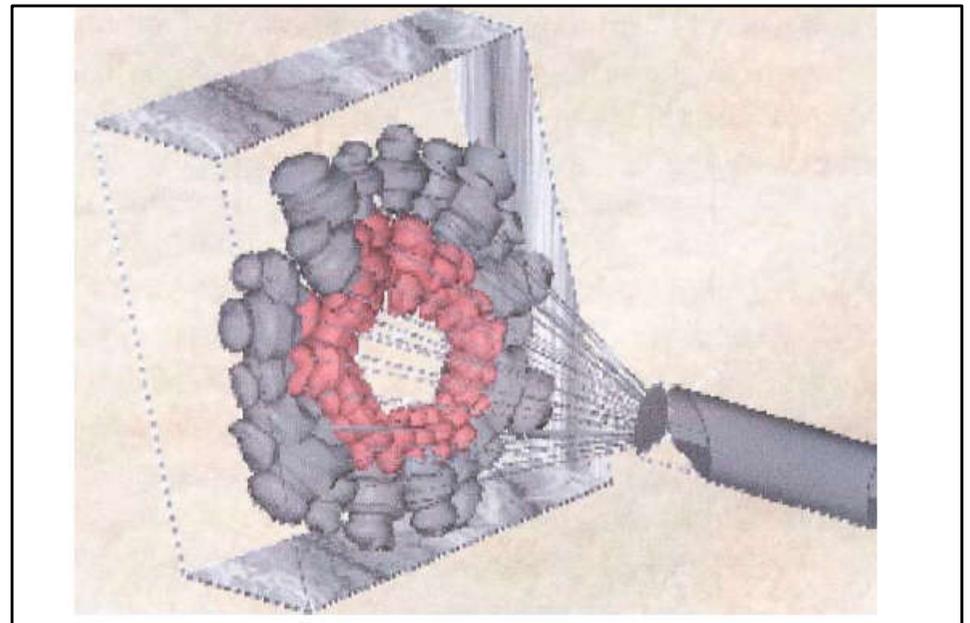
Risques liés au percement des tunnels dans un massif montagneux



Techniques de percement et de reconnaissance à l'avancement



Creusement traditionnel au wagon-drill avec emploi d'explosif

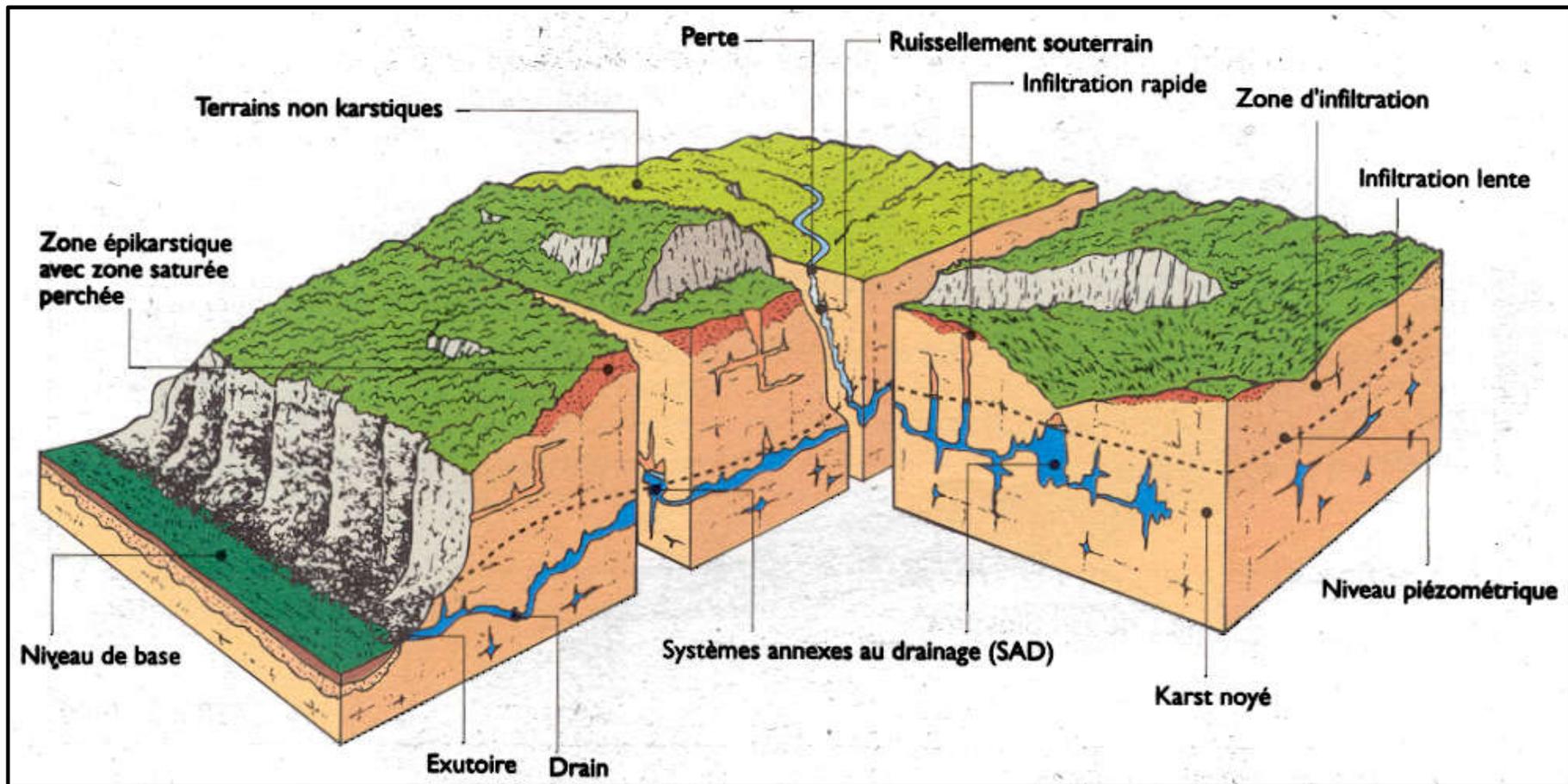


Disposition des sondages d'injection selon deux cônes coaxiaux



Tunneliers utilisés pour le percement de tunnels de grand diamètre dans des formations consolidées peu fracturées

