



*Piezomètre dans le glissement de Super-Sauze, Haute-Provence*



**Licence 2 Sciences de la Terre et de l'Eau – S3**



*Sources d'Ichetucknee, Floride*



*Forage artésien, Indonésie*

Site expérimental de Kerrien,  
Bretagne



# HYDROGEOLOGIE GENERALE

## HAT303T

---

**Séverin Pistre**

D'après le cours de V. De Montety

[Severin.pistre@umontpellier.fr](mailto:Severin.pistre@umontpellier.fr)

Campus Pharmacie - bâtiment Hydropolis

**2024**

## Habilitation 5 ECTS: 45h

- 13h de cours :
  - 8 séances x 1h30
  - 1 séance x 1h
- 14 h de TD :
  - 8 TD x 1h30
  - 1 TD x 2h
- 12 h de TP: Lundi (A), Mercredi (B)
  - 3 TP 'colonne' (9h)
  - 1 TP carte (3h)
- 1 sortie terrain en groupes (17 ou 24/11)

## Evaluation:

Contrôle Continu: (groupes)

- Compte Rendu Expérimentation (1/2)
- Compte Rendu Terrain (1/2)

} 50%

Contrôle final (questions/exercices)

} 50%

## Matériel:

- Calculatrice
- Crayons de couleurs
- Règles

## I. Structure et propriétés des aquifères

CM1. L'eau souterraine dans le cycle de l'eau – Intérêt de l'hydrogéologie

*De l'eau sous mes pieds: sous quelle forme?*

CM2-3. Caractéristiques du réservoir aquifère

*Est-ce qu'il y a de l'eau dans cette roche?*

CM4. Principes des écoulements souterrains

*Comment l'eau fait pour couler dans cette roche?*

## II. Etude du fonctionnement des aquifères

CM5. Cartographie hydrogéologique

*Où est l'aquifère et où vais-je implanter un forage?*

CM6. Forage et essai par pompage

*Comment fait-on un forage? Est-ce que mon forage est bien fait? Combien peut-on espérer pomper?*

CM7. Caractérisation hydrochimique de l'eau de l'aquifères

*Et l'eau de cet aquifère, avec quelle roche a-t-elle été en contact?*

CM8. Protection des eaux souterraines

*Comment faire pour ne pas en manquer et qu'elle reste bonne ?*

# Plan

## CM-1 L'eau souterraine dans le cycle de l'eau – Intérêt de l'hydrogéologie

### 1. L'eau sur terre et l'utilisation des ressources

- 1.1. Importance relative des eaux souterraines sur le globe
- 1.2. L'eau souterraine : une composante du cycle de l'eau
- 1.3. Répartition et utilisation de l'eau souterraine

### 2. L'hydrogéologie: pourquoi, comment?

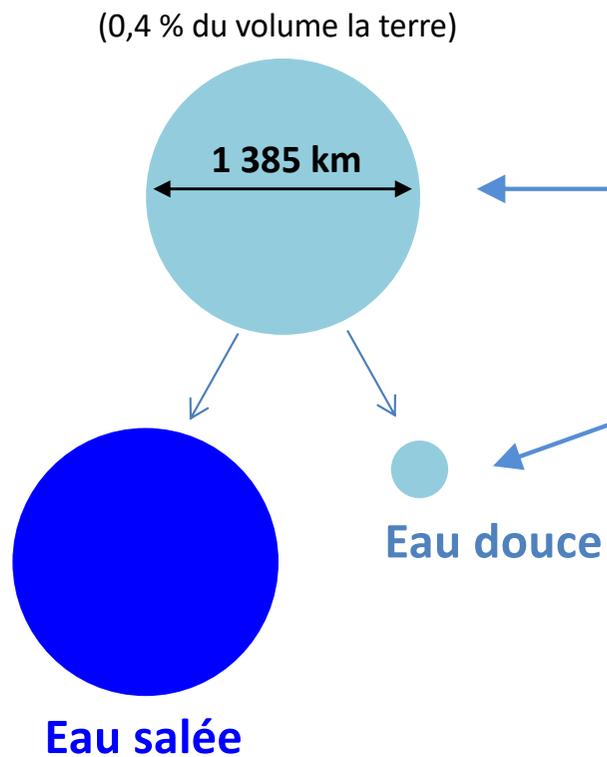
### 3. Aquifères et nappes d'eau souterraine

#### Objectifs:

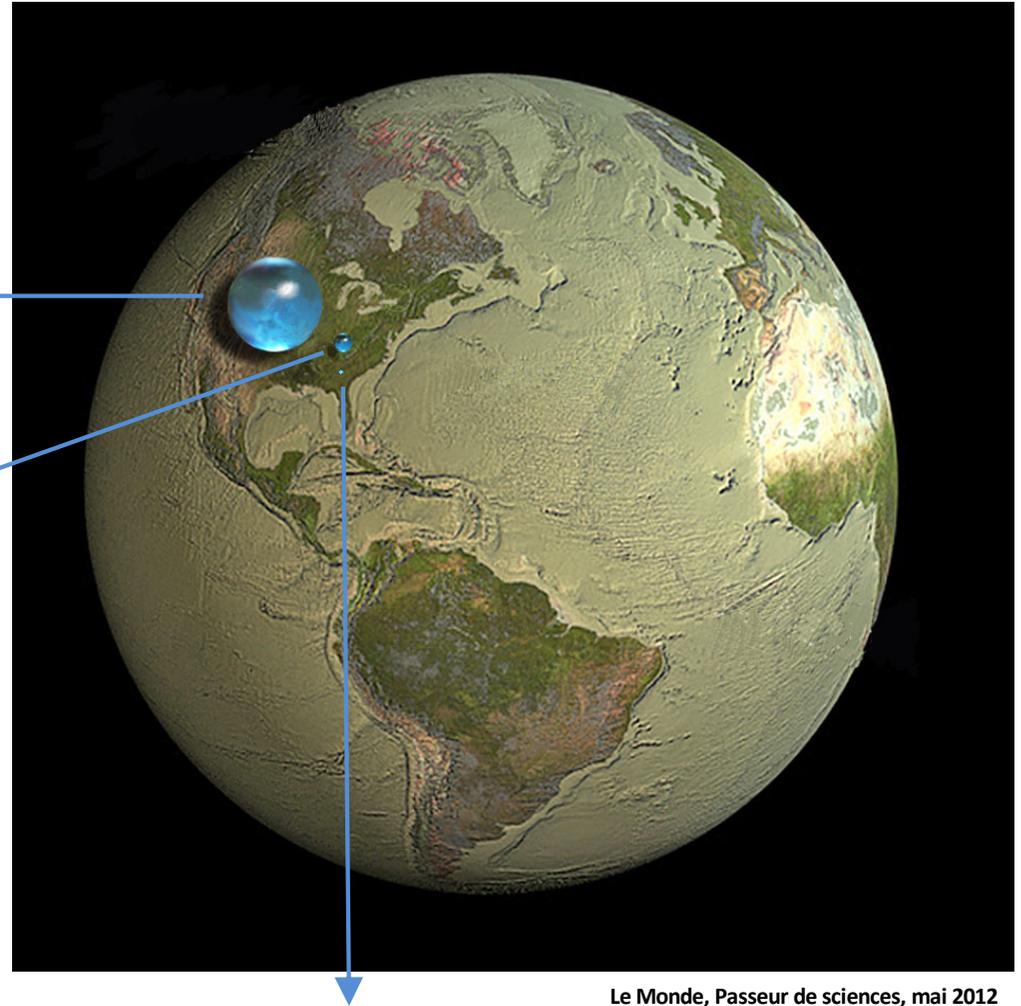
- Enumérer les grands réservoirs d'eau sur terre et donner leurs proportions relatives
- Expliquer la place des eaux souterraines dans le cycle de l'eau
- Représenter schématiquement et décrire un aquifère (zone d'alimentation, zone d'émergence, ZNS, ZS, surface piézométrique, substratum,...)
- Citer, représenter schématiquement et décrire les différents types de nappes d'eau souterraine
  
- Prendre conscience de l'importance des eaux souterraines pour l'homme et la fragilité de cette ressource (quantité + qualité)
- Enumérer quelques actions des hydrogéologues
- Prendre conscience du lien avec les autres disciplines abordées en L2 et L3

## 1. L'eau sur terre et l'utilisation des ressources

### □ Importance relative des eaux souterraines



☞ Principaux réservoirs?



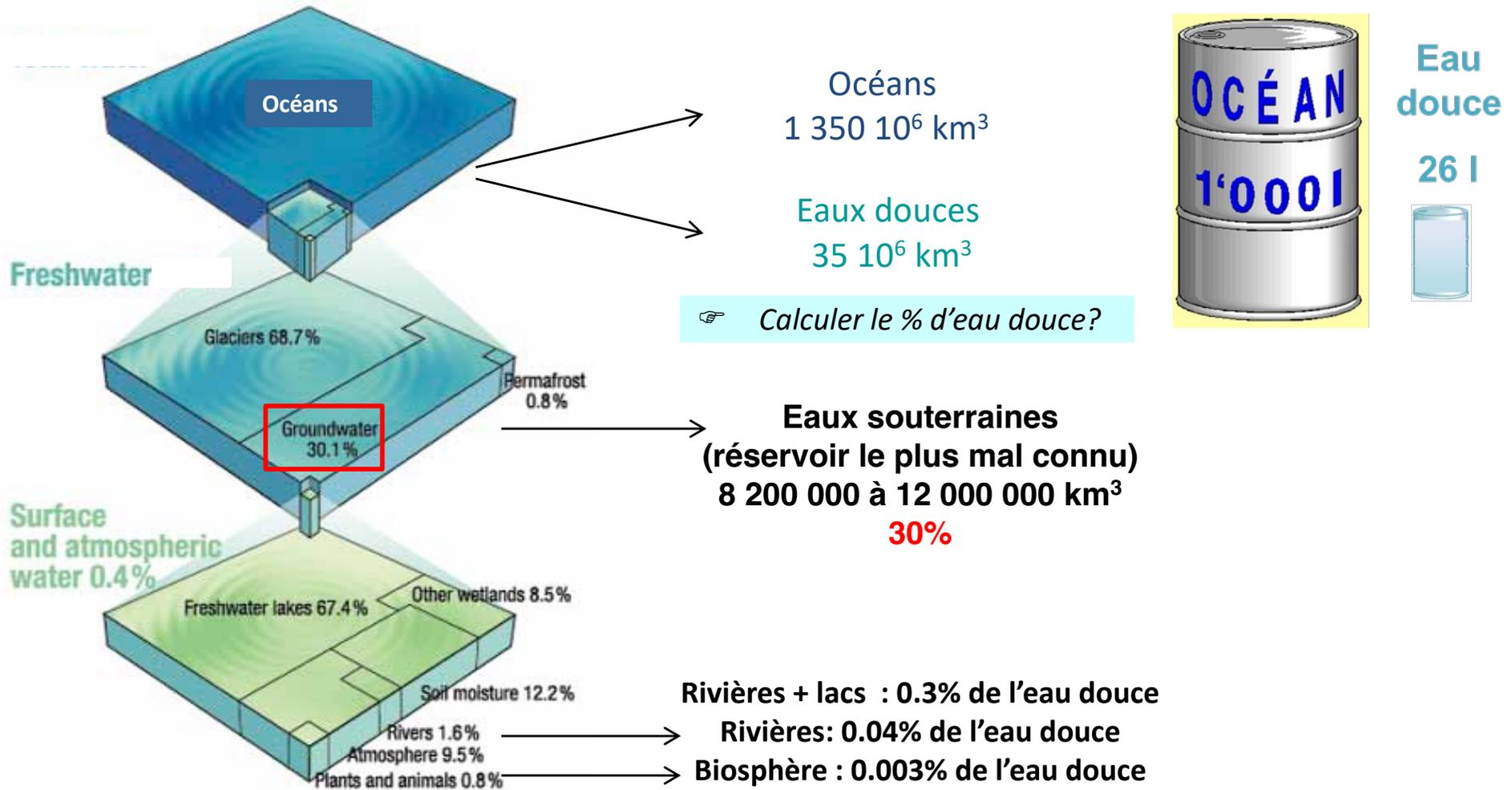
Le Monde, Passeur de sciences, mai 2012

Eau directement accessible à la consommation humaine  
= sphère de 60 km de diamètre

□ Stocks d'eau: les principaux réservoirs

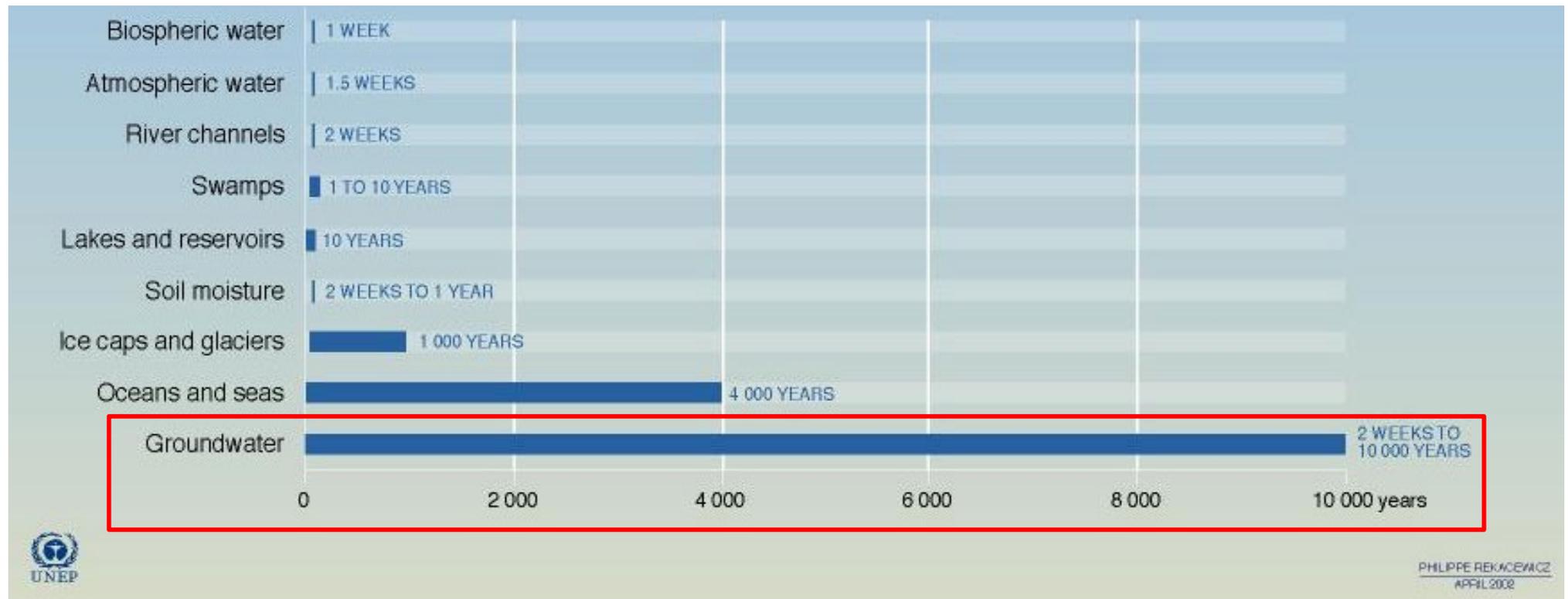
1 400 000 000 km<sup>3</sup>

≈ tranche de 3000 m d'eau sur le globe



□ Stocks d'eau: les principaux réservoirs

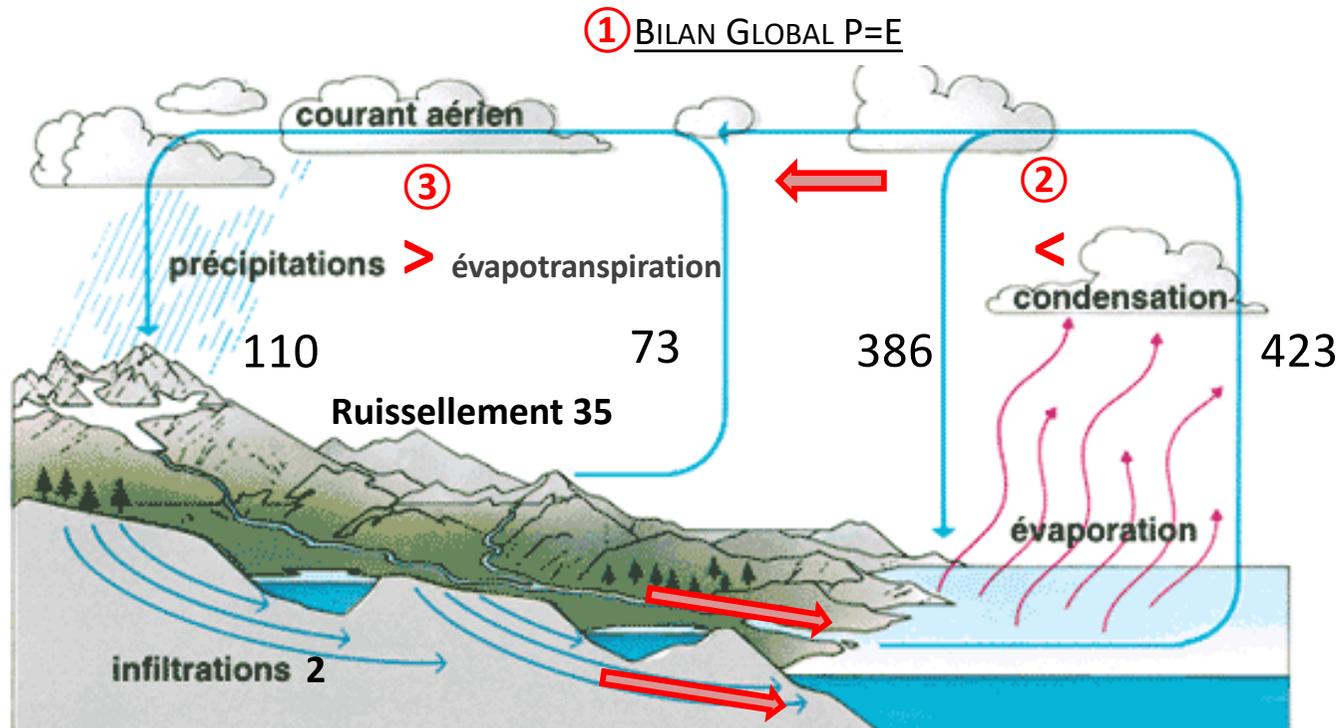
### Estimation des temps de résidence des ressources en eau à l'échelle du globe



Source: Igor A. Shiklomanov, State Hydrological Institute (SHI, St. Petersburg) and United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation (UNESCO, Paris), 1999; Max Planck, Institute for Meteorology, Hamburg, 1994; Freeze, Allen, John, Cherry, *Groundwater*, Prentice-Hall: Engle wood Cliffs NJ, 1979.

## □ Une composante du cycle de l'eau?

- Mise en évidence par le bilan en eau



Cycle de l'eau et flux d'eau en  $10^3 \text{ km}^3/\text{an}$

- ▶ ① Cycle global :  $496 \cdot 10^3 \text{ km}^3/\text{an}$
- ▶ ② Cycle océanique : P déficitaires  $\Rightarrow$  Transfert de vapeur vers les continents
- ▶ ③ Cycle continental : P excédentaires  $\Rightarrow$  Ecoulement vers la mer  $Q_S$  et  $Q_{GW}$

## □ Une composante du cycle de l'eau?

### ▪ Mise en évidence par le bilan en eau

a) Comment l'eau se répartit dans le cycle hydrologique global (en milliers de kilomètres cubes, marges d'incertitude en  $\pm\%$ )



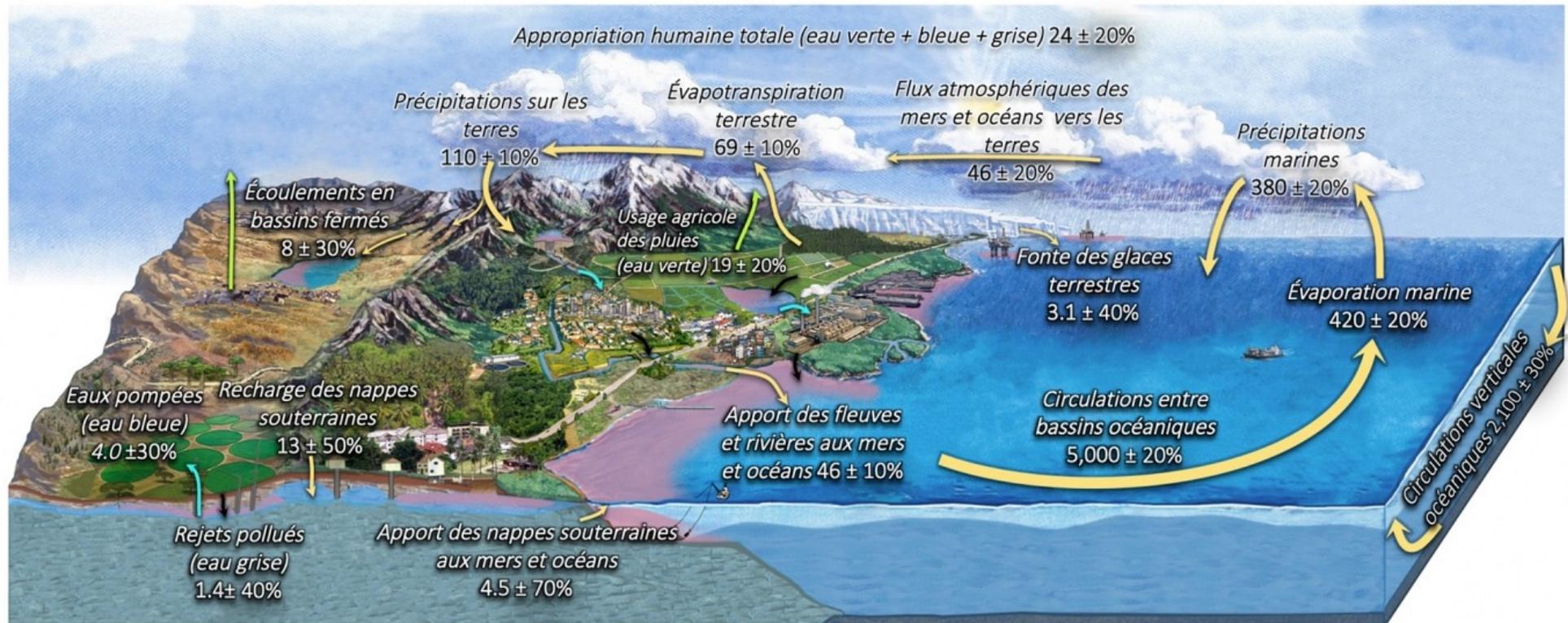
En partant d'une illustration de fond à la structure familière, les scientifiques dressent un état des lieux actualisé de la ressource en eau, à l'échelle de la planète. © B. W. Abbott, Diane Conner / Courtesy of Springer Nature

B. Abbott, et al. (2019) Nature Geoscience v12, pages 533–540 (2019)

□ Une composante du cycle de l'eau?

- Mise en évidence par le bilan en eau

b) Principaux flux du cycle hydrologique (en milliers de kilomètres cubes par an)  
 Appropriation humaine représentée par l'utilisation d'eau verte , bleue  et grise .



Après l'état des lieux de la figure a), les scientifiques séparent le volume total d'eau que nous utilisons (environ 24 milliers de kilomètres cube par an) en :

- Eau bleue (eau pompée puis consommée par l'agriculture à 70%, par l'industrie ou pour les usages domestiques) ;
- Eau verte (humidité du sol utilisée par l'agriculture et les pâturages, elle sert à la constitution ou à l'évapotranspiration des plantes) ;
- Eau grise (correspond au volume nécessaire pour diluer les pollutions d'origine humaine). © B. W. Abbott et al., Diane Conner / Courtesy of Springer Nature

B. Abbott, et al. (2019) Nature Geoscience v12, pages 533–540 (2019)

<https://www.univ-rennes1.fr/actualites/attention-la-representation-de-notre-impact-sur-le-cycle-de-leau#section-1>



## □ Une composante du cycle de l'eau?

- Argument isotopique

### Définition:

Des atomes possédant le même numéro atomique (même nombre de protons), mais de masse atomique différente (nombre différent de neutrons) sont appelés **isotopes**.

La plupart des éléments se présentent naturellement sous forme d'un mélange d'isotopes.

Les isotopes peuvent être **stables** ou **radioactifs**.

Exemple : isotopes de la Molécule d'eau et des solutés

**Rapport isotopique**  $R = \text{teneur isotope rare} / \text{teneur isotope abondant}$

Exemple :  $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$

**Rapport isotopique relatif**  $\delta = (R / R^*) - 1$       unité : ‰

$R^*$  : rapport isotopique standard ou échantillon référence

□ Une composante du cycle de l'eau?

▪ Argument isotopique

Isotopes de la molécule d'eau :

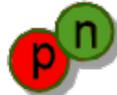
$\delta^{18}\text{O}$  (‰vsMOW),  $\delta^2\text{H}$  (‰vsMOW)

$\delta^{18}\text{O}$  Altitude de recharge

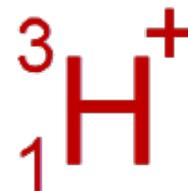
$^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$

Evaporation  $\delta^2\text{H}$  ←

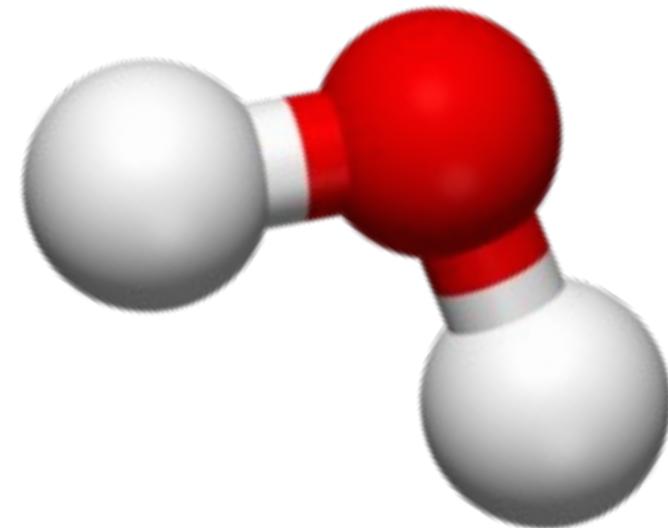
Datation (30 ans)  $\delta^3\text{H}$  ←



deutérium



tritium

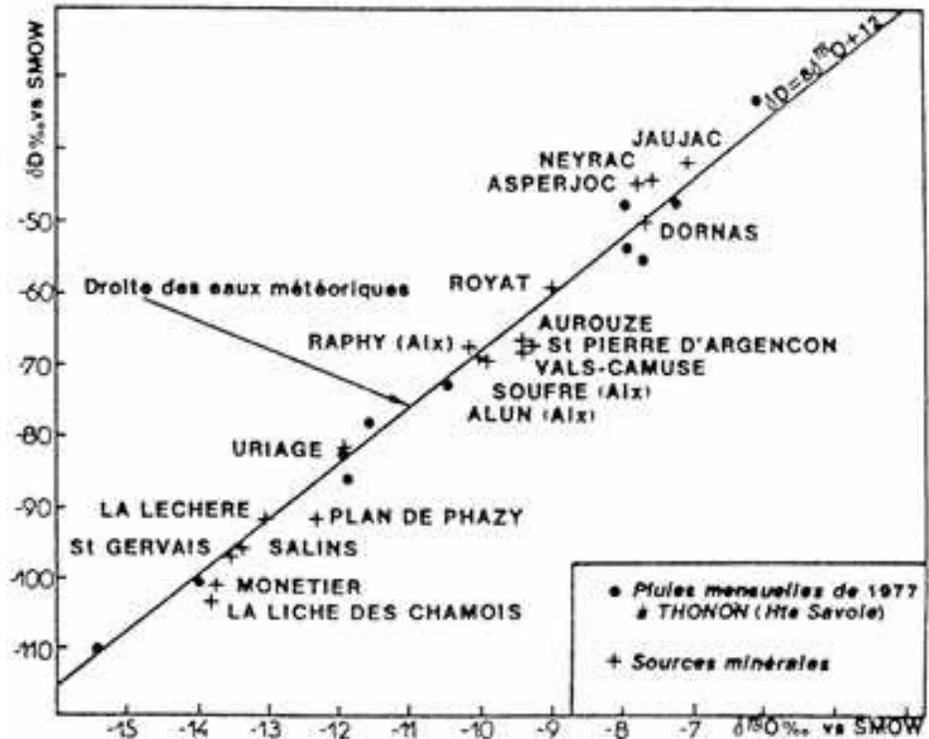
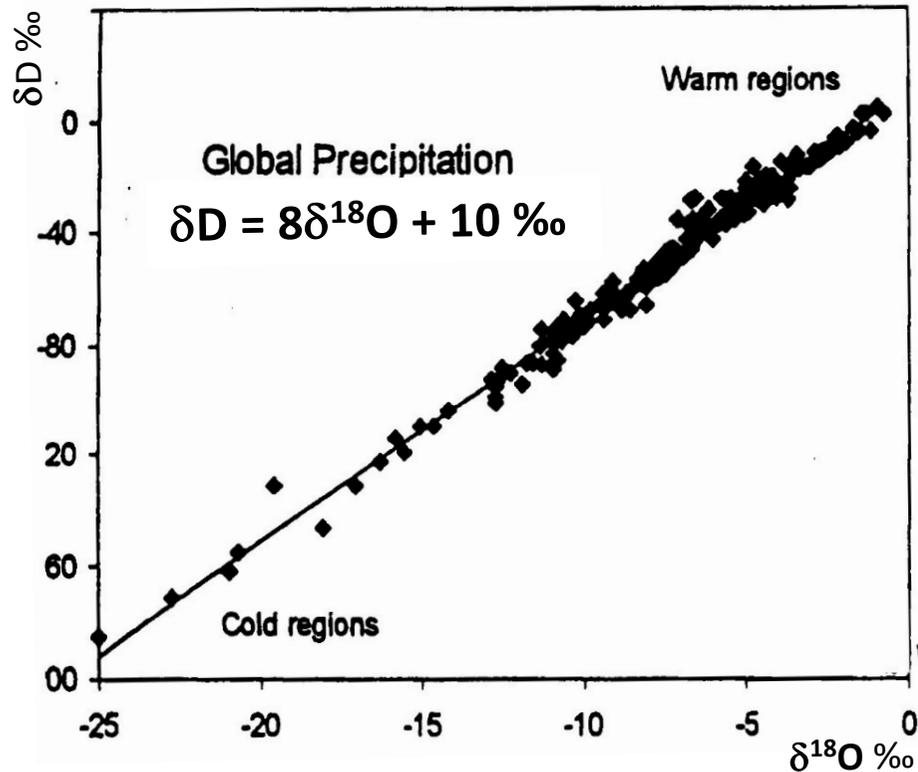
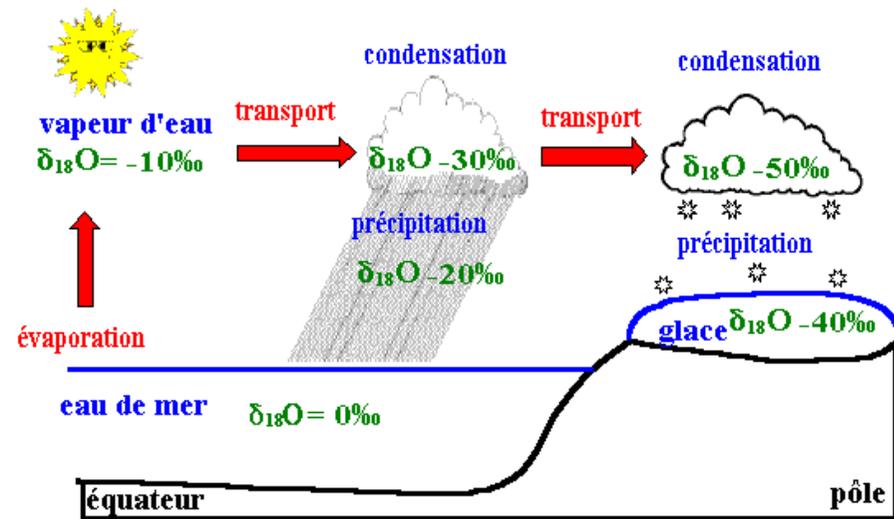


□ Une composante du cycle de l'eau?

- Argument isotopique

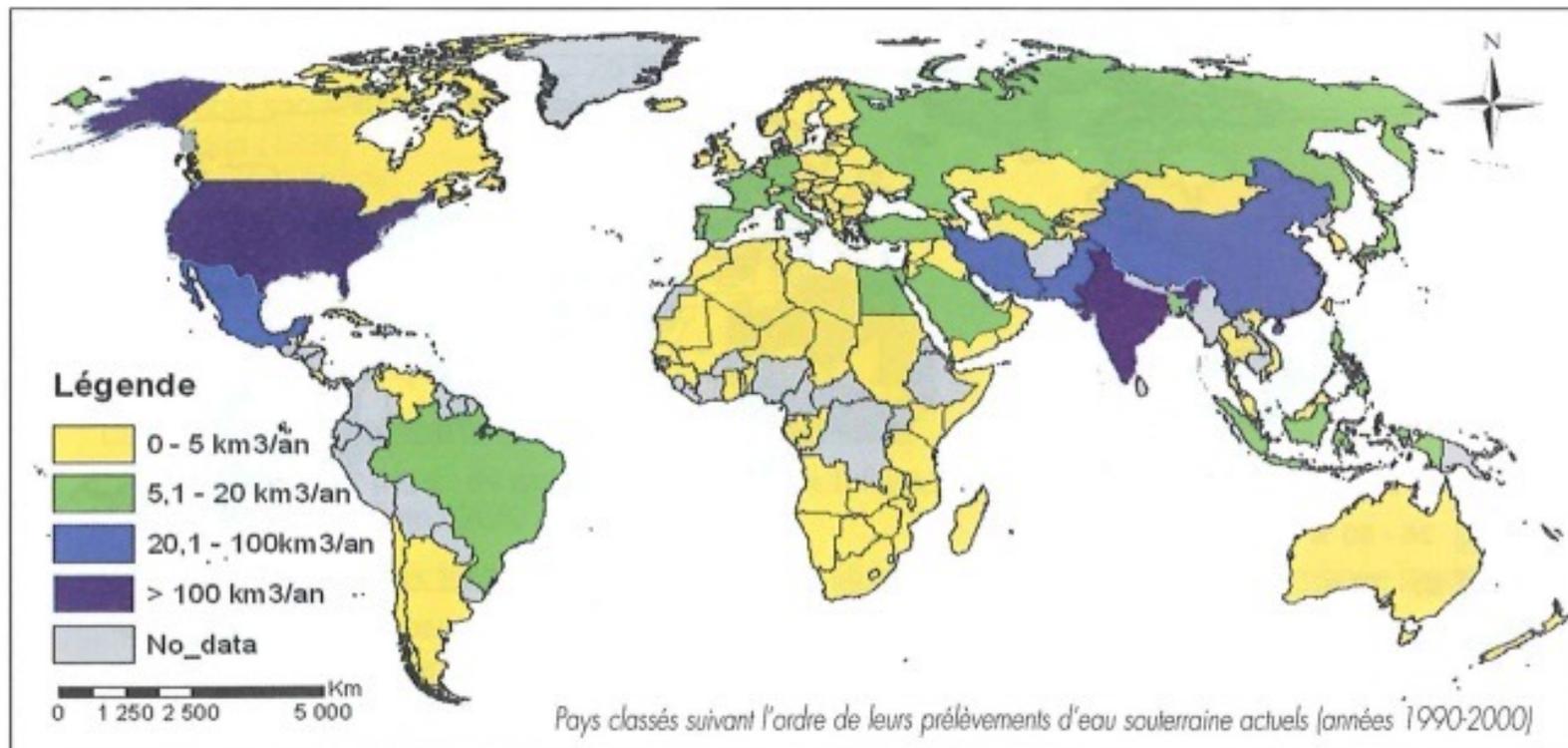
Isotopes de la molécule d'eau :

$\delta^{18}\text{O}$  (‰vsMOW),  $\delta^2\text{H}$ (‰vsMOW)



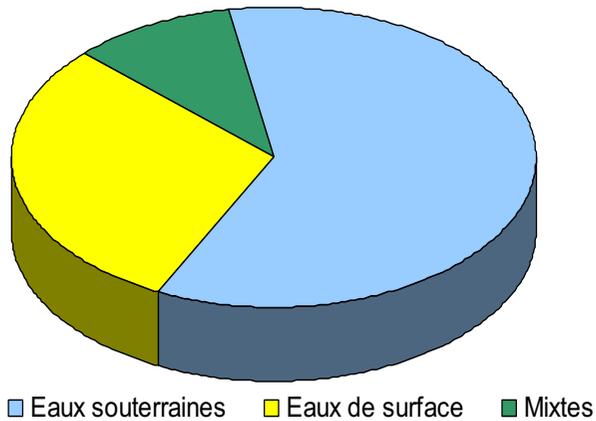
## □ Répartition et utilisation de l'eau souterraine

- Dans le monde:
  - Part des 10 pays les plus dotés: 58% des écoulements souterrains
  - Brésil 1874 km<sup>3</sup>/an <-> Pérou 303 km<sup>3</sup>/an // France 100 km<sup>3</sup>/an
  - Prélèvements totaux > 800 km<sup>3</sup>/an



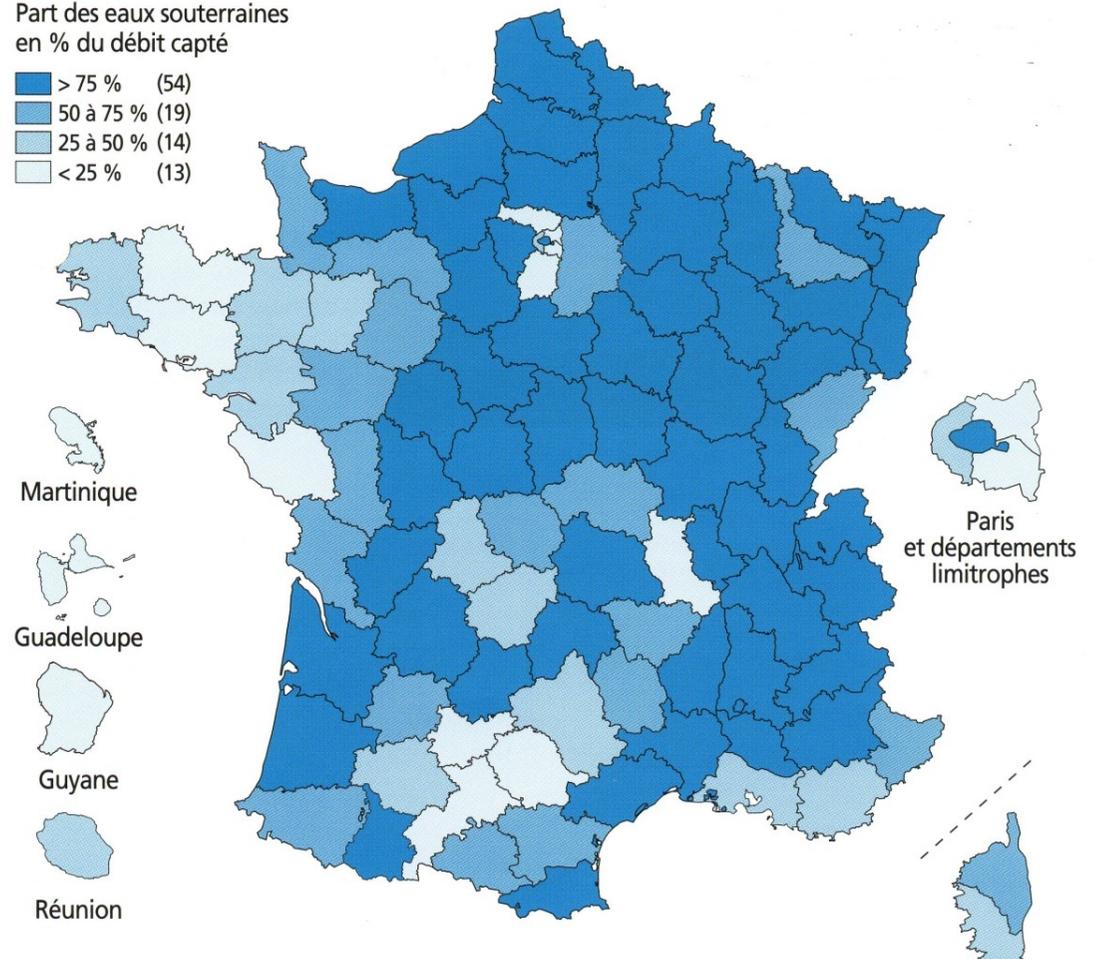
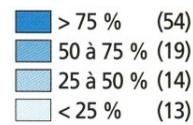
□ Usage