Aquifères (discontinus) karstiques

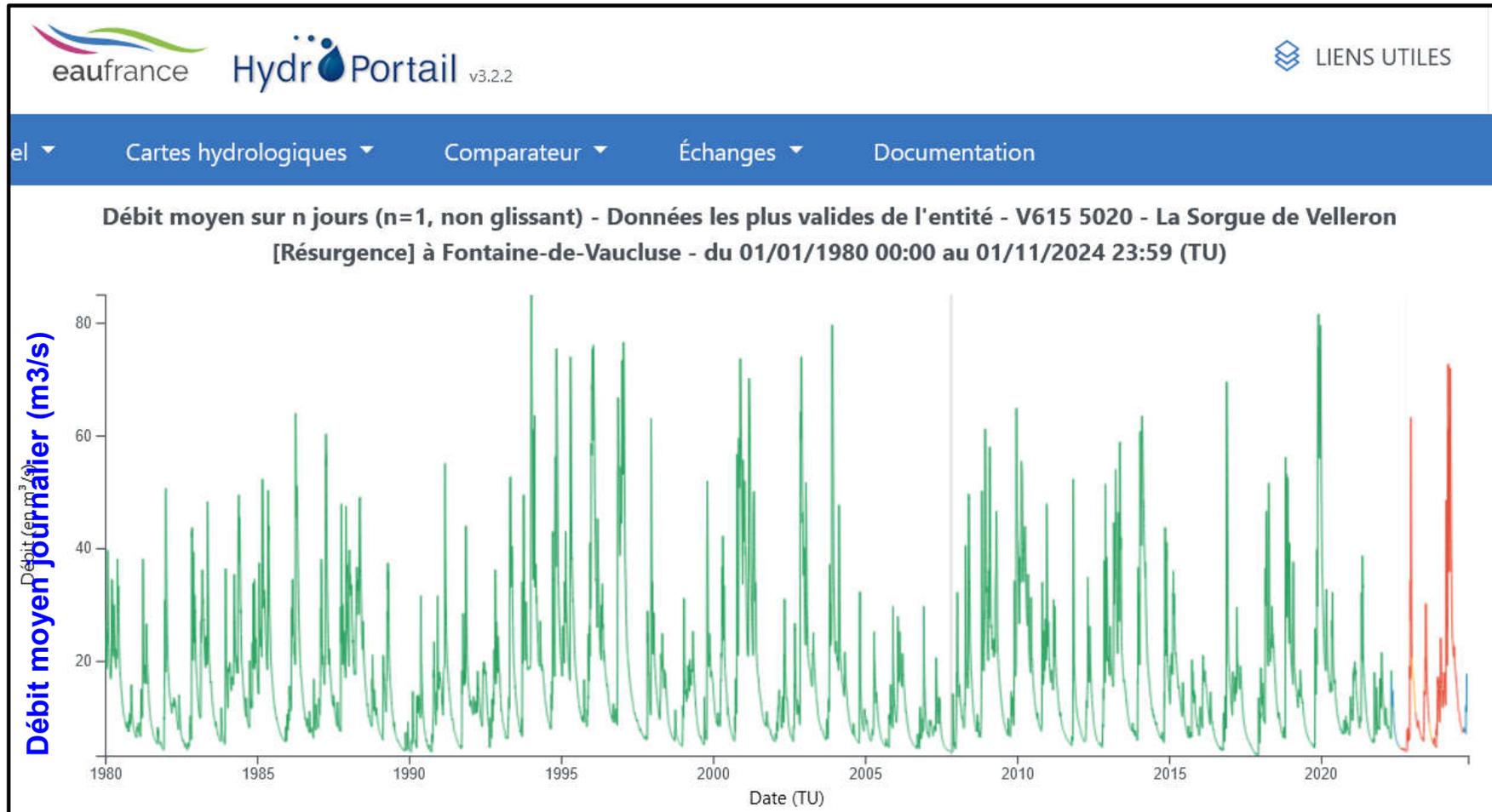


Processus de karstification

Érosion physico-chimique par dissolution des calcaires sous l'action combinée de la pluie et du CO₂ produit par les sols.
=> Modification profonde du massif calcaire et de ses propriétés aquifères.