- En France :
  - *Origine de l'eau du réseau AEP en France*



Eau potable : 60%  
 Industrie: 23%  
 Irrigation: 18%  
 Production d'énergie: <0,5%

Part des eaux souterraines en % du débit capté



( DDASS, dans Les eaux souterraines en France, Ed. BRGM 2009)

## 2. L'hydrogéologie: pourquoi, comment?

### □ Une science pluridisciplinaire

#### ▪ Caractérisation du réservoir (structure) :

- ✓ Géologie structurale
- ✓ Minéralogie
- ✓ Géophysique

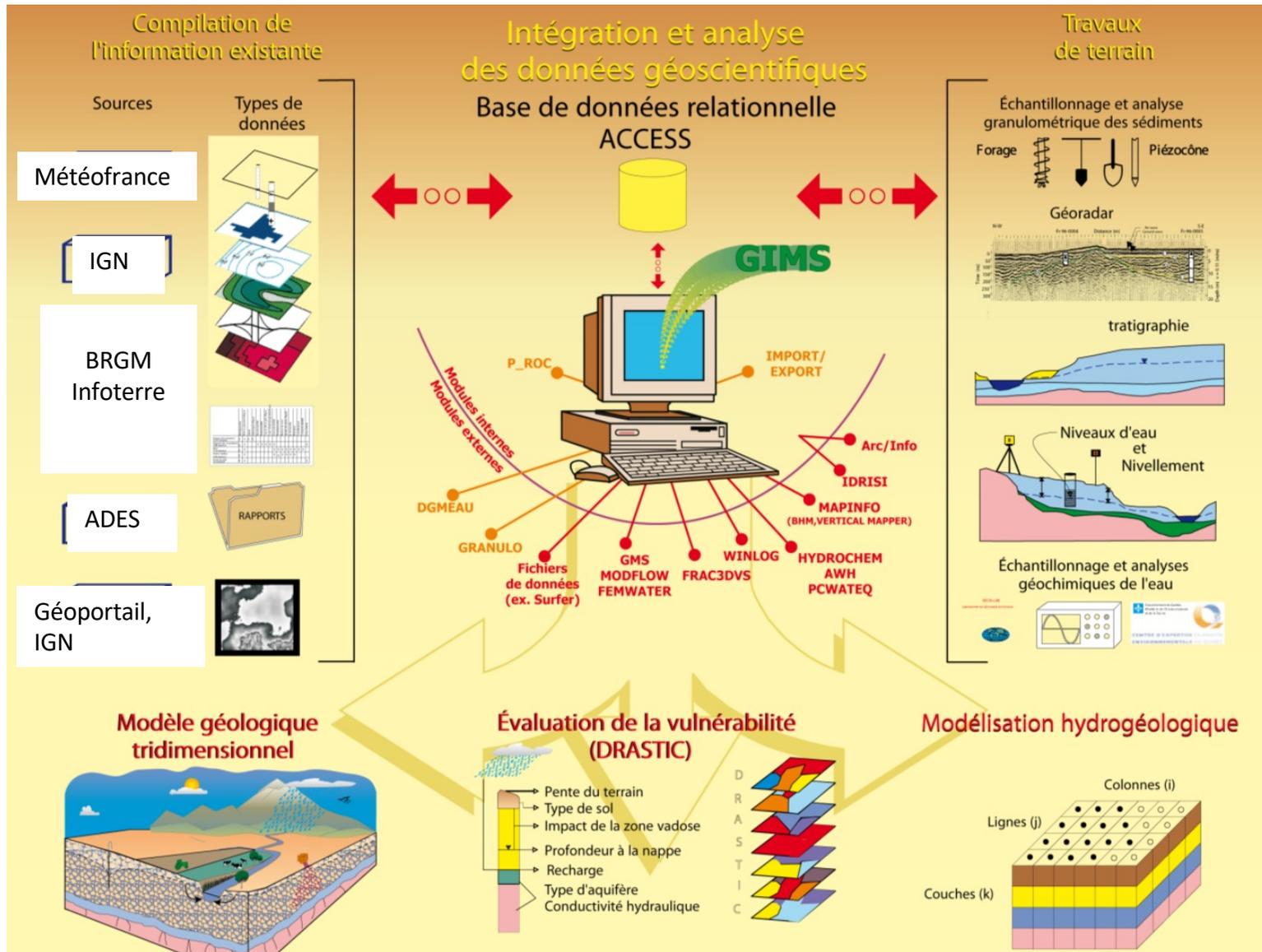
#### ▪ Caractérisation des écoulements

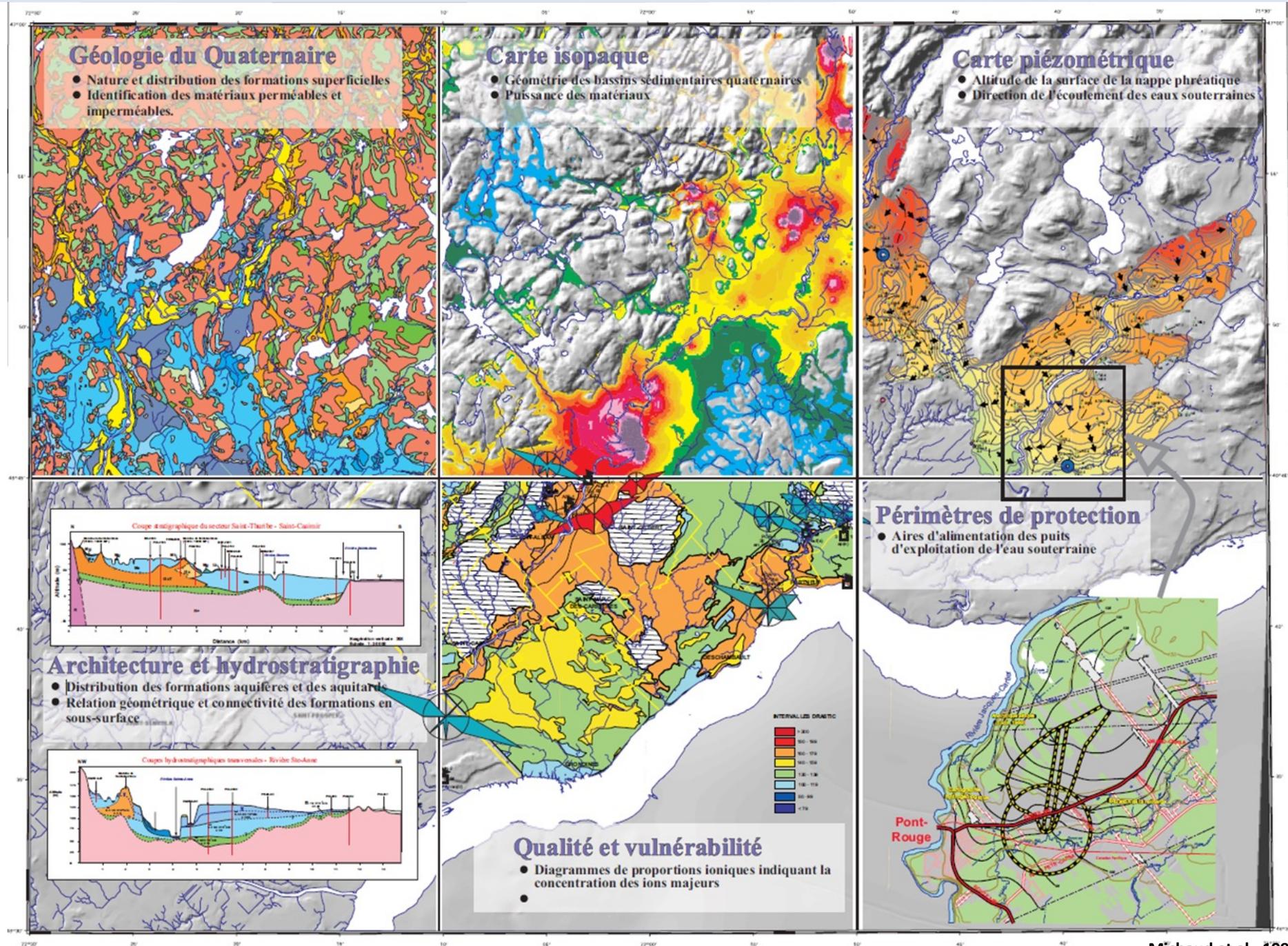
- ✓ Hydrologie
- ✓ Hydraulique souterraine
- ✓ Hydrochimie

#### ⇒ **Fonctionnement hydrogéologique**

- ✓ Hydrogéologie quantitative

❑ Démarche de l'hydrogéologue





## □ Démarche de l'hydrogéologue

### □ Acquisition:

- Recherche bibliographique  
Compilation de données existantes
- Mesures complémentaires
  - sur le terrain : instrumentation et prélèvements
  - au laboratoire : analyses eau/roches

### □ Interprétation:

- Etablissement de cartes hydrogéologiques
- Réalisation de forage pour l'alimentation en eau
- Évaluation de la vulnérabilité à la pollution
- Modèle conceptuel et ou numérique de fonctionnement du système

### Exemple d'actions de l'hydrogéologue

- Mise en évidence d'une connexion entre 1 perte et 1 source par traçage. Application pour déterminer la vulnérabilité et les périmètres de protection de captage
- Estimation des réserves en eau face au changement climatique
- Délimitation du bassin d'alimentation d'une source

## Exemples de stage de Master

### □ **Master 1 :**

- Suivi de l'aquifère alimentant le captage d'Oursbelille - Chambre d'Agriculture des Hautes Pyrénées
- Recensement et diagnostique des captages en eau potable abandonnés sur le département de la Mayenne – Conseil Général de la Mayenne
- Diagnostics et travaux de dépollution en sites et sols pollués

### □ **Master 2**

- Prospection et gestion des ressources en eau en Afrique subsaharienne - Hydroconseil
- Participation aux études hydrogéologiques et suivi des chantiers de forages et de pompages en régions Languedoc-Roussillon - ANTEA Group
- Mesure in situ de la perméabilité et caractérisation des propriétés géométriques et géologiques du champs de perméabilité -TOTAL
- Protection et restauration de la qualité des eaux souterraines destinées à la consommation humaine – BERGA-Sud
- Etat des lieux des ressources en eaux thermale de la région Languedoc-Roussillon : analyse du gisement, du fluide thermale, de l'exploitation et du suivi pour améliorer la qualité de l'eau fournie (Aven)- BRGM
- Etudes de la structure géologique et du fonctionnement hydrogéologique de la partie Est des sédiments glaciaires d'Evian-les-bains (Haute-Savoie) - Danone
- Analyse de plan de lutte contre les pollutions diffuses pour la protection des captage AEP - BRGM

# Plan

## CM-1 L'eau souterraine dans le cycle de l'eau

1. L'eau sur terre et l'utilisation des ressources
2. L'hydrogéologie: pourquoi, comment?
3. **Aquifère et nappe d'eau souterraine**
  - 3.1. Définition
  - 3.2. Les différents types de nappes



Source du Durzon, Larzac

## Objectifs:

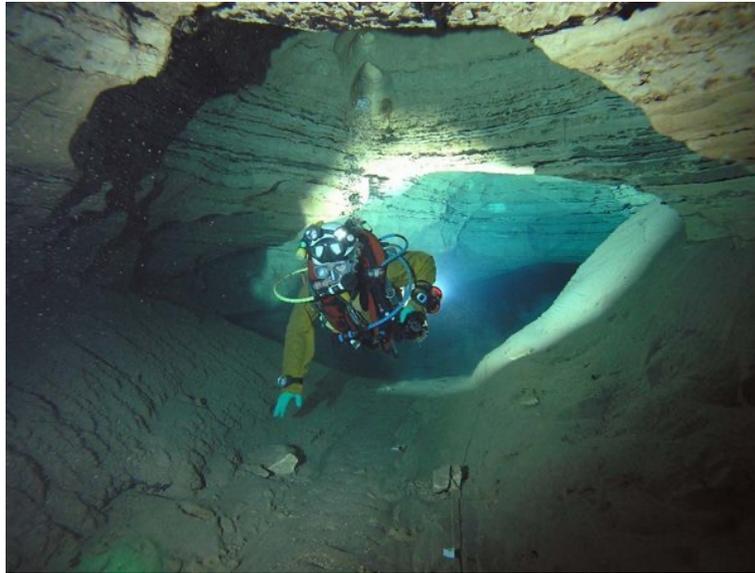
- Représenter schématiquement un aquifère (zone d'alimentation, zone d'émergence, ZNS, ZS, surface piézométrique, substratum,...)
- Citer, représenter schématiquement et décrire les différents types de nappes d'eau souterraine

### 3. Aquifère et nappe d'eau souterraine

☞ *Comment vous représentez-vous l'eau souterraine?*

### 3. Aquifère et nappe d'eau souterraine

L'eau souterraine c'est ça (très rarement):



Et ça (surtout):



### 3.1. Définitions

- **Aquifères:** Formation géologique perméable permettant l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine

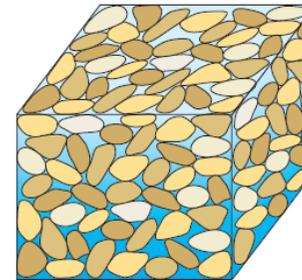
Stockage: **porosité** (n) + écoulements: **perméabilité** (K)

### 3.1. Définitions

- **Aquifères:** Formation géologique perméable permettant l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine

Stockage: **porosité** (n) + écoulements: **perméabilité** (K)

- **porosité** : Quantité de vide contenu dans un matériau



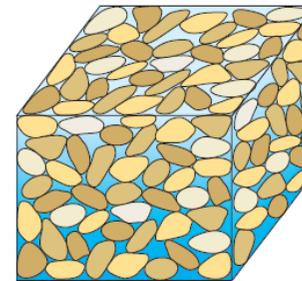
A. Well-sorted sand

### 3.1. Définitions

- **Aquifères:** Formation géologique perméable permettant l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine

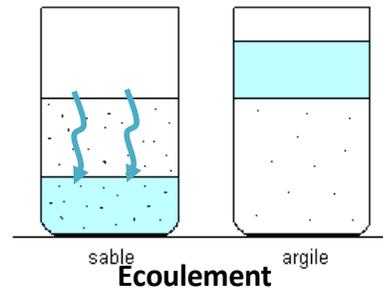
Stockage: **porosité** (n) + écoulements: **perméabilité** (K)

- **porosité** : Quantité de vide contenu dans un matériau



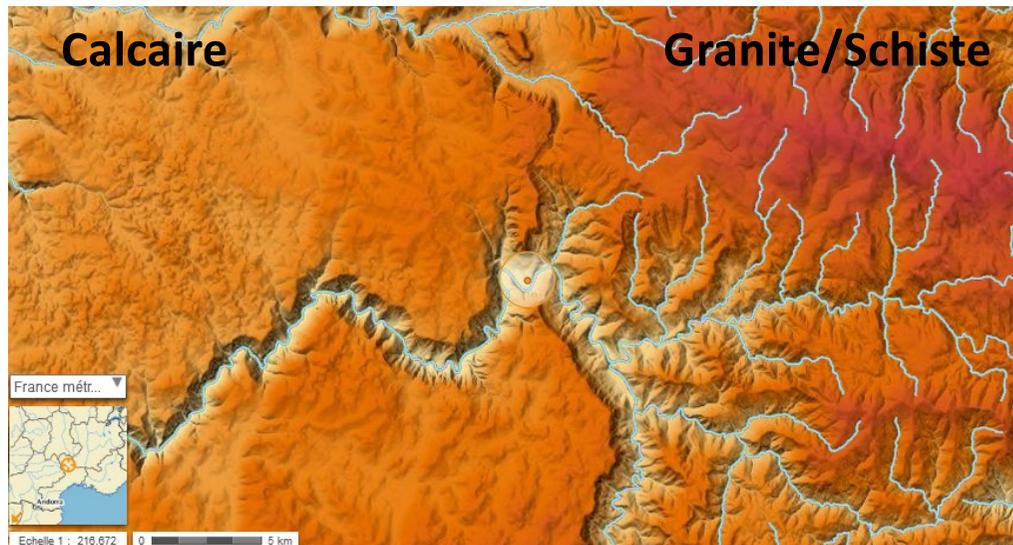
A. Well-sorted sand

- **perméabilité** : Aptitude d'un matériau à se laisser traverser par un fluide



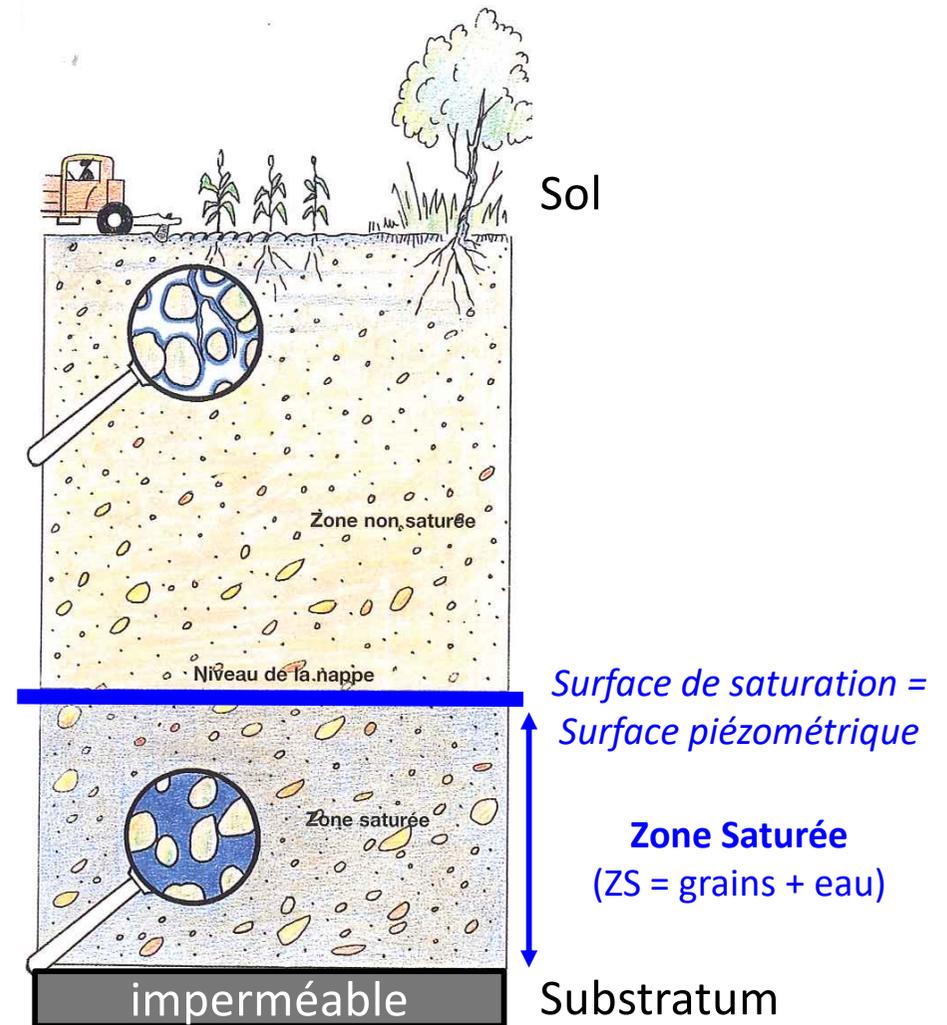
Mesurable	pratiquement nul
<b>Formation hydrogéologique</b>	
Perméable	semi-perm.    imperméable

☞ Conséquence de la perméabilité des roches sur le réseau hydrographique



## ■ Nappe d'eau souterraine

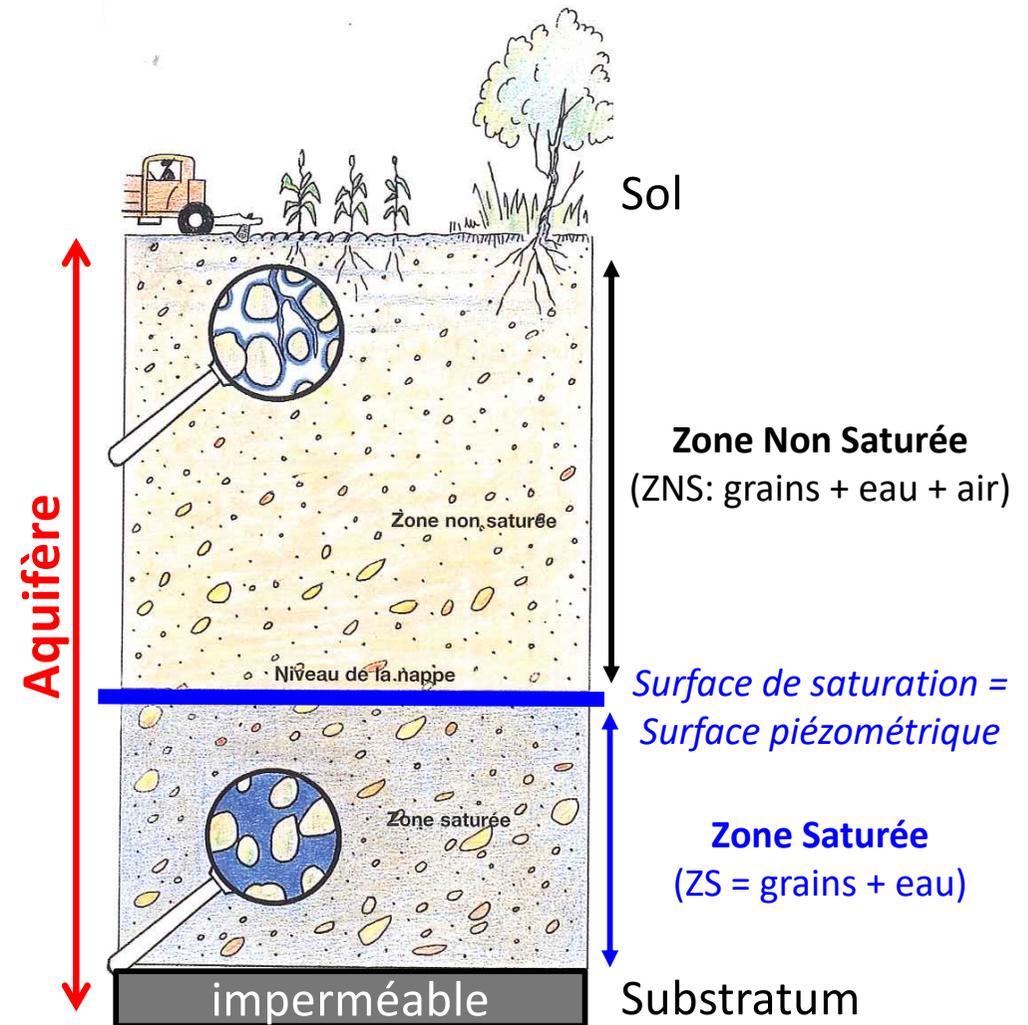
Ensemble des vides entièrement saturés d'eau dont toutes les parties sont en continuité hydraulique = Zone saturée (grains + eau)



(J.J. Collin, 2004)

## ■ Nappe d'eau souterraine

Ensemble des vides entièrement saturés d'eau dont toutes les parties sont en continuité hydraulique = Zone saturée (grains + eau)



(J.J. Collin, 2004)

## ■ Nappe d'eau souterraine

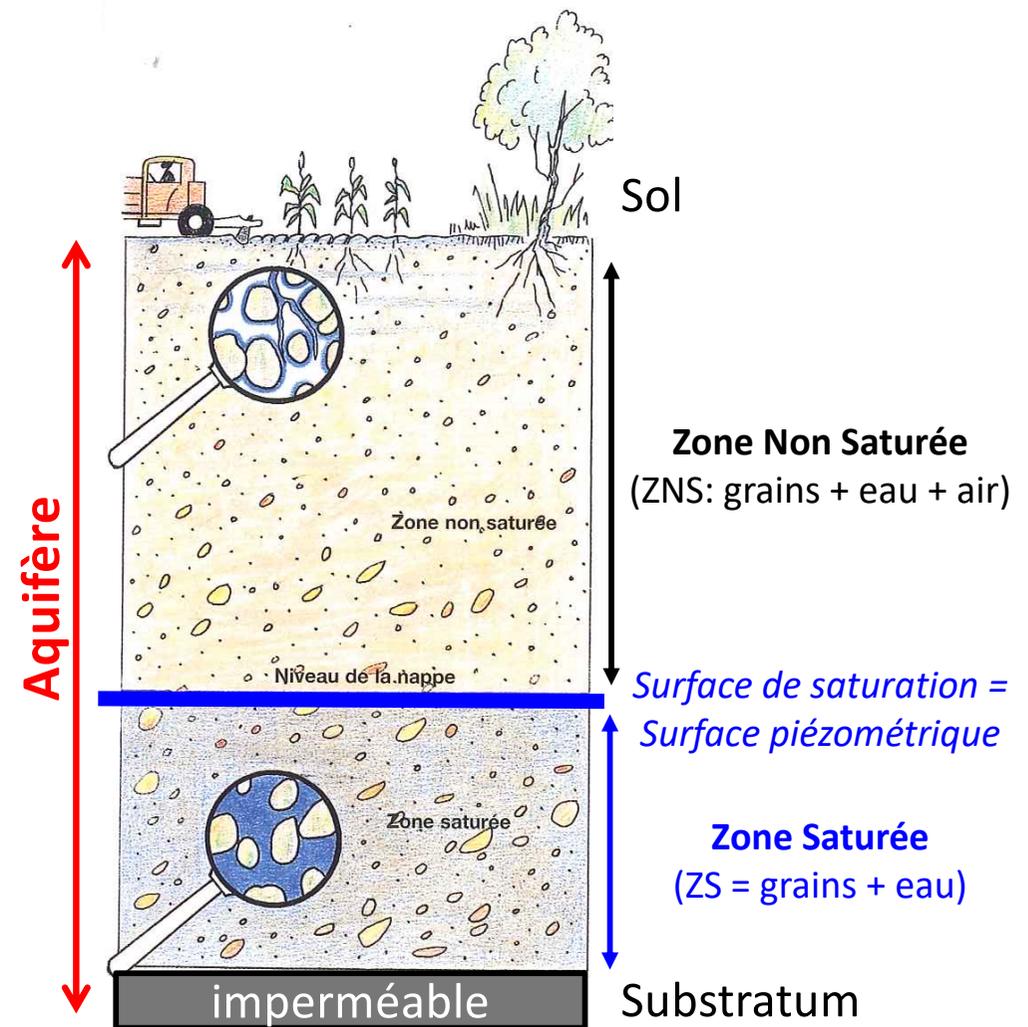
Ensemble des vides entièrement saturés d'eau dont toutes les parties sont en continuité hydraulique = Zone saturée (grains + eau)

## ■ Aquifère

= ZS + ZNS

### Dictionnaire des sciences du sol

Couche ou massif solide, perméable, poreux, comportant une zone saturée – ensemble du milieu solide et de l'eau contenue – suffisamment conducteur d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage.

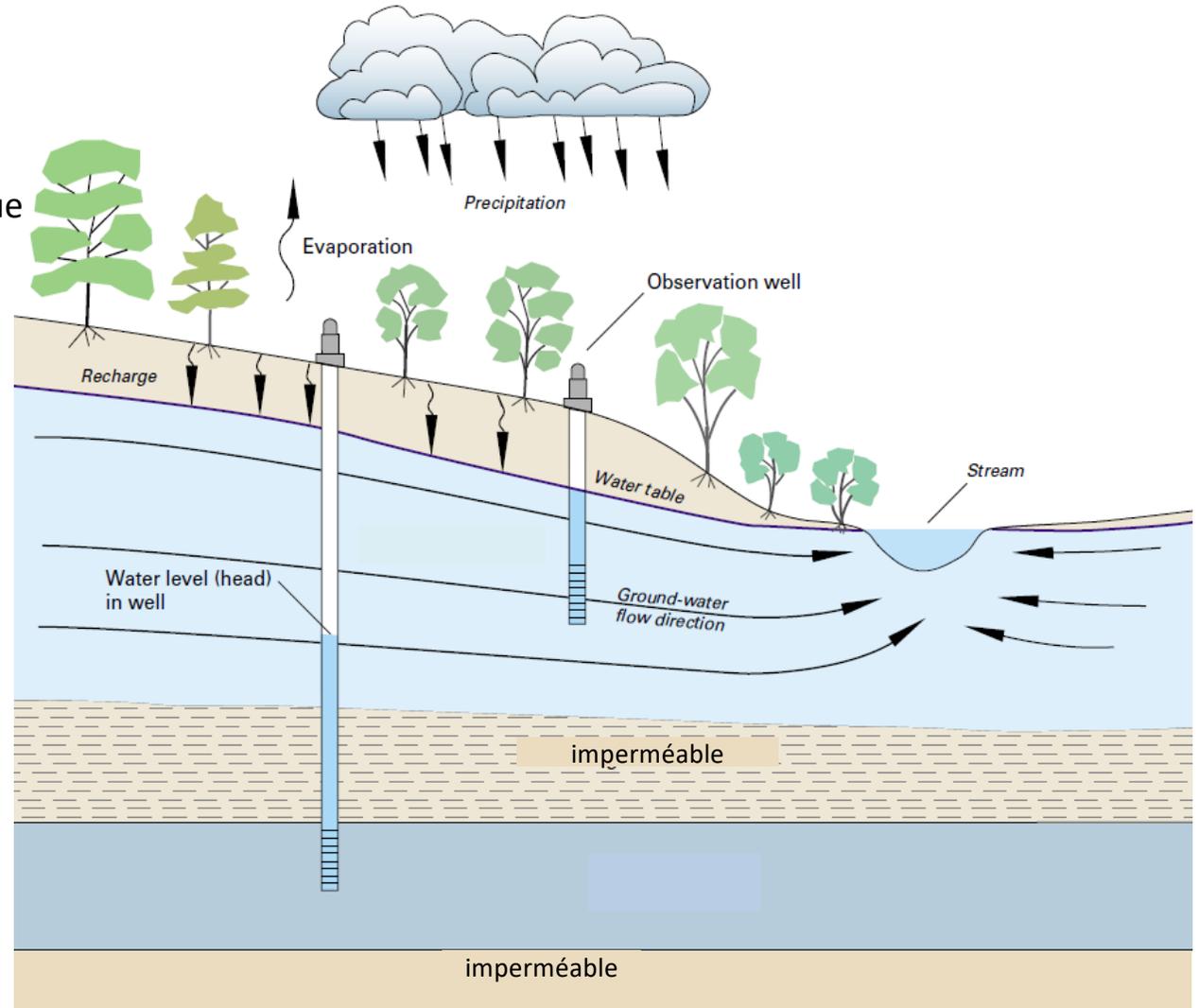


(J.J. Collin, 2004)

### 3.2. Types de nappes

Points communs/ différences?

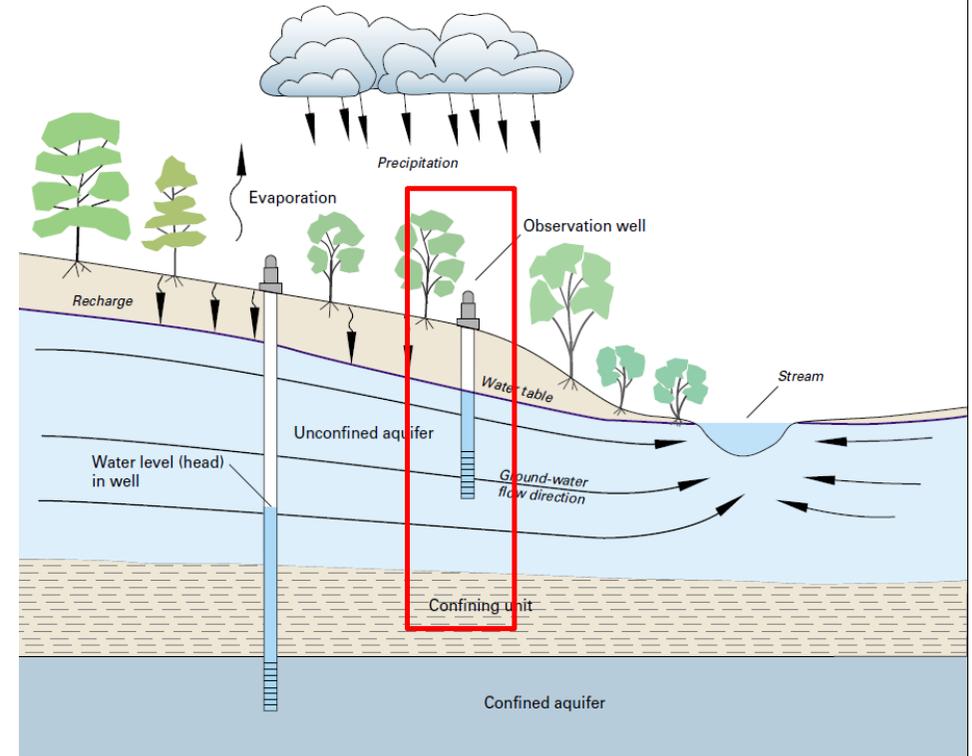
- Toit =
- Zone non saturée?
- Position de la surface piézométrique
- Avantages/Inconvénients



Points communs/ différences?

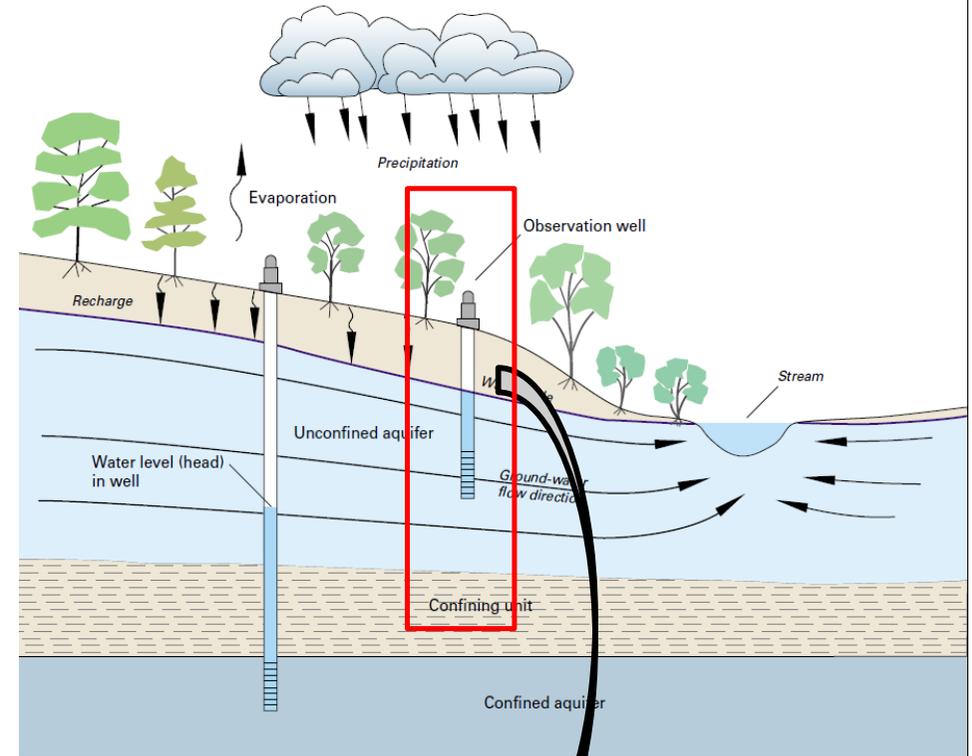
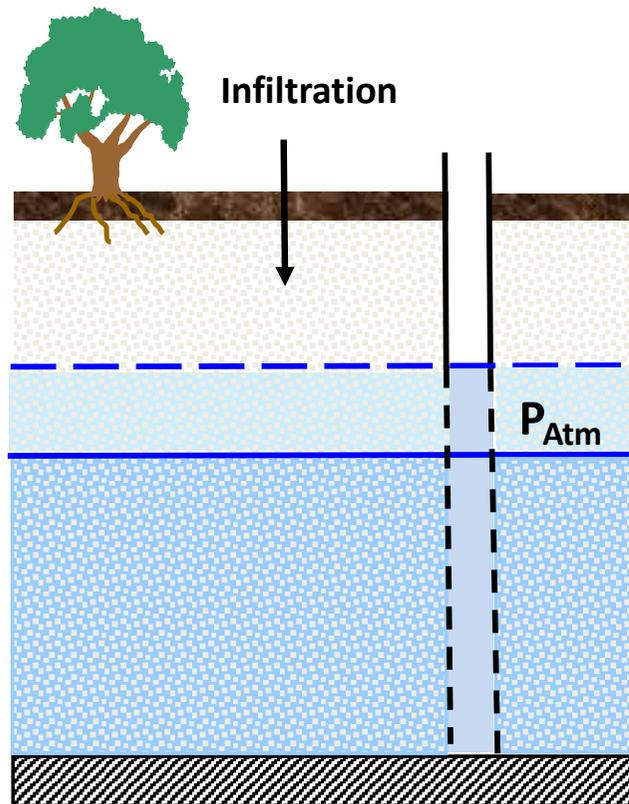
### □ Nappes libres

- Toit = surface piézométrique
- Existence d'une zone non saturée
- Zonalité sol/eau souterraine
- Avantages/inconvénients



□ **Nappes libres**

- Toit = surface piézométrique
- Existence d'une zone non saturée
- Zonalité sol/eau souterraine
- Avantages/inconvénients



**ZNS**

SP hautes eaux

SP étiage

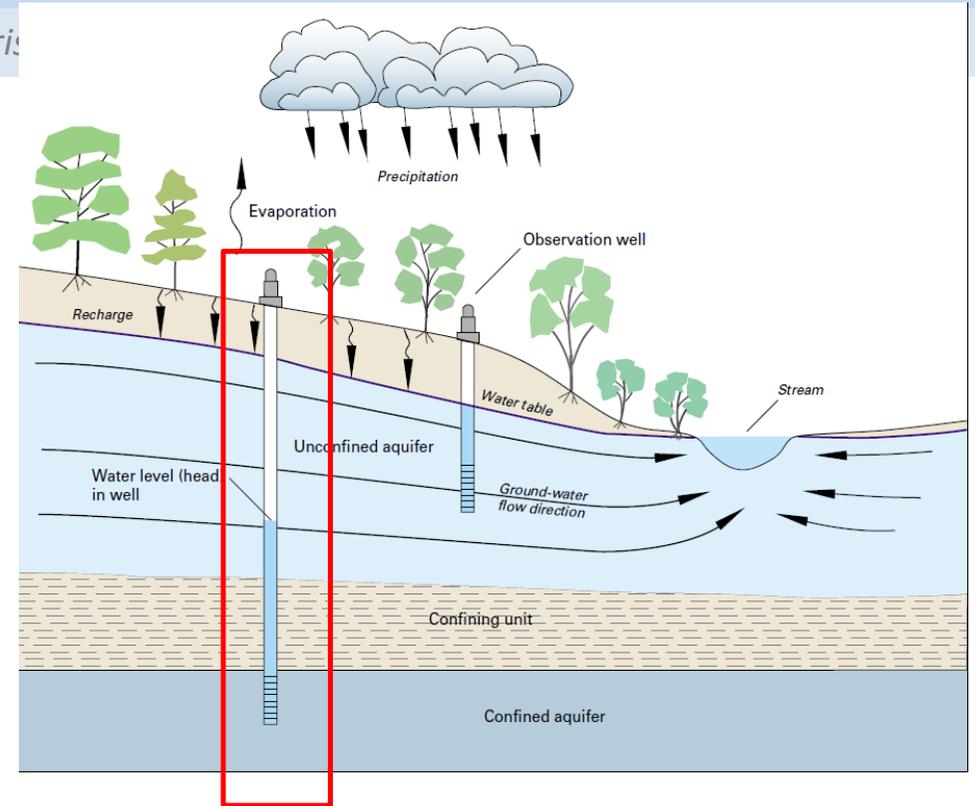
**ZS temporaire : réserves renouvelables**