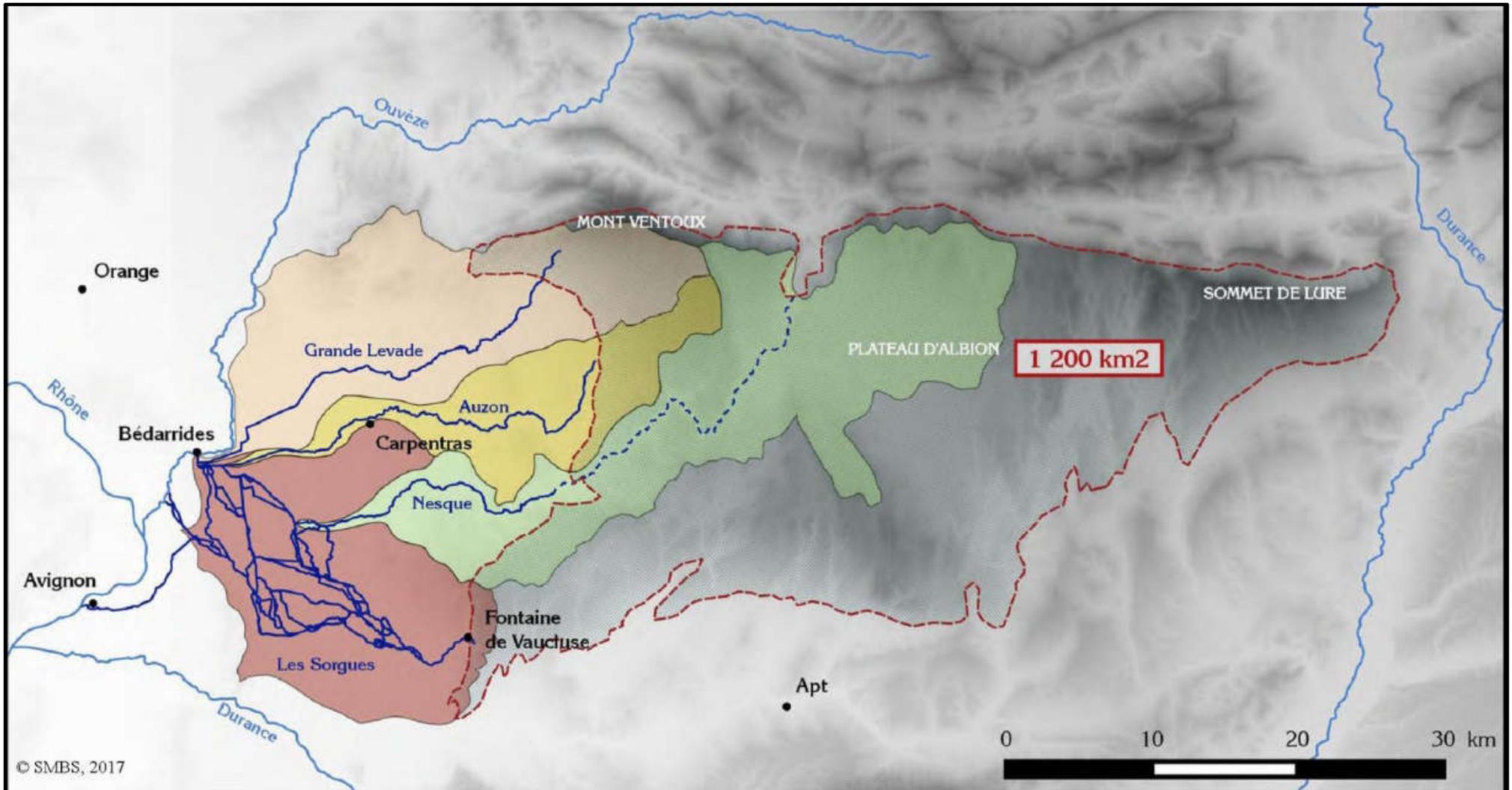
- Ouvertures des fissures préexistantes, formation de chenaux, rivières, vasques, concrétions, etc.
- Concentration des écoulements vers un nombre limité d'exutoires à fort débit
- Importantes variations saisonnières des débits
- Aquifères parfois pénétrables par l'homme
- Dissociation des fonctions transmissives et capacitives