**ZS permanente : réserves permanentes**

**Substratum**

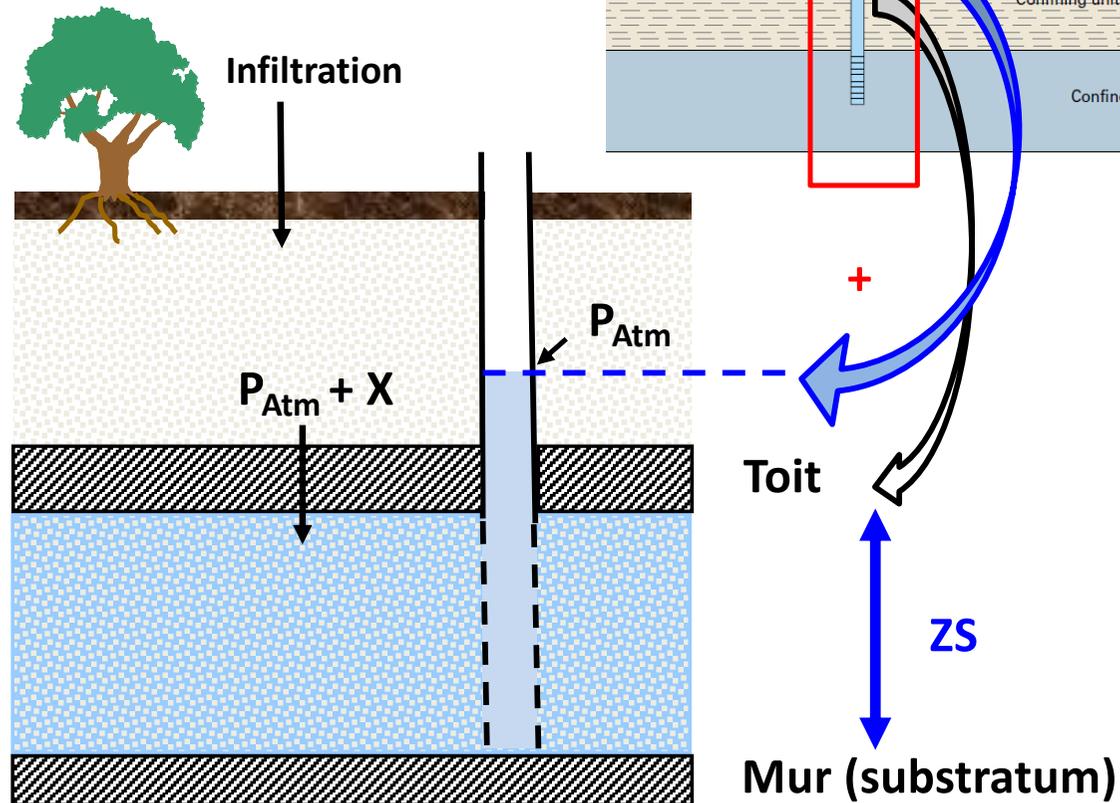
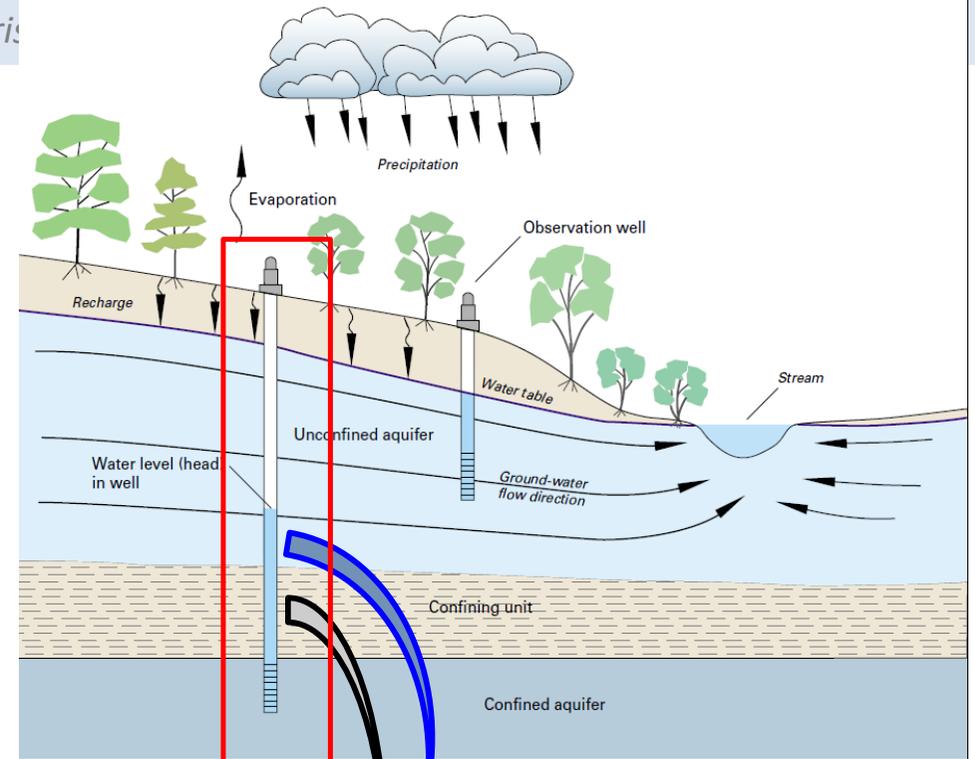
□ **Nappes captives**

- Toit = imperméable
- Totalement saturée (pas de ZNS)
- Niveau piézométrique supérieur au toit



□ **Nappes captives**

- Toit = imperméable
- Totalement saturée (pas de ZNS)
- Niveau piézométrique supérieur au toit



□ **Nappes captives et artésiennes**

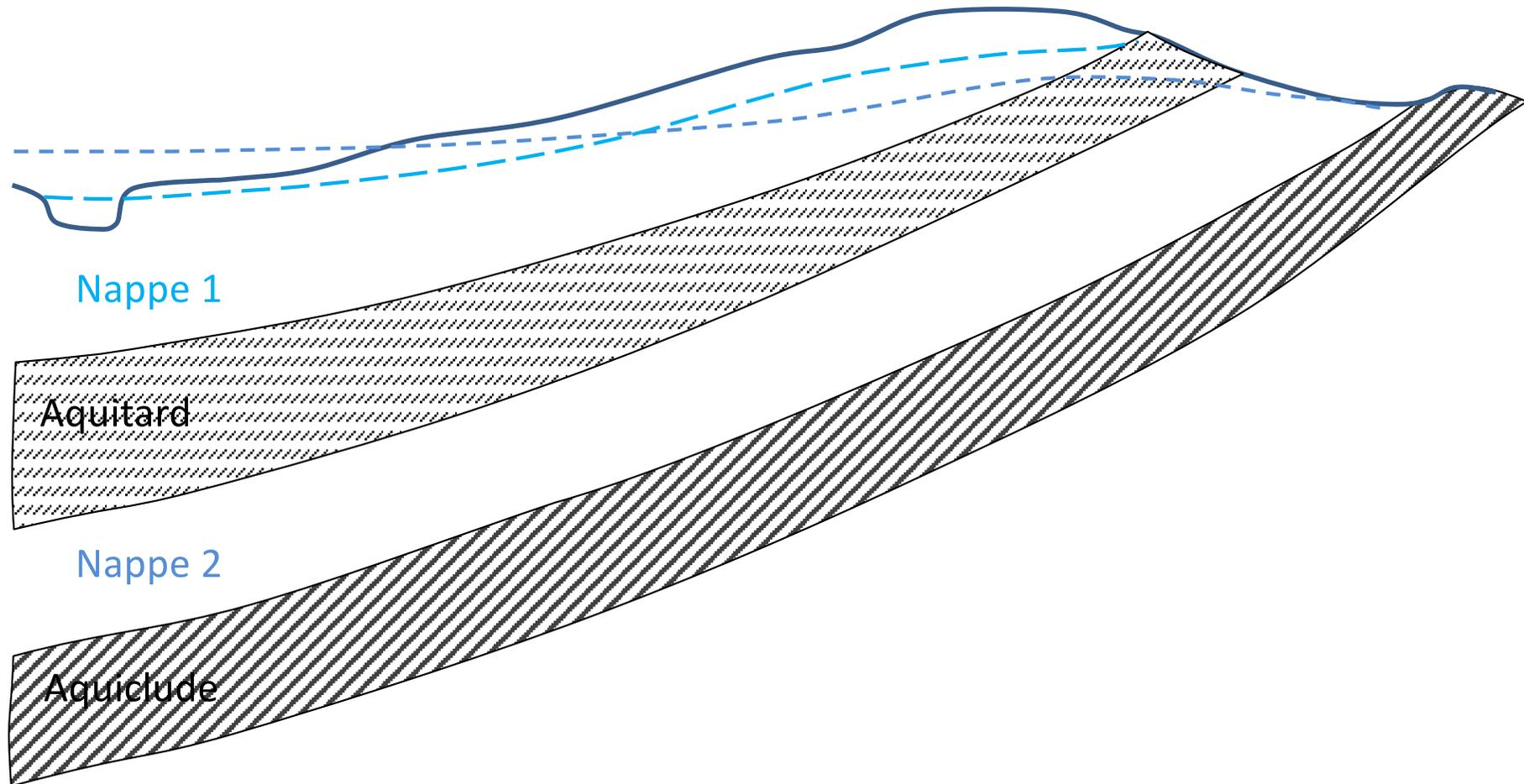
- Toit = imperméable
- Niveau piézométrique supérieur au **SOL**
- Totalement saturée (pas de ZNS)



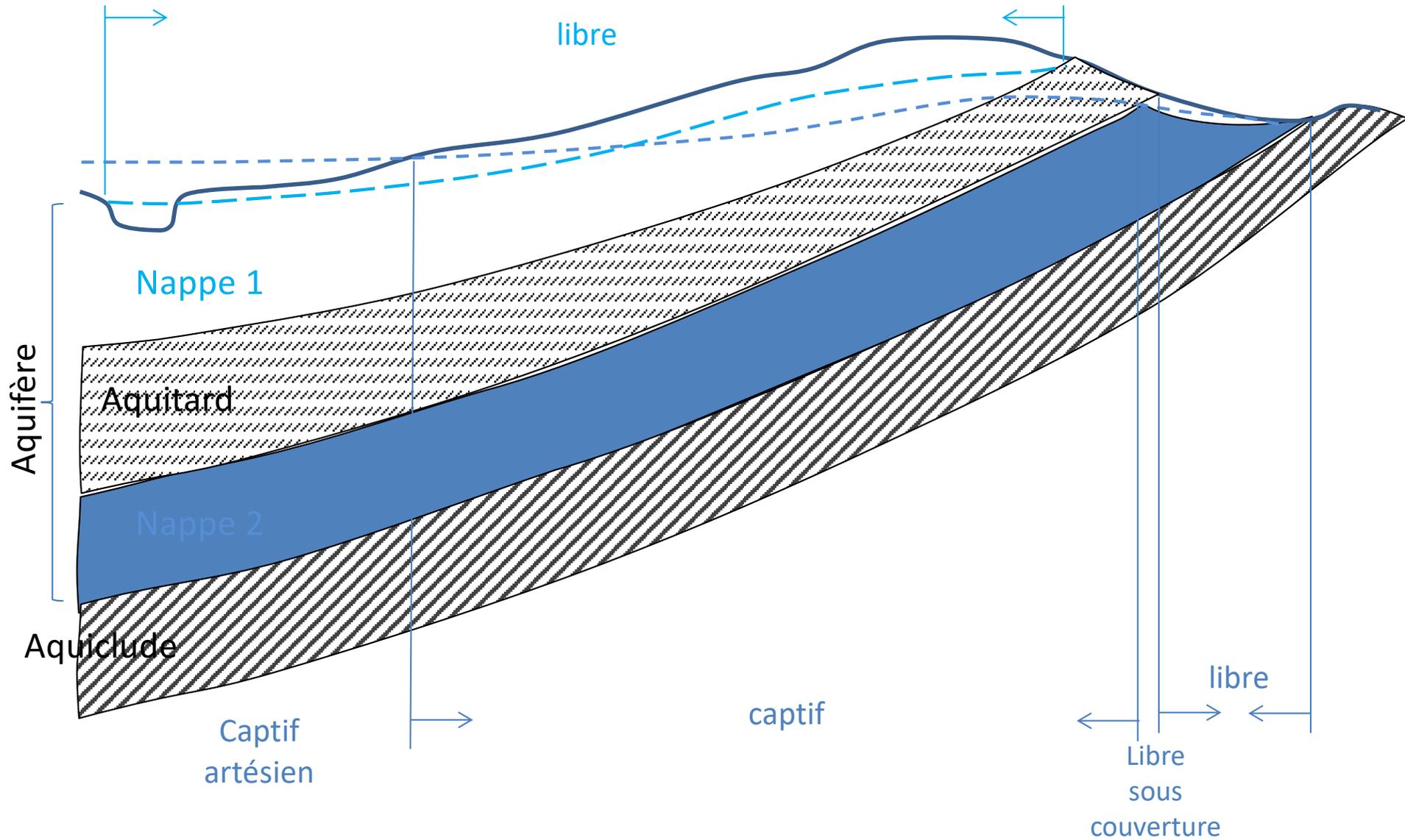
Photographie : Pierre Thomas

Forage artésien

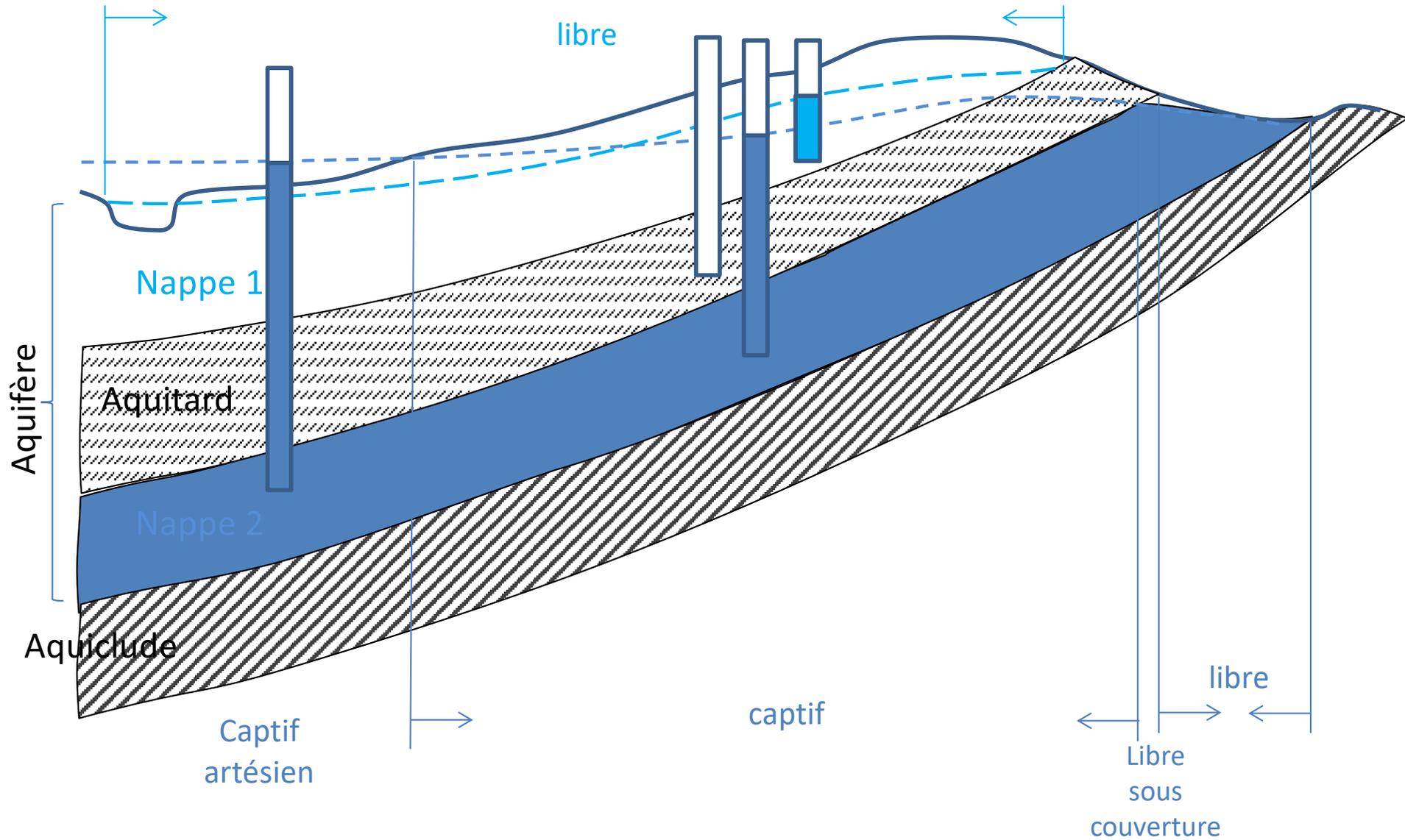
□ Synthèse et cas particuliers



□ Synthèse et cas particuliers



□ Synthèse et cas particuliers



# HYDROGEOLOGIE GENERALE

## HAT303T



Piezomètre dans le glissement de Super-Sauze, Haute-Provence



Sources d'Ichetucknee, Floride

Site expérimental de Kerrien, Bretagne



### I. Structure et propriétés des aquifères

CM1. L'eau souterraine dans le cycle de l'eau

#### CM2. Caractéristiques du réservoir aquifère

*Est-ce qu'il y a de l'eau dans cette roche?*

##### 1. Alimentation et écoulement des nappes d'eau souterraine

- 1.1. Recharge des nappes
- 1.2. Ecoulement dans la zone saturée
- 1.3. Décharge des nappes

##### 2. Caractéristiques du réservoir aquifère (fonction capacitive)

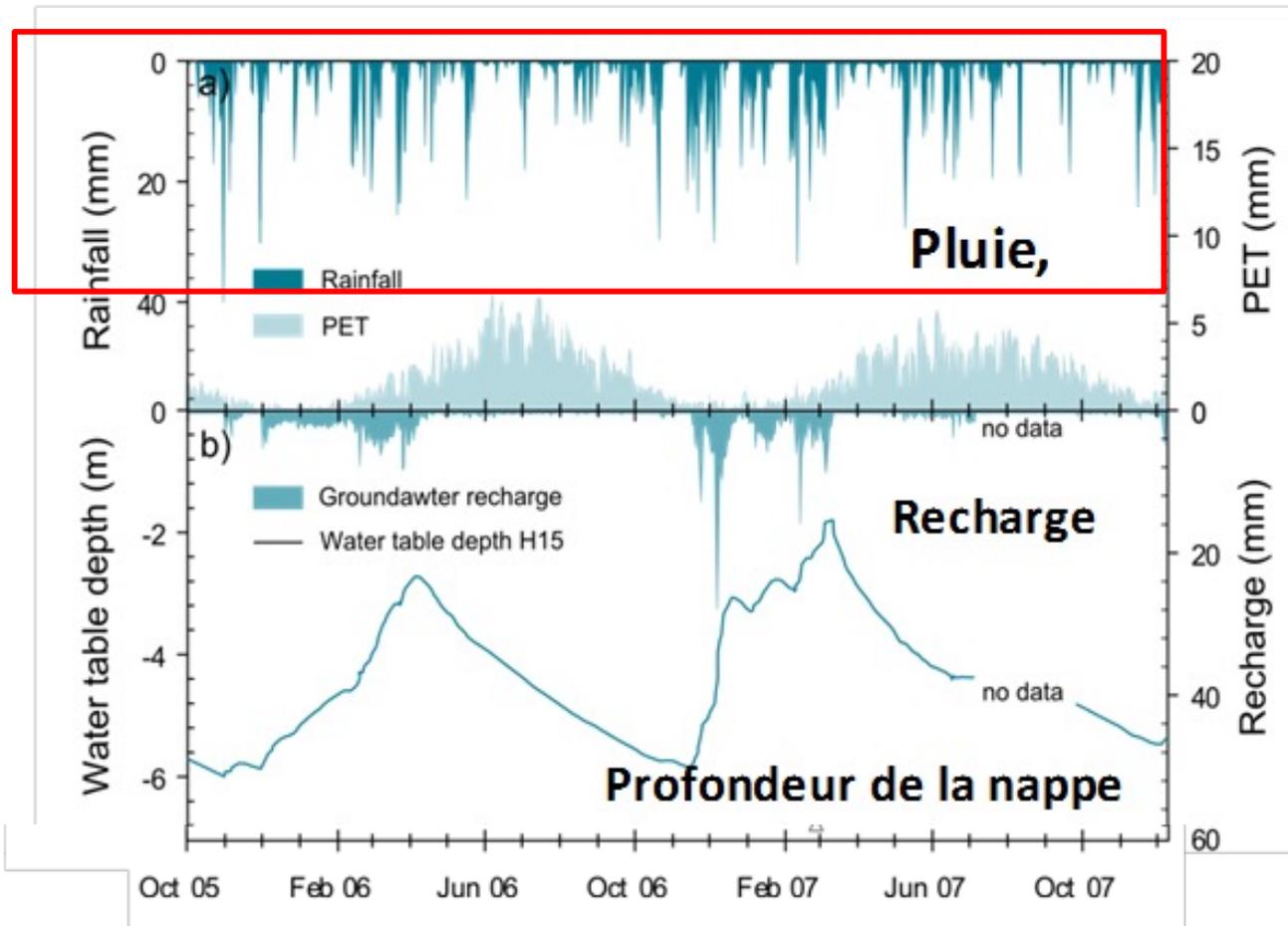
- 2.1. Principaux terrains aquifères de France
- 2.2. Les différents types de réservoirs

**A la fin de ce cours, vous devez être capable de....**

- Représenter schématiquement un aquifère (zone d'alimentation, zone d'émergence, ZNS, ZS, surface piézométrique, substratum,...)
- Citer, représenter schématiquement et décrire les différents types de nappes d'eau souterraine
- Citer et décrire les caractéristiques structurales des grands types d'aquifère
- Citer les différents types de porosité

## 1. Alimentation et écoulement des nappes d'eau souterraine

- Alimentation des nappes : infiltration verticale dans la zone non saturée
  - Précipitations



Un épisode pluvieux est caractérisé par:

Une lame (mm)

⇒ 1mm sur 1m<sup>2</sup> représente 1 litre

Une intensité = Lame par unité de temps (mm/h)

- Surface à considérer?

- Mesure de la lame d'eau précipitée?

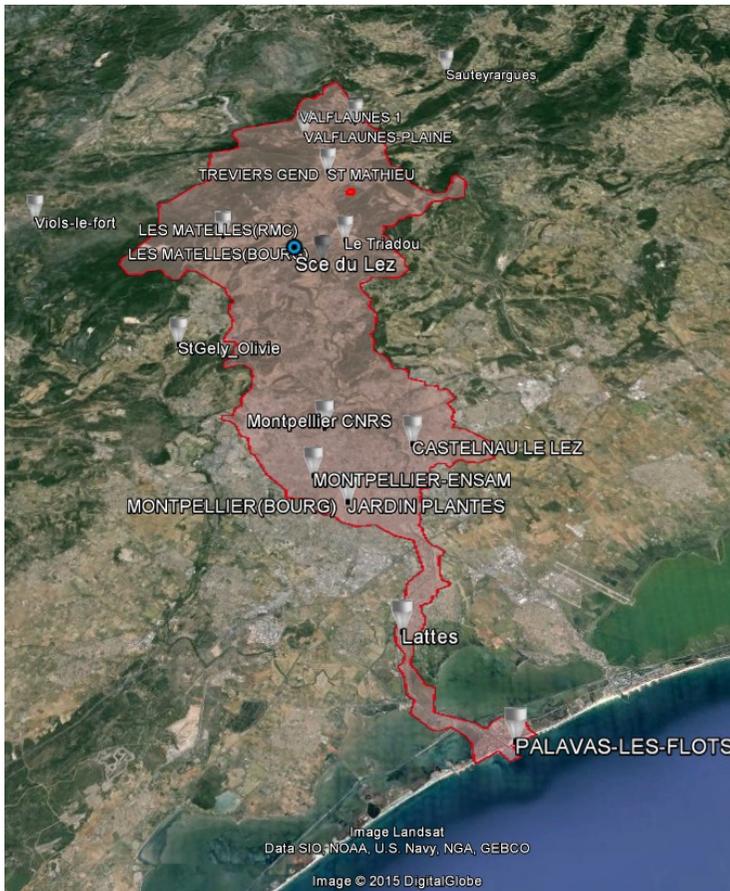
# 1. Alimentation et écoulement des nappes d'eau souterraine

- Alimentation des nappes : infiltration verticale dans la zone non saturée

- Précipitations

En surface:

le Bassin Versant topographique

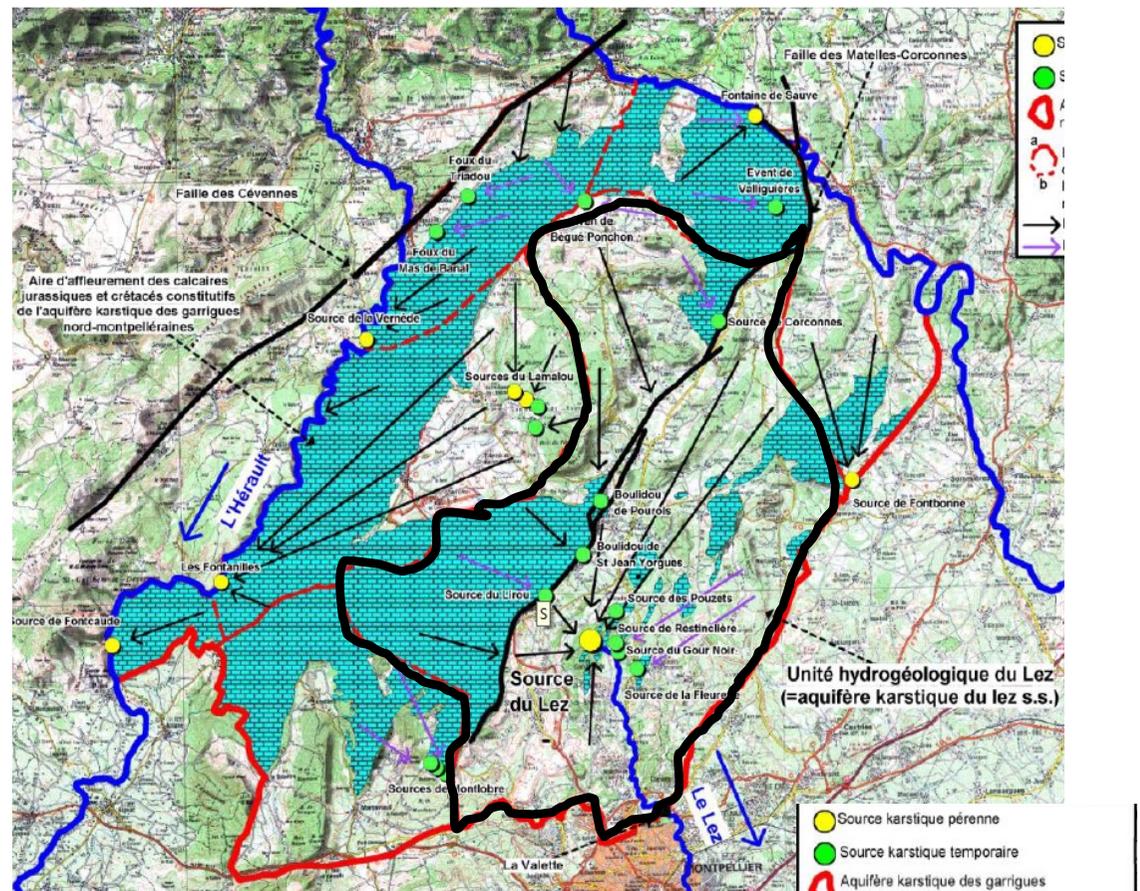


=surface topographique qui draine vers un même point (exutoire) l'ensemble des eaux ruisselées

≠

En souterrain:

le Bassin Versant hydrogéologique



→ Calculer le volume d'une pluie de 10mm qui tombe sur le BV du Lez (110 Km<sup>2</sup>) ?

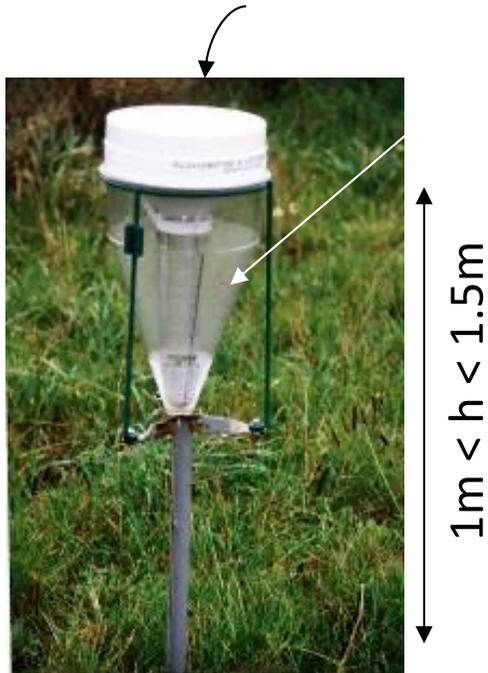
- Source karstique pérenne
- Source karstique temporaire
- Aquifère karstique des garrigues nord-montpelliéraines : 850 km<sup>2</sup>
- a ○ Limites déterminées (a) ou approximatives (b) des sous-unités hydrogéologiques de l'aquifère karstique des garrigues nord-montpelliéraines
- Ecoulement permanent
- Ecoulement temporaire

Alimentation des nappes : infiltration verticale dans la zone non saturée

Précipitations

Mesure/estimation de la lame d'eau précipitée

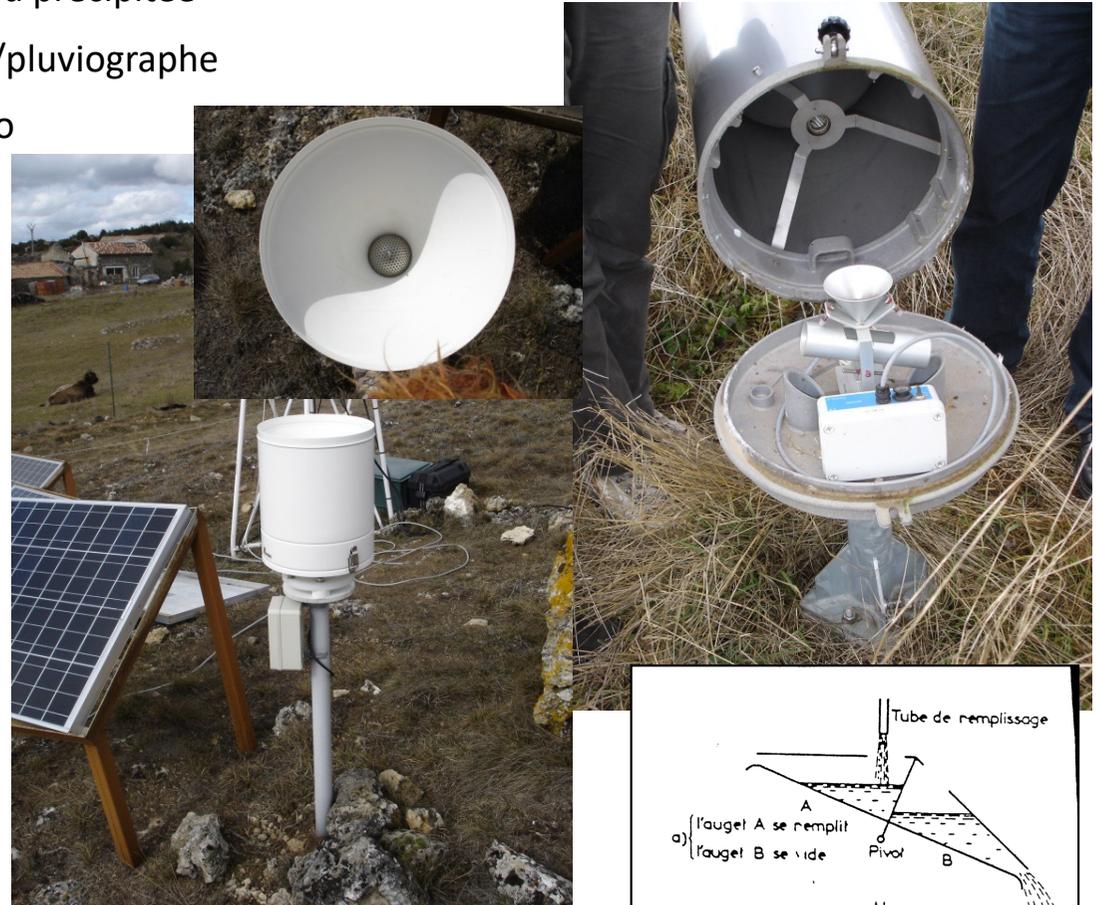
- Mesure directe : pluviomètre/pluviographe
- Mesure indirecte: radar météo



Pluviomètre Météo officiel presque plein 1997

Photos Bois, ENSHMG

Pluviomètre totalisateur (pluie journalière)

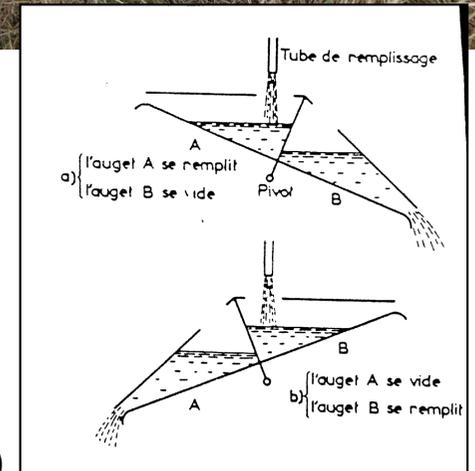


1 basculement ↔ 20g eau

S=1000 cm<sup>2</sup> ↔ 0.2 mm

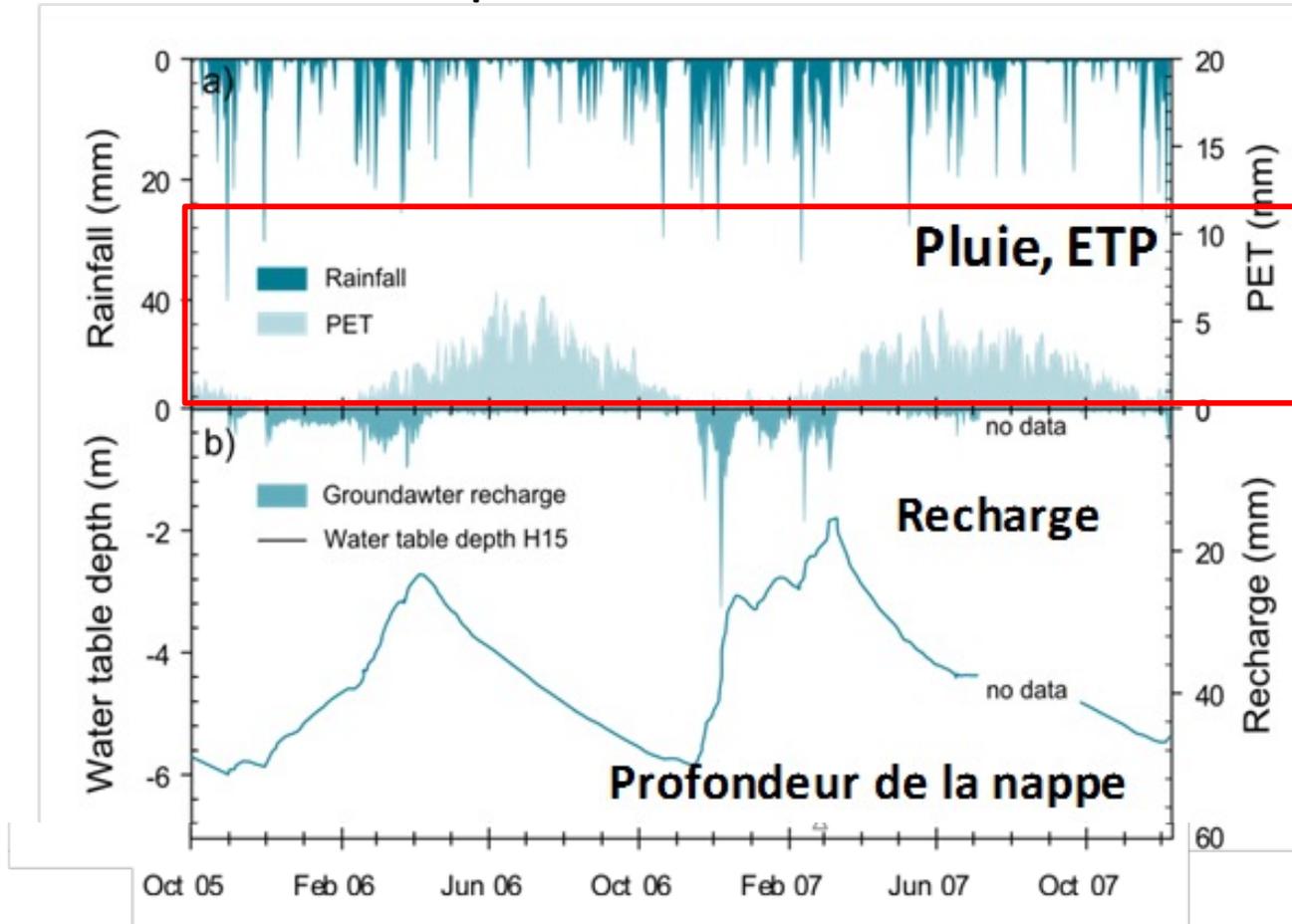
Pluviographe à auget basculant

Mesure de l'instant du basculement ⇒ Cumul de pluie=f(t)



## 1. Alimentation et écoulement des nappes d'eau souterraine

- Alimentation des nappes : infiltration verticale dans la zone non saturée
  - Précipitations efficaces



- Evapotranspiration  
ETP/ETR

Alimentation des nappes : infiltration verticale dans la zone non saturée

**ETP**: Evapotranspiration Potentielle

**ETR**: Evapotranspiration Réelle

**RU**: Réserve en eau Utile du sol

1) Pluie > ETP : ETR=ETP

$P - ETP > 0$

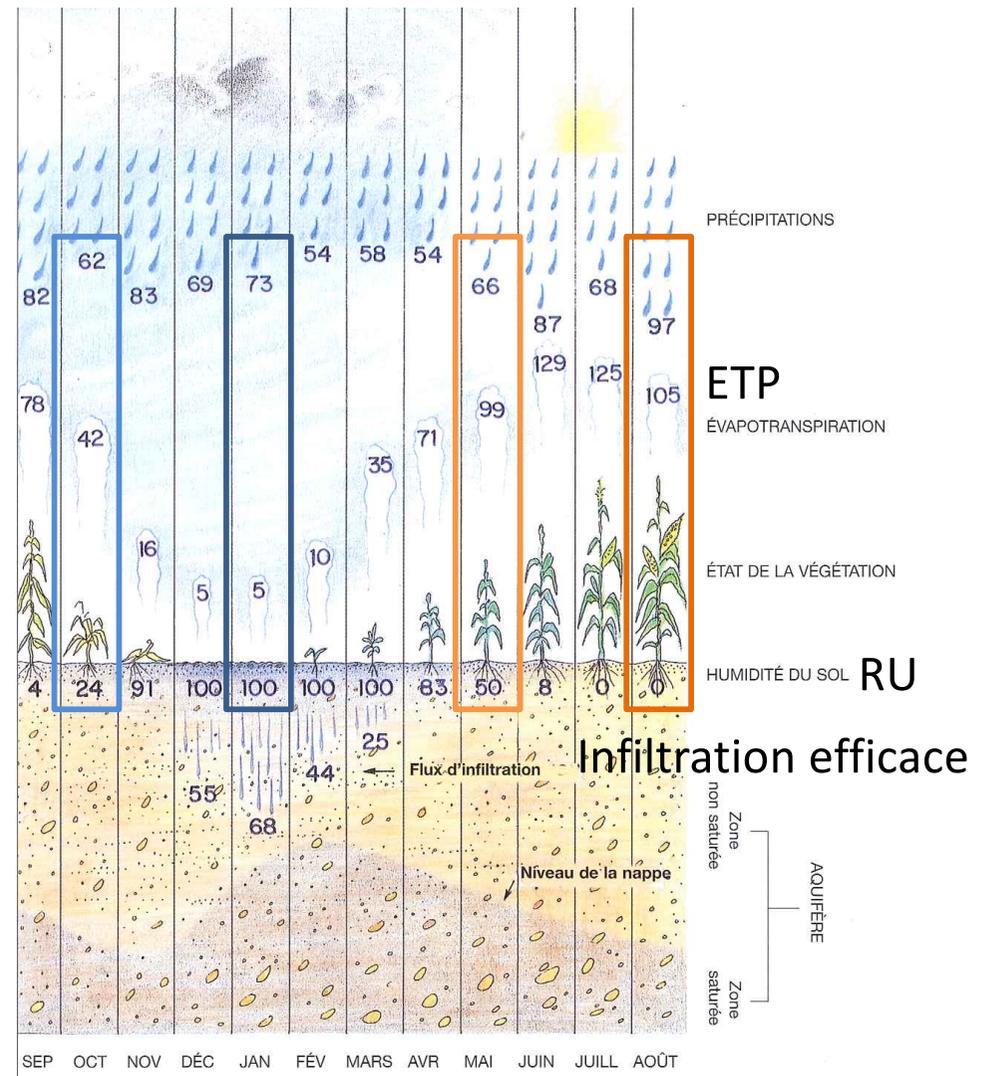
- RU = 100 : recharge de la nappe
- RU < 100 : recharge du sol puis si possible de la nappe

2) Pluie < ETP

$P - ETP < 0$ :