Aquifère (discontinu) karstique alimentant la Fontaine de Vaucluse



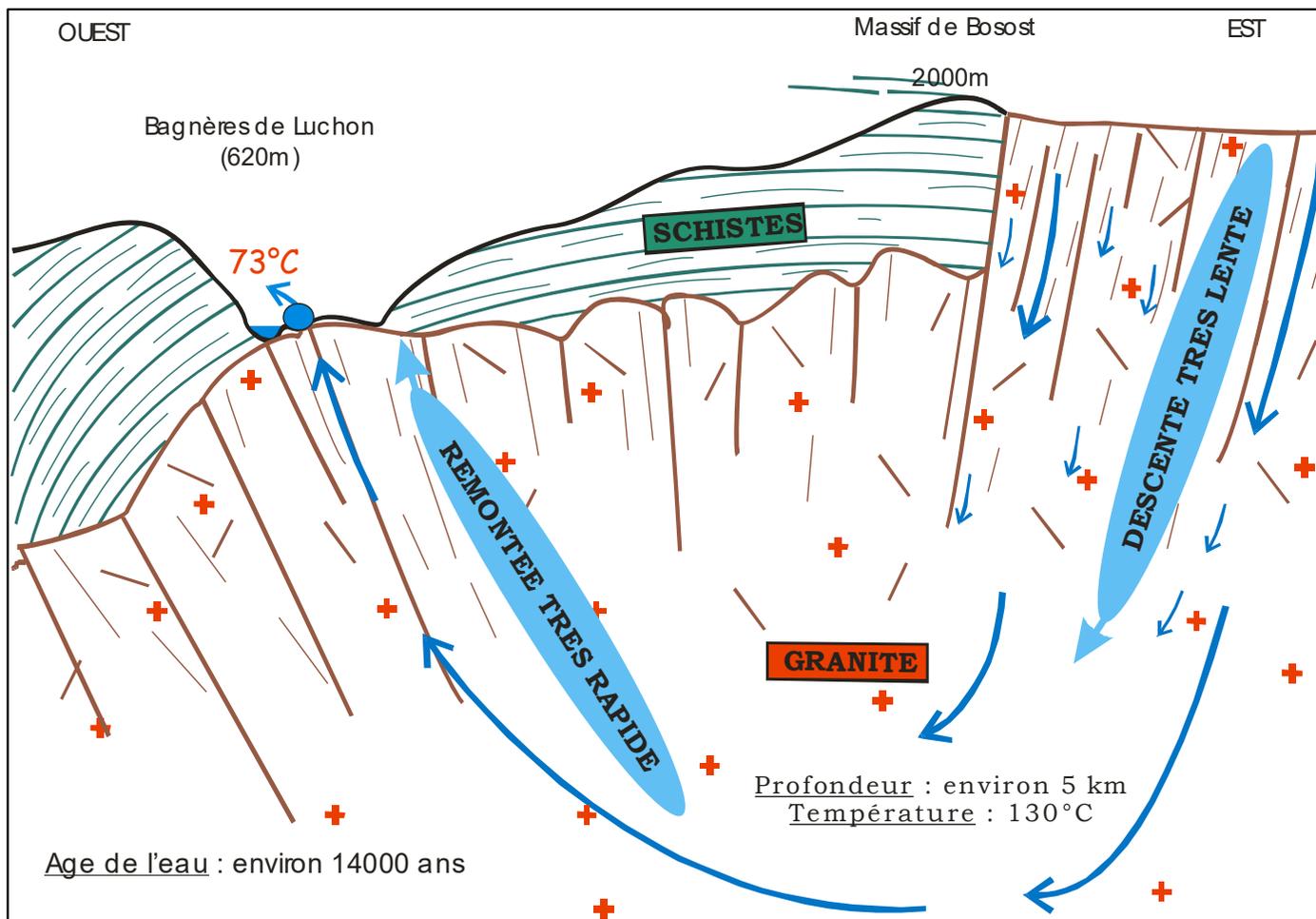
Impluvium de la Fontaine de Vaucluse

L'impluvium de la Fontaine de Vaucluse – déterminé à partir de nombreux traçages - est déconnecté de la surface topographique : il couvre partiellement les Bassins Versants de la Grande levade, de l'Auzon, de la Nesque, des Sorgues, et s'étend jusqu'à la montagne de Lure.

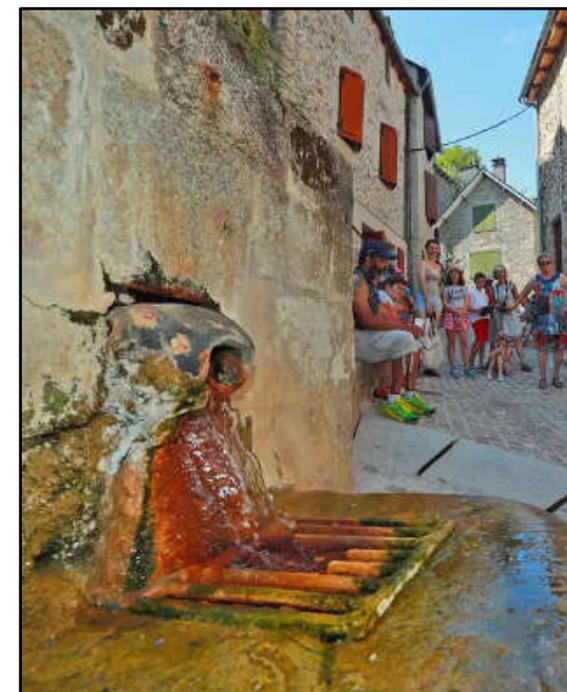


Impluvium de la Fontaine de Vaucluse (Syndicat Mixte du Bassin des Sorgues)

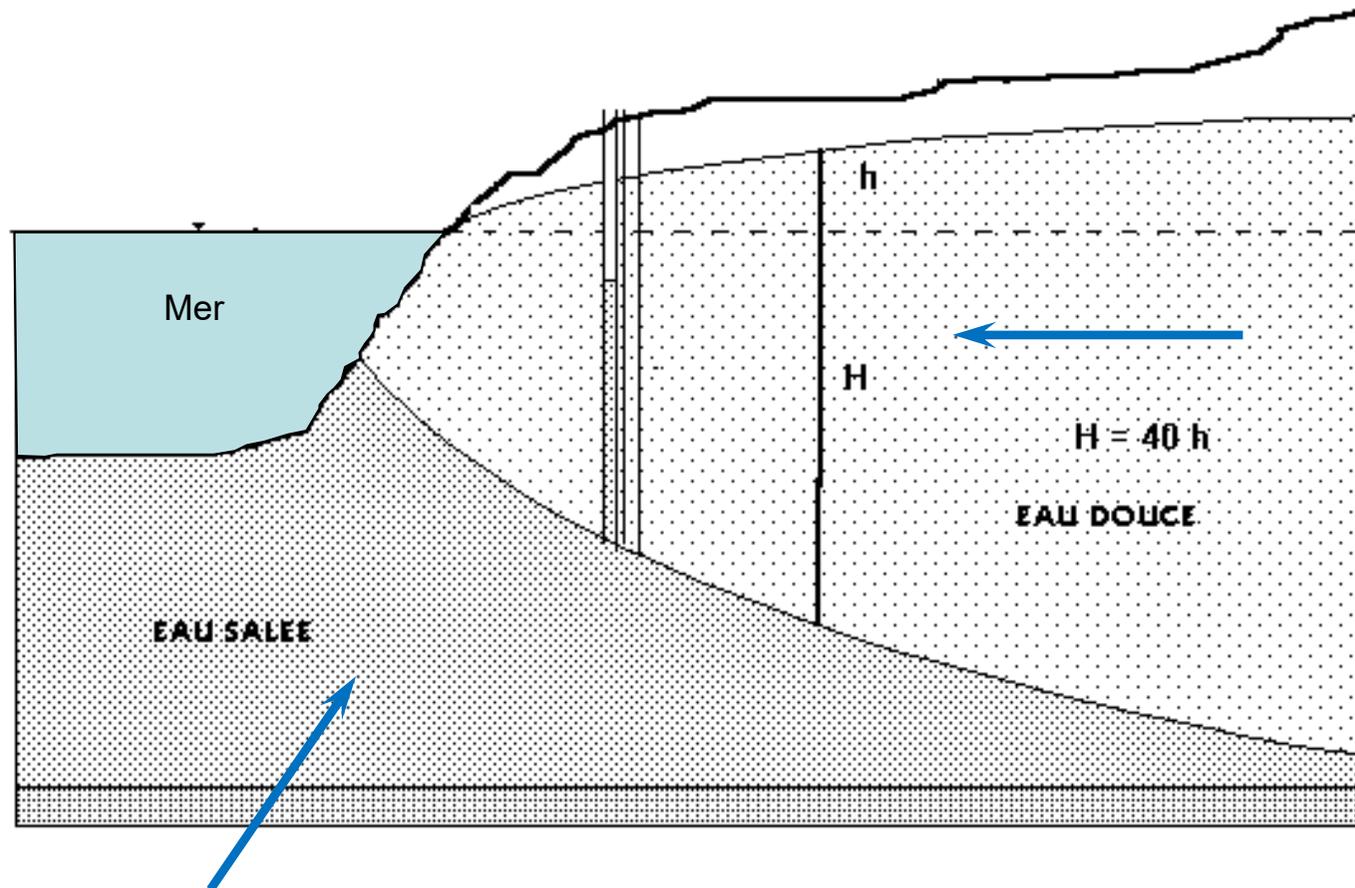
Eaux thermo-minérale - Schéma conceptuel de circulation



La source du Par à
Chaudes-Aigues (Cantal),
la plus chaude d'Europe
(82°C)



Interface eau douce / eau salée le long du littoral



Existence d'un biseau salé s'insérant
sous la nappe d'eau douce

Équation de Ghyben-Herzberg
 $H = \frac{r_w}{(r_s - r_w)} h$

Principaux atouts des eaux souterraines comme ressource en eau

- Immense réservoir souterrain permettant le **stockage des eaux de pluie, sans évaporation**
- Dans la majeure partie du temps, **le réseau hydrographique est alimenté par le débordement des eaux souterraines**
- Milieu souterrain assimilable à une **gigantesque canalisation** acheminant les eaux vers des **exutoires ponctuels** (sources, puits, forages) **ou diffus** (cours d'eau, lacs, mers), après des parcours hectométriques ou kilométriques, pouvant atteindre des centaines de kilomètres de longueur et de largeur
- **Filtration de l'eau** :
 - milieu poreux : filtration efficace => disparition des bactéries
 - milieu fissuré/karstique : filtration limitée => bactéries et matières en suspension migrent dans le sous-sol lors de forts épisodes pluvieux
- **Transit lent en milieu poreux** => disparition de la majorité des virus
- **Transit rapide en milieu fissuré/karstique** => migration des virus
- **Forte inertie du milieu souterrain**, permettant de lisser la variabilité des apports pluviométriques et des prélèvements par pompage. Plus le réservoir souterrain est étendu, plus son inertie est importante.
=> **Possibilité d'exploiter les eaux de pluie de façon différée**, quelques mois ou années, voire dizaines, centaines ou milliers d'années après les périodes pluvieuses.

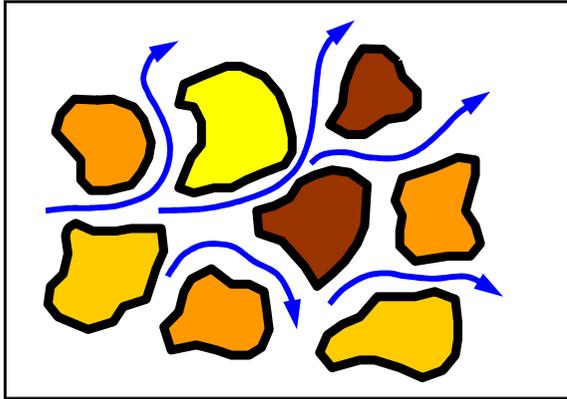
Hydrogéologie

Domaine de la géologie couvrant les processus de **circulation de l'eau dans le sol et le sous-sol**, la recherche des eaux souterraines, ainsi que leur captage, leur exploitation et leur protection.

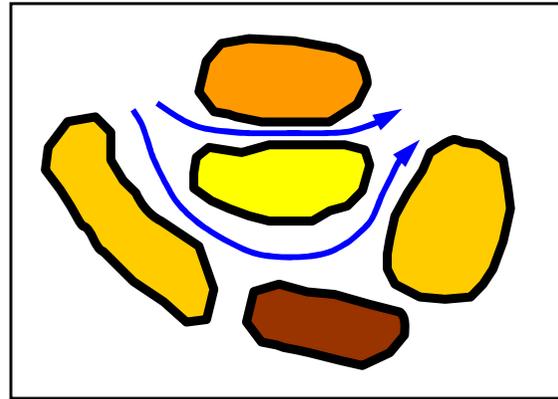
1. Mécanismes hydrauliques
2. Mécanismes géologiques
3. L'eau dans le milieu souterrain
- 4. Les écoulements souterrains, transporteurs potentiels de pollution**
5. Protéger les eaux souterraines

Dispersion cinématique et diffusion moléculaire

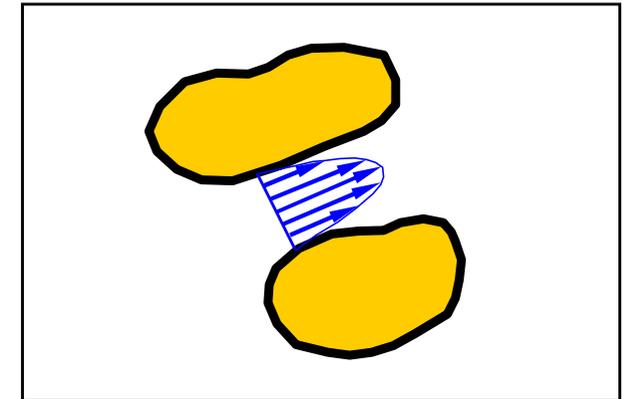
Dispersion cinématique dans les milieux poreux