- RU = 0 : ETR= Pluie
- RU ≠ 0 : ETR = Pluie +RU

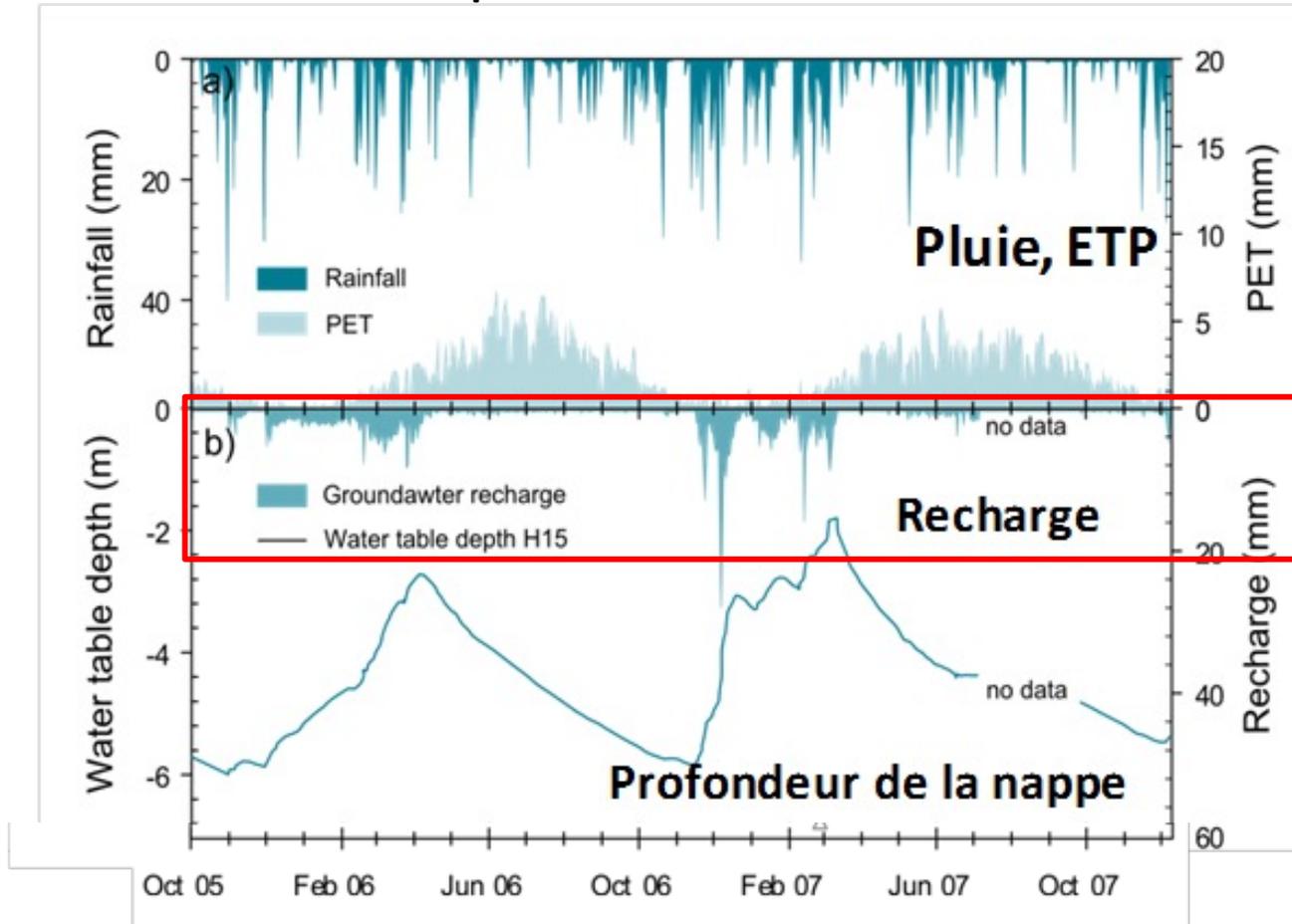
=> Précipitations efficaces = part des précipitations disponibles pour l'écoulement superficiel et souterrain.



Cycle annuel de recharge a l'échelle de l'aquifère (JJ. Collin, 2004)

## 1. Alimentation et écoulement des nappes d'eau souterraine

- Alimentation des nappes : infiltration verticale dans la zone non saturée
  - Précipitations efficaces



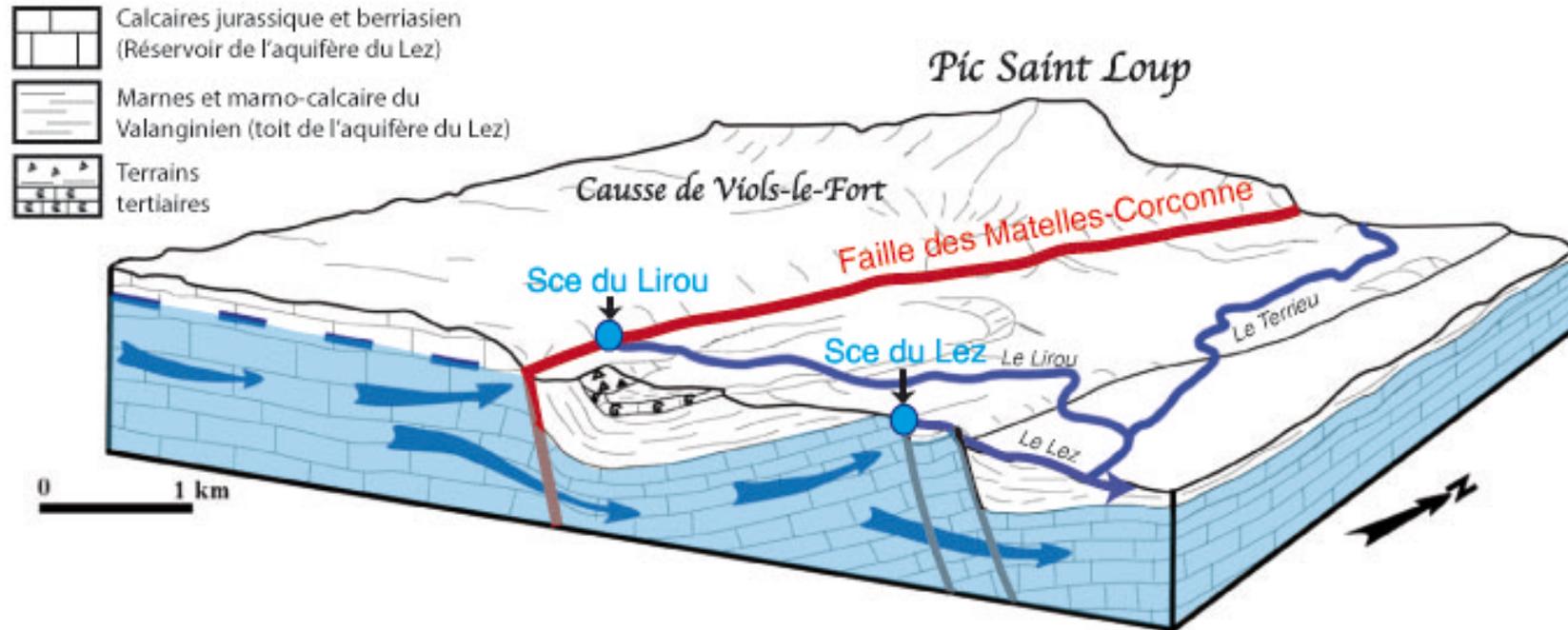
- Evapotranspiration ETP/ETR
- Ruissellement (R)

$$PE = P - ETR - R$$

- ⇒ Infiltration diffuse
- ⇒ Infiltration concentrée

- Facteurs conditionnant l'infiltration

□ Ecoulement dans la zone saturée



□ Ecoulement dans la zone saturée

▪ **Surface piézométrique** = niveau d'eau de la nappe

- Niveau d'équilibre entre l'eau de la nappe et la pression atmosphérique
- Mesure dans un puits/forage/**piézomètre** (well/borehole/piezometer) avec une **sonde piézométrique**



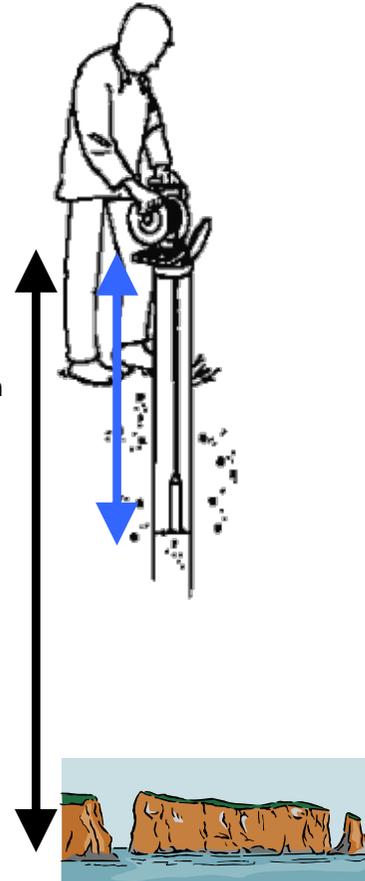
Crépines



Mesure manuelle

Conversion en Cote NGF

NGF



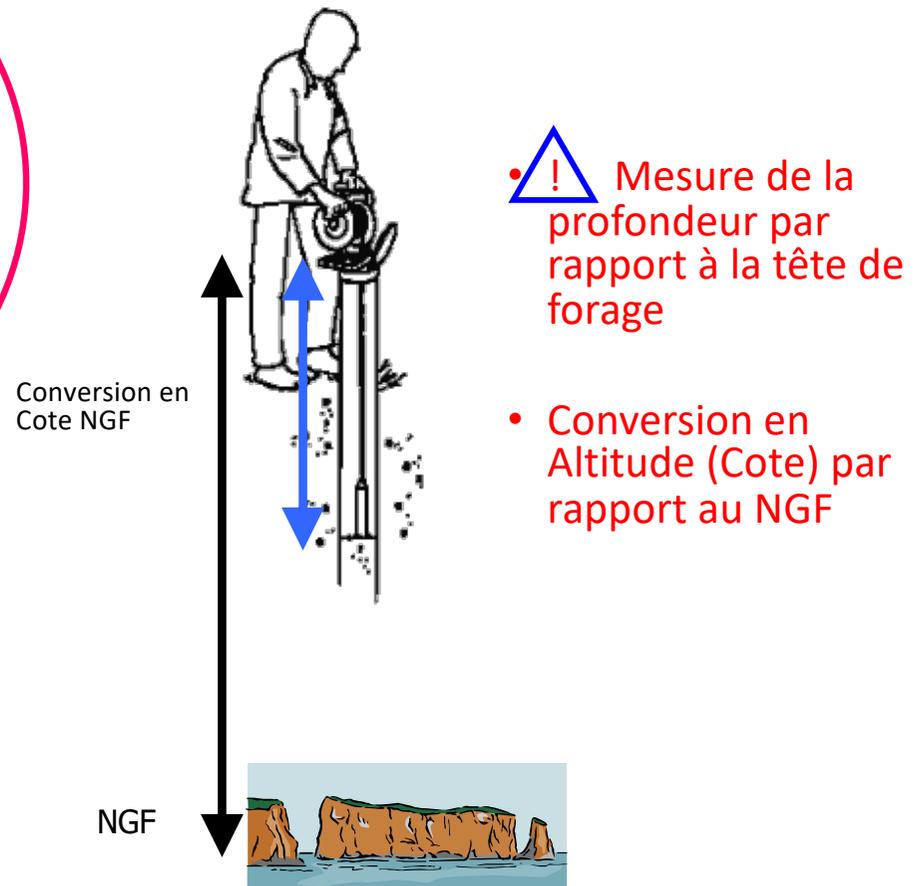
## □ Ecoulement dans la zone saturée

### ▪ Surface piézométrique = niveau d'eau de la nappe

- Niveau d'équilibre entre l'eau de la nappe et la pression atmosphérique
- Mesure dans un puit/forage/**piézomètre** (well/borehole/piezometer) avec une **sonde piézométrique**

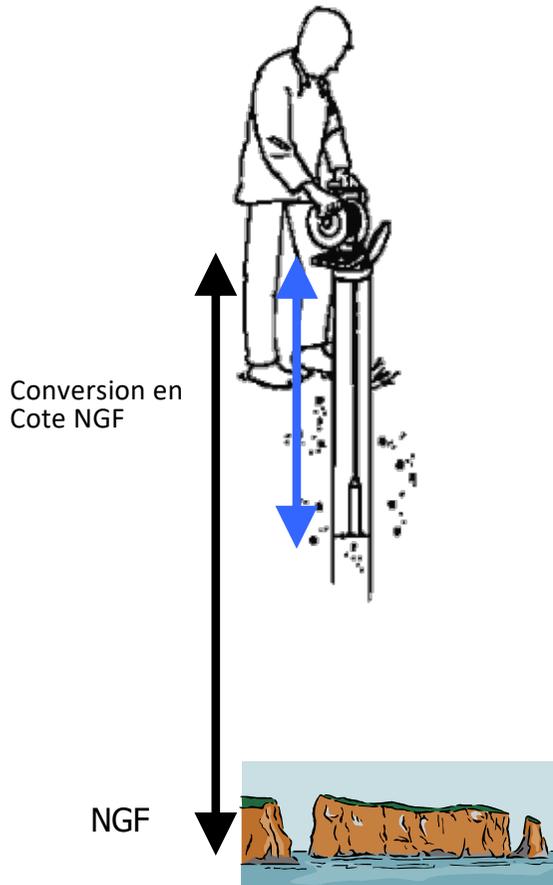


Mesure manuelle

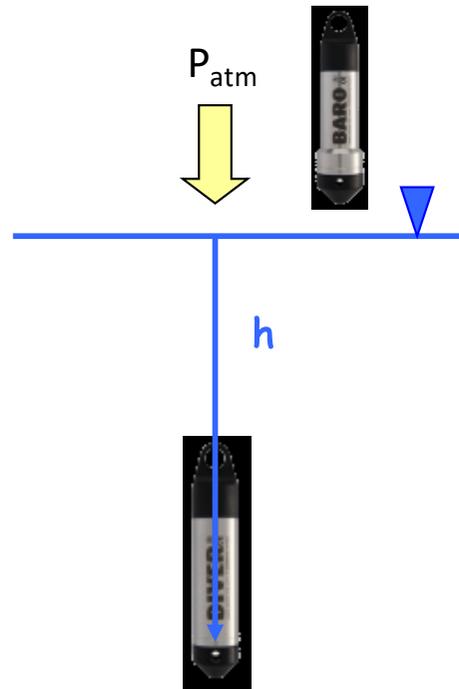


- Ecoulement dans la zone saturée
  - Surface piézométrique

Mesure manuelle



Mesure en continue



$$P_{mes} = \rho gh + P_{atm}$$



Vue de l'intérieur d'un piézomètre

- ! Mesure d'une pression totale
- Correction de la Pression atm
- Conversion en Altitude (Cote) par rapport au NGF en utilisant une mesure manuelle



- ⇒ Correction de la  $P_{atm}$
- ⇒ Conversion en Cote NGF

=> Détermination des variations piézométrique :

- au cours du temps
- dans l'aquifère: détermination du sens et de la direction des écoulements

- **Sortie des nappes = exutoires (point bas)**
  - **Exutoires naturels** (temporaires ou pérennes): sources, émergences



- **Sortie des nappes = exutoires (point bas)**
  - **Exutoires naturels** (temporaires ou pérennes): sources, émergences

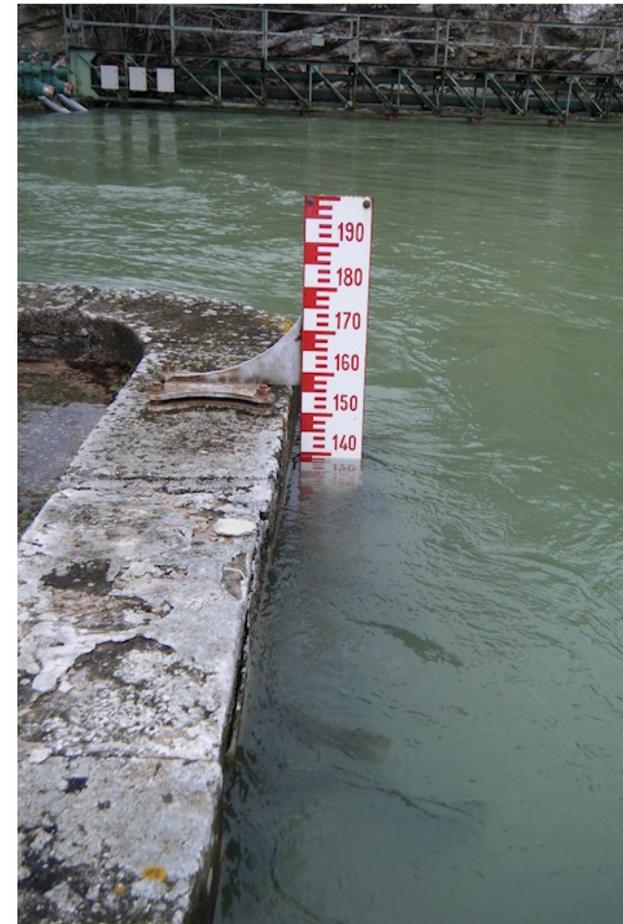


## □ Sortie des nappes = exutoires (point bas)

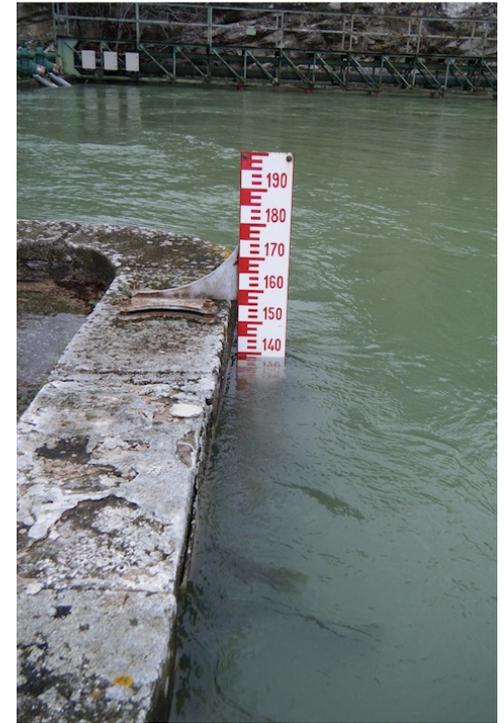
### ▪ Exutoires naturels (temporaires ou pérennes): sources, émergences

#### ▪ Mesure du débit des sources:

- Mesure de débit ponctuel = jaugeage
- Association hauteur / débit = courbe de tarage
- Suivi des hauteurs d'eau



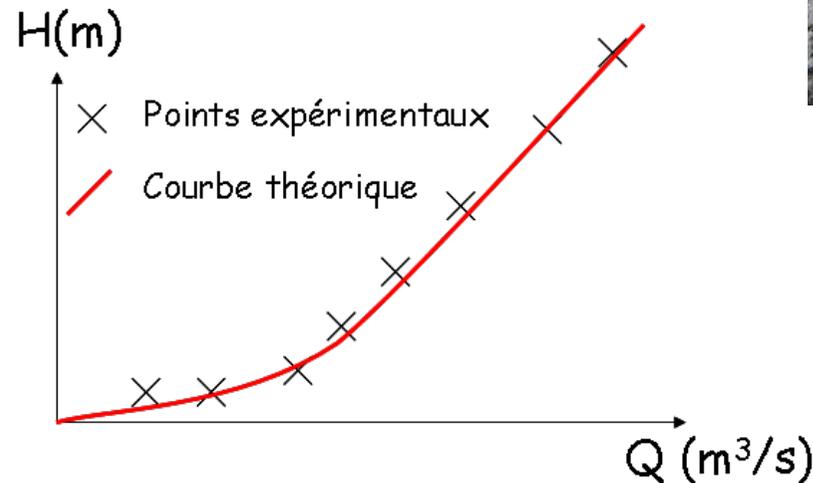
- **Sortie des nappes = exutoires (point bas)**
  - **Exutoires naturels** (temporaires ou pérennes): sources, émergences
    - Mesure du débit des source:
      - Mesure de débit ponctuel = jaugeage
      - Association hauteur / débit = courbe de tarage
      - Suivi des hauteurs d'eau



(Source du Lez, <http://www.medycyss.org>)