Multiples bifurcations
⇒ étalement

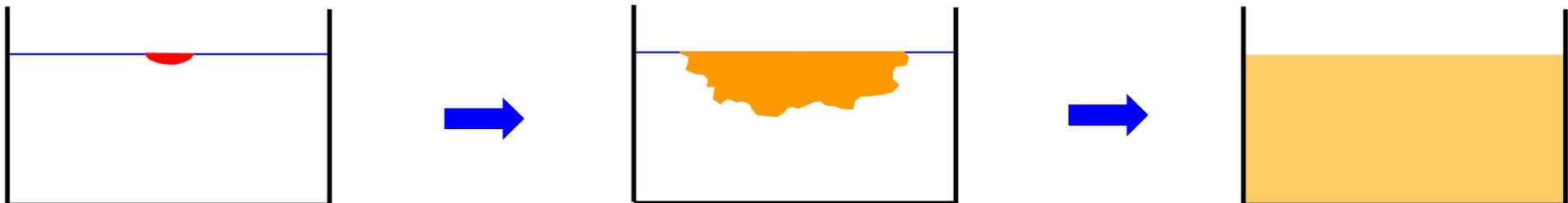


Variabilité de la taille des pores
et des longueurs de trajet
⇒ Vitesses et distances
parcourues inégales



Variabilité des vitesses
dans les pores

Diffusion moléculaire



Étalement du soluté et uniformisation des concentrations sous l'effet du mouvement brownien, y compris dans un fluide immobile

▶ Convection

Entraînement à la vitesse moyenne de la nappe => migration de la pollution.

▶ Dispersion

Étalement du panache sous l'effet de la dispersion cinématique (accentuée par l'hétérogénéité du milieu) et de la diffusion moléculaire => extension de la zone polluée, diminution des concentrations (conservation de la masse).

▶ Échanges avec l'eau immobile, l'eau liée et la phase solide

Retard à l'avancement, allongement de la durée de pollution, atténuation des concentrations.

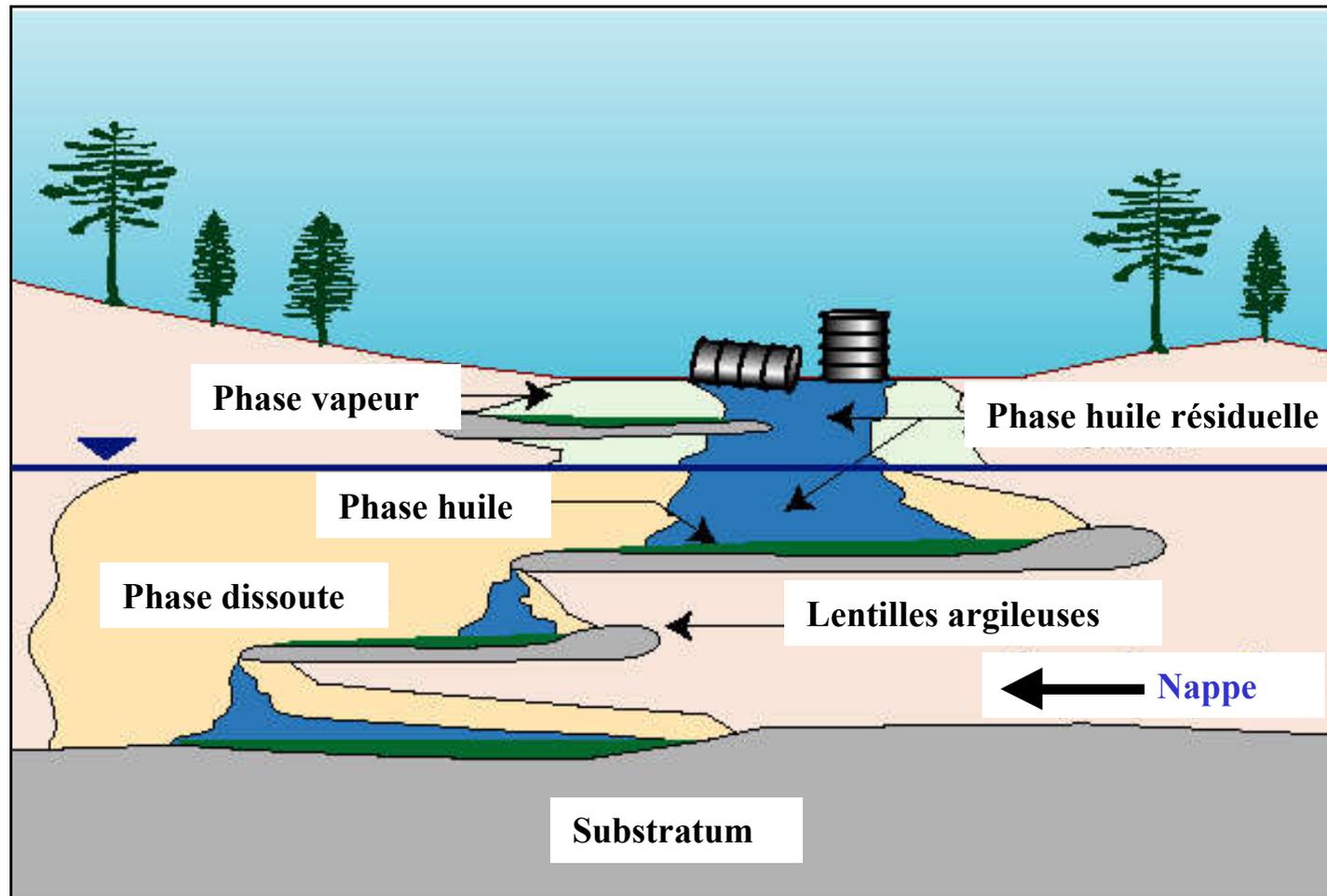
▶ Dégradation et biodégradation

Réactions chimiques influencées par le contexte physico-chimique et bactériologique. Modification possible de la composition des solutés, voire de la matrice rocheuse. Réduction ou augmentation des concentrations.

Solvant lourd, non miscible (DNAPL)

DNAPL

Dense
Non Aqueous Phase
Liquid



Exemple du trichloro-éthylène - TCE

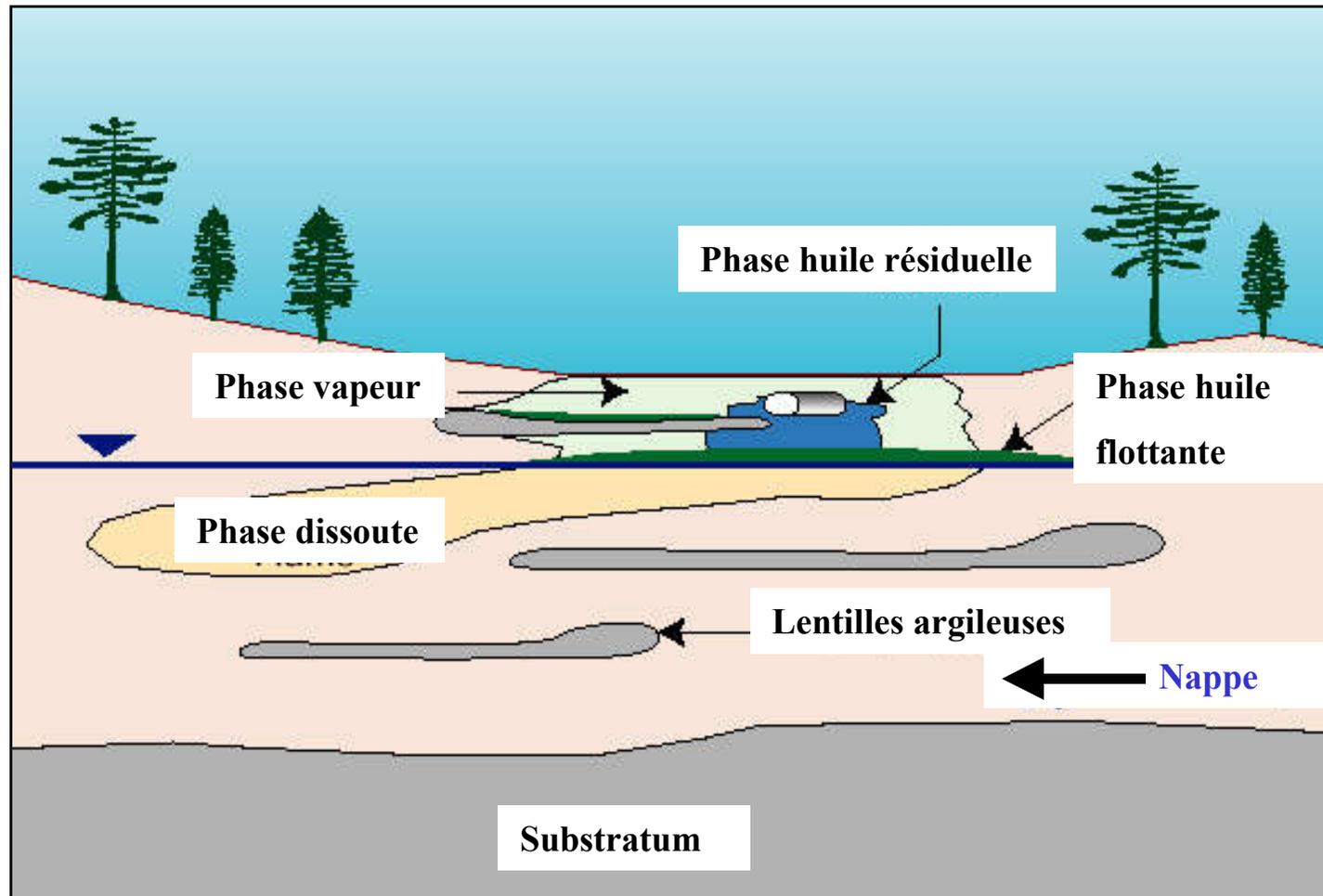
Densité = 1.456 g/cm^3 => ça coule
Solubilité = 1100 mg/L >> limite de potabilité ($1 \text{ } \mu\text{g/L}$)

Pression de vapeur = 58.7 mm Hg => se volatilise
Log Kow = $2.3 - 2.4$ => ça s'adsorbe (un peu)

Solvant léger, non miscible (LNAPL)

LNAPL

Light
Non Aqueous Phase
Liquid



Exemple du benzène

Densité = 0.879 g/cm^3 => ça flotte

Solubilité = 1780 mg/L >> limite de potabilité ($0.2 \text{ } \mu\text{g/L}$)

Pression de vapeur = 60 mm Hg => se volatilise

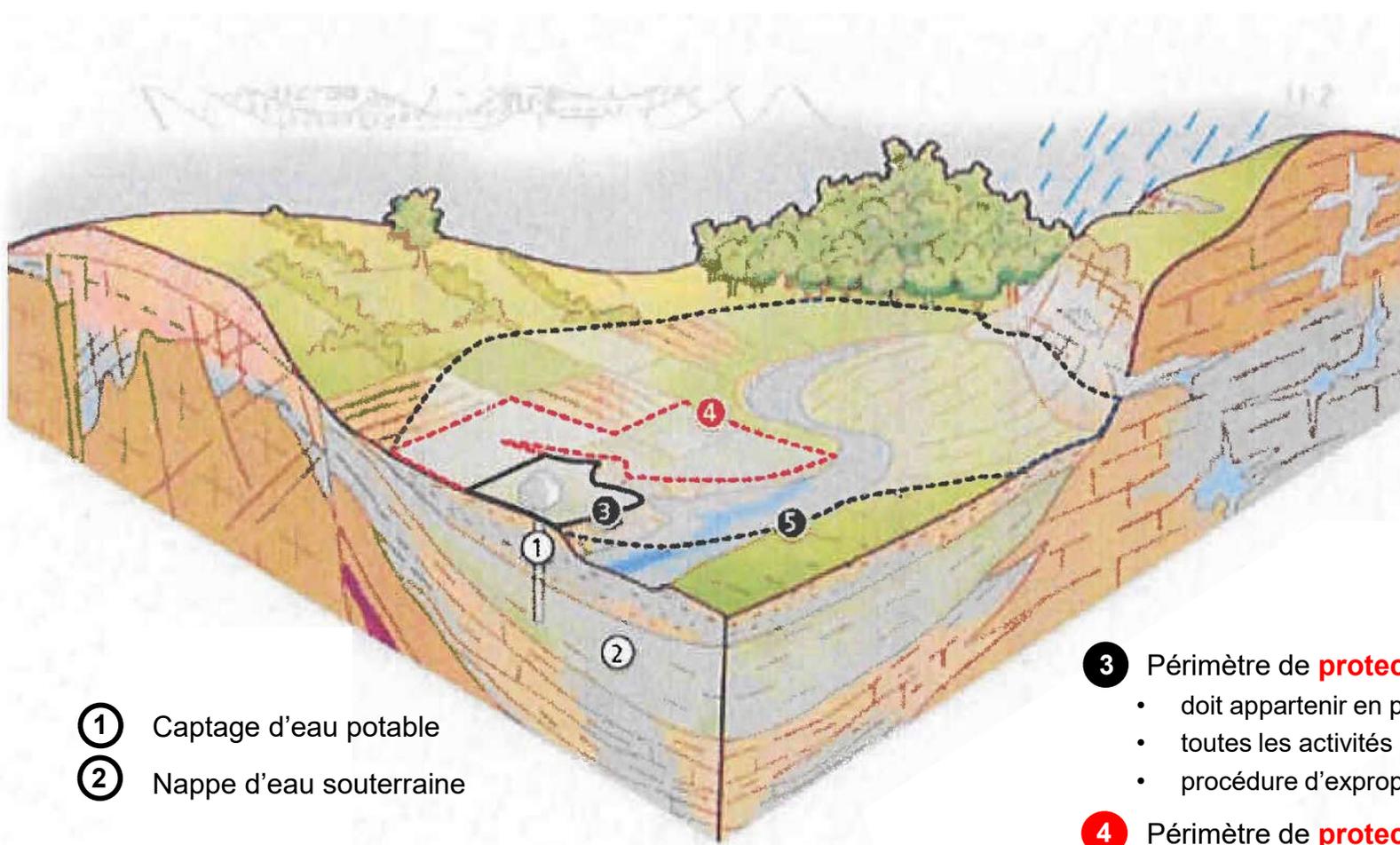
Log Kow = $1.95 - 2.13$ => ça s'adsorbe (un peu)

Transport hydrodispersif du milieu souterrain

- **Le milieu souterrain est vulnérable aux infiltrations de polluants**
- **Les écoulements souterrains peuvent transporter des pollutions sur de grandes distances, vers des exutoires ponctuels ou diffus**
- **En migrant, le panache de pollution s'étire et s'élargit :**
 - **surface polluée de plus en plus étendue, et durée de pollution des exutoires augmentant en conséquence**
 - l'accroissement du volume d'eau polluée s'accompagne d'une diminution des concentrations
 - une pollution peut se dégrader au cours de son parcours souterrain (réactions chimiques et/ou interactions avec le milieu géologique) ou se fixer partiellement au milieu souterrain, avec des **risques de relargage progressif et durable des contaminants**

Exemple : Déversement accidentel de tétrachlorure de carbone à Benfeld (Alsace) en 1970, provoquant 22 ans plus tard une contamination des puits de captage AEP d'Erstein, 6 km en aval => vit. = 0.75 m/j

Trois périmètres de protection autour des captages d'eau potable



- ① Captage d'eau potable
- ② Nappe d'eau souterraine

- ③ Périmètre de **protection immédiate**
 - doit appartenir en pleine propriété à la collectivité
 - toutes les activités sont interdites
 - procédure d'expropriation possible par la DUP
- ④ Périmètre de **protection rapprochée**
 - possibilité d'interdiction ou de réglementation d'activités
 - servitudes de droit public sans aucune déposition
 - indemnités possibles dans certains cas
- ⑤ Périmètre de **protection éloignée** (facultatif)
 - réglementations particulières (pas d'interdiction)
 - périmètres et servitudes intégrés au POS
 - servitudes sur terrains privés : inscrites à la conservation des hypothèques

Protéger les eaux souterraines

- **Favoriser l'infiltration des eaux pluviales**
 - Limiter les zones imperméabilisées
=> opter pour parkings et trottoirs drainants
 - Privilégier l'infiltration des eaux de toiture, de fossés, etc.
- **Ne pas polluer les eaux**
 - Prévenir les infiltrations de produits chimiques
 - Consommer bio pour réduire l'épandage des pesticides, herbicides, fongicides, etc.
 - Jardiner sans intrants chimiques
etc.