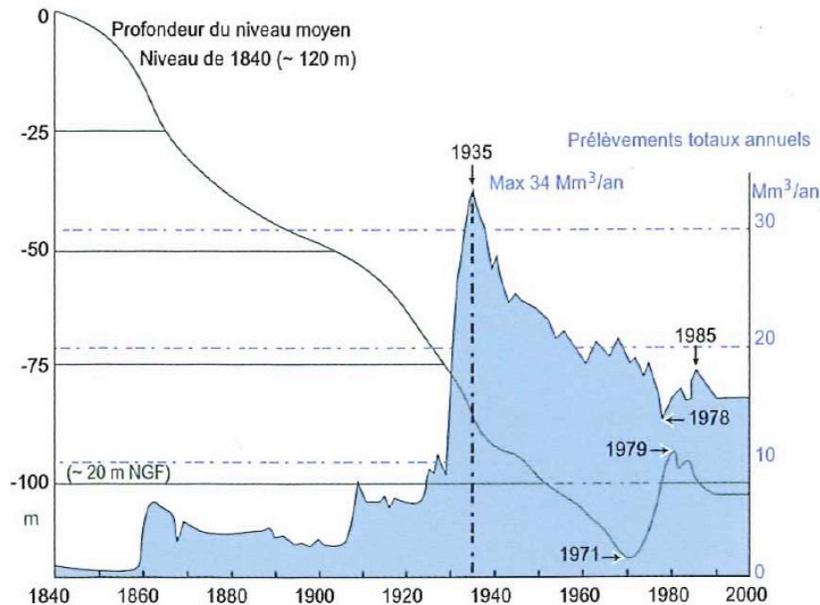
### Station + Échelle

- Chronique de hauteur
  - Jaugeage ponctuel
  - Courbe de tarage
- ⇒ Débit en continu

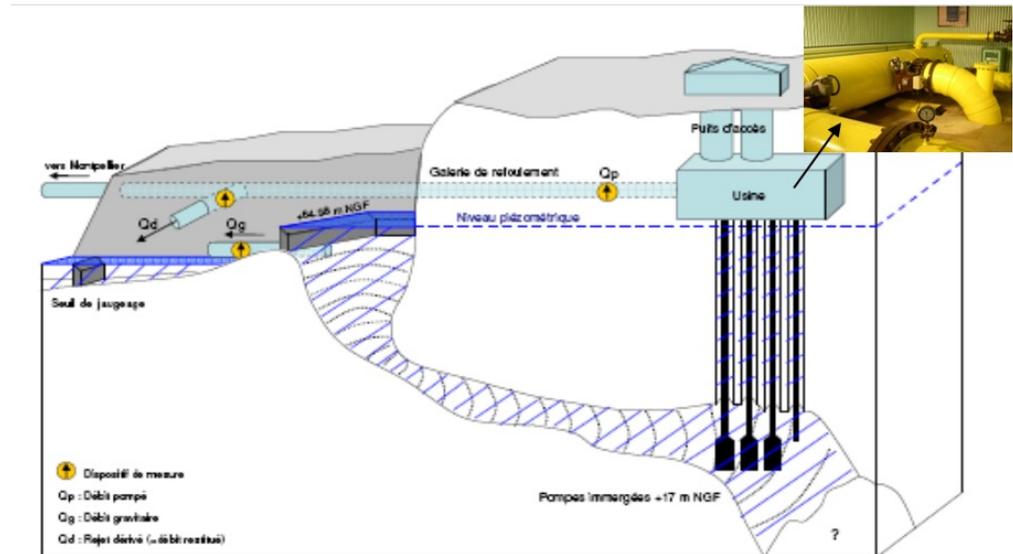




- **Sortie des nappes = exutoires (point bas)**
  - **Exutoires naturels** (temporaires ou pérennes): sources, émergences
    - Mesure du débit des source:
      - Mesure de débit ponctuel = jaugeage
      - Association hauteur / débit = courbe de tarage
      - Suivi des hauteurs d'eau
  - **Exutoires artificiels: forages, puits**



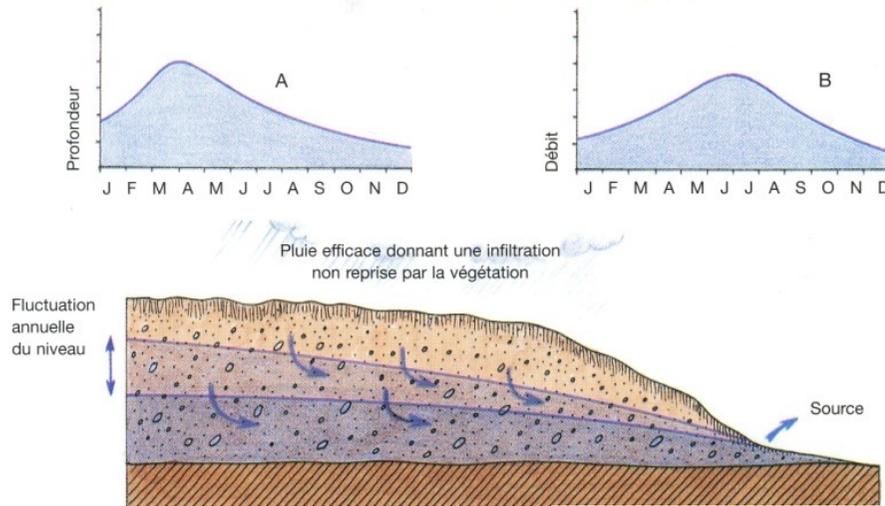
ÉVOLUTION DU NIVEAU DE LA NAPPE DE L'ALBIÉN À PARIS EN FONCTION DES DÉBITS PRÉLEVÉS



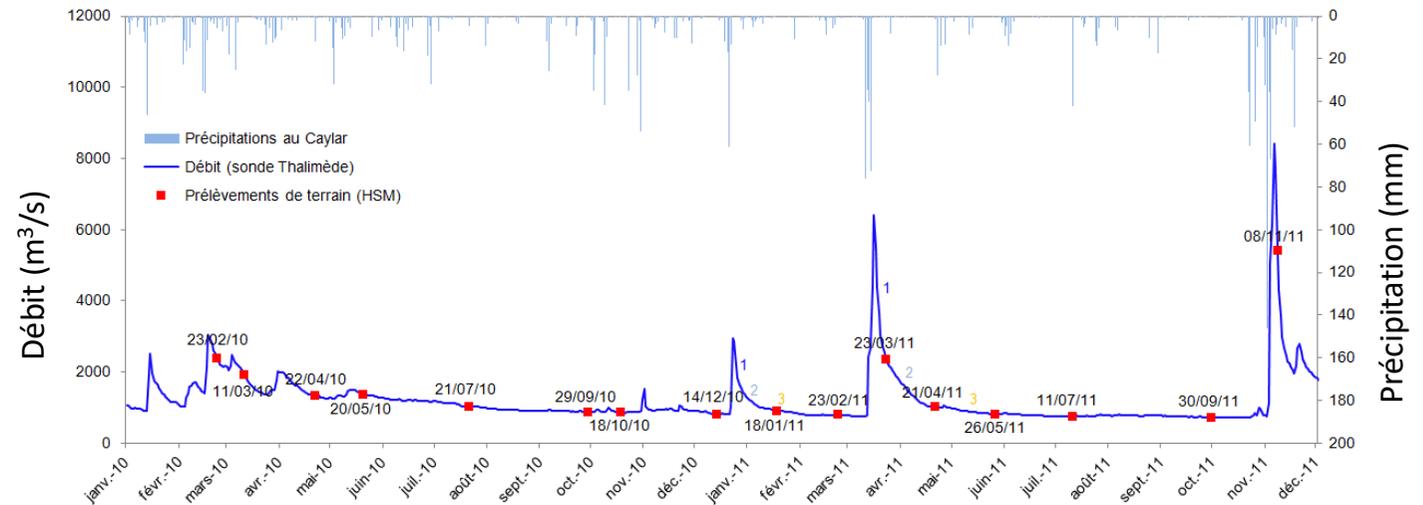
Source du Lez

Sortie des nappes = exutoires (point bas)

- Effet de la recharge par les pluies sur la piézométrie et sur le débit des sources



(Collin, 2006)



Exemple de séries chronologiques de P (mm) et Q (m3/s) (système du Durzon, Larzac)

# HYDROGEOLOGIE GENERALE

## HLST 304



Piezomètre dans le glissement de Super-Sauze, Haute-Provence



Sources d'Ichetucknee, Floride

Site expérimental de Kerrien, Bretagne



### I. Structure et propriétés des aquifères

CM1. L'eau souterraine dans le cycle de l'eau

#### CM2. Caractéristiques du réservoir aquifère

*Est-ce qu'il y a de l'eau dans cette roche?*

##### 1. Alimentation et écoulement des nappes d'eau souterraine

- 1.1. Recharge des nappes
- 1.2. Ecoulement dans la zone saturée
- 1.3. Décharge des nappes

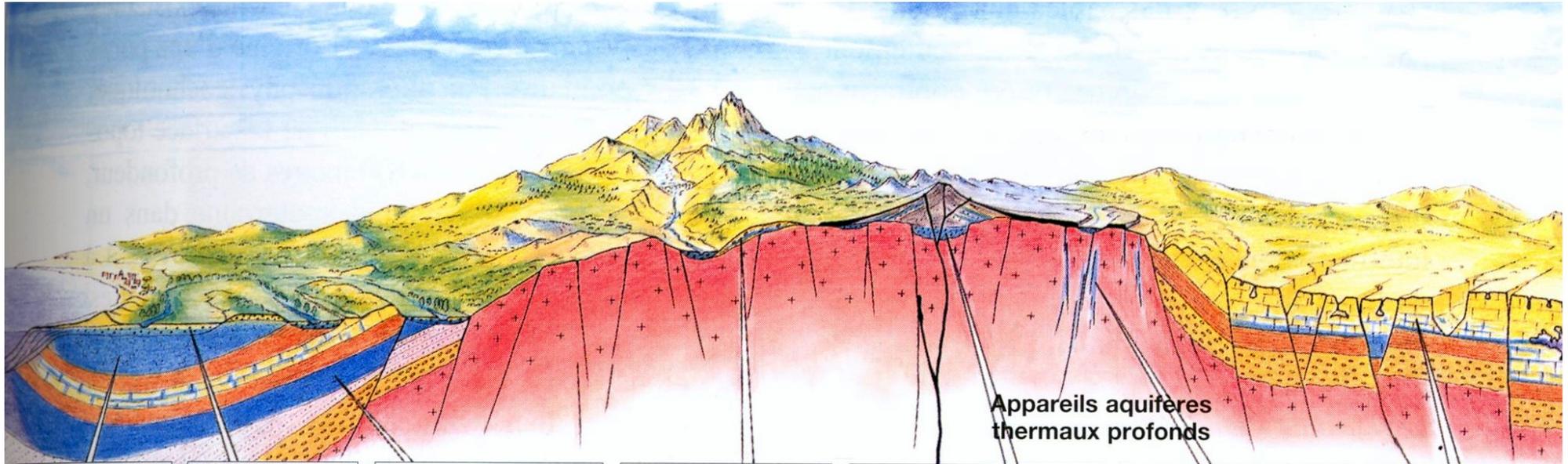
##### 2. Caractéristiques du réservoir aquifère

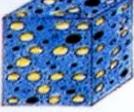
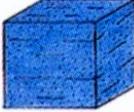
- 2.1. Principaux terrains aquifères de France
- 2.2. Les différents types de réservoirs

**A la fin de ce cours, vous devez être capable de....**

- Représenter schématiquement un aquifère (zone d'alimentation, zone d'émergence, ZNS, ZS, surface piézométrique, substratum,...)
- Citer, représenter schématiquement et décrire les différents types de nappes d'eau souterraine
- Citer et décrire les caractéristiques structurales des grands types d'aquifère
- Citer les différents types de porosité

□ Principaux terrains aquifères



<p><b>Aquifères de roches sédimentaires (libres)</b></p>  <p>Calcaire, craie, grès</p> <p>DEBIT: moyen à élevé</p>	<p><b>Sables et alluvions des vallées</b></p>  <p>Graviers et sables</p> <p>DEBIT: bon à élevé</p>	<p><b>Aquifères sédimentaires profonds (captifs)</b></p>  <p>Formations sédimentaires poreuses. Calcaire, craie, grès</p> <p>DEBIT: bon à élevé</p>	<p><b>Dépôts glaciaires (moraines)</b></p>  <p>Association de blocs, argiles, graviers, sables</p> <p>DEBIT: très variable</p>	<p><b>Aquifères volcaniques</b></p>  <p>Laves et scories</p> <p>DEBIT: excellent dans les scories, faible dans les laves</p>	<p><b>Roches dures fissurées</b></p>  <p>Fractures dans le granite ou autres roches cristallines</p> <p>DEBIT: faible à moyen</p>	<p><b>Aquifères karstiques</b></p>  <p>Cavités dans le calcaire compact</p> <p>DEBIT: très variable</p>
---	---	--	--	---	--	--

Aq. sédimentaires

Aq. alluviaux

Aq. volcanique

Aq. de socle Aq. karstique

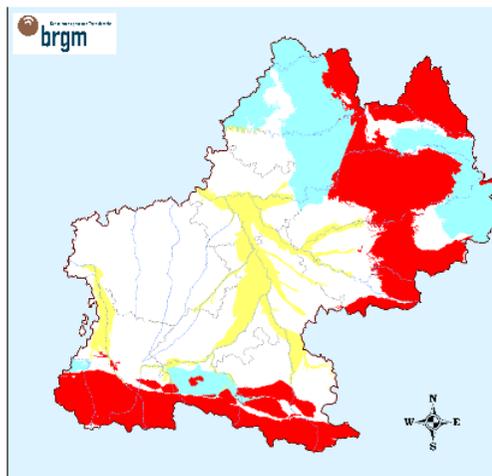
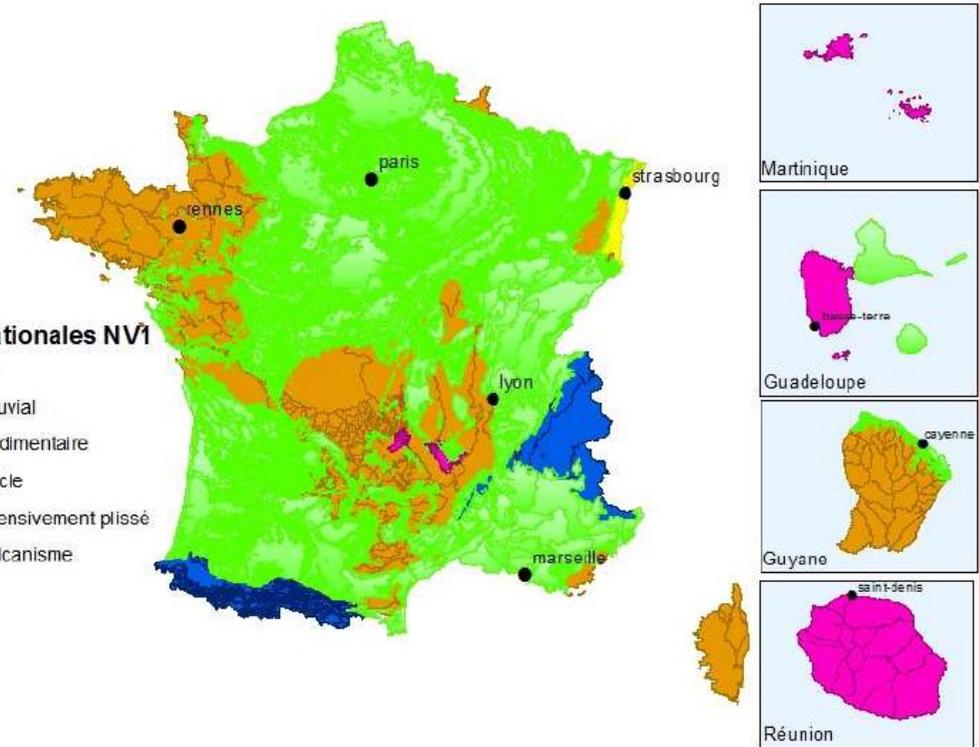
■ Importance relative selon les types de formations géologiques

(b) Les entités hydrogéologiques sont rattachées à 5 grands types de formation géologique :

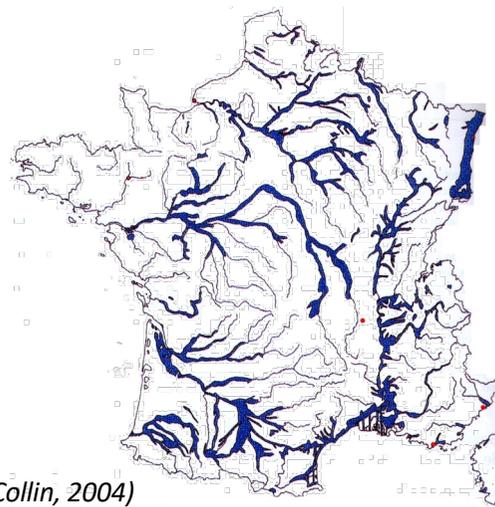
- le sédimentaire (bassin aquitain, bassin parisien, ...) ;
- le socle (massif armoricain, massif central, ...) ;
- l'alluvial ;
- le volcanisme ;
- les formations intensément plissées (massifs montagneux).

Entités nationales NV1 par thème

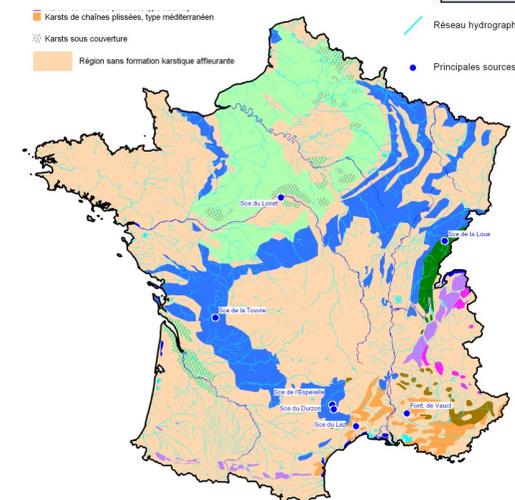
- Alluvial
- Sédimentaire
- Socle
- Intensément plissé
- Volcanisme



- AQUIFERES ALLUVIAUX
- AQUIFERES KARSTIQUE DU JURASSIQUE MOY ET SUP
- AQUIFERES DE SOCLE



(J.J. Collin, 2004)



□ Différents types de réservoirs

- Roches non consolidés/meubles : sables, alluvions, cendres volcaniques...

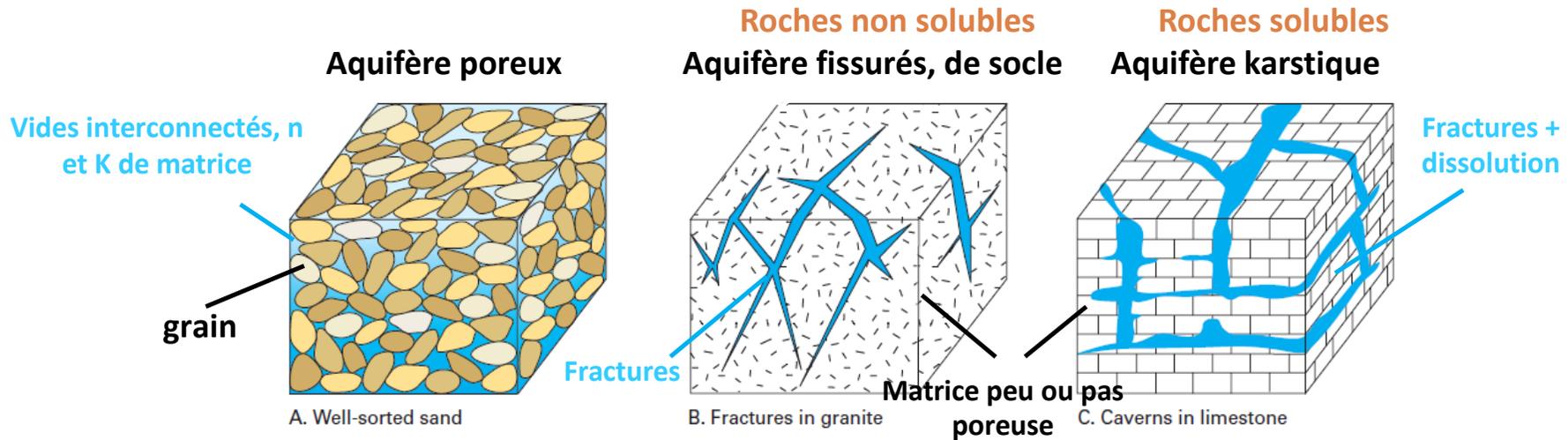
- Roches consolidés/compactes : grès, tufs, calcaires, gneiss, granites

Porosité primaire = n et K de matrice

Porosité secondaire = n et K de fissures, fractures

► Poreux

► Fissurés



Aquifères sédimentaires et alluviaux

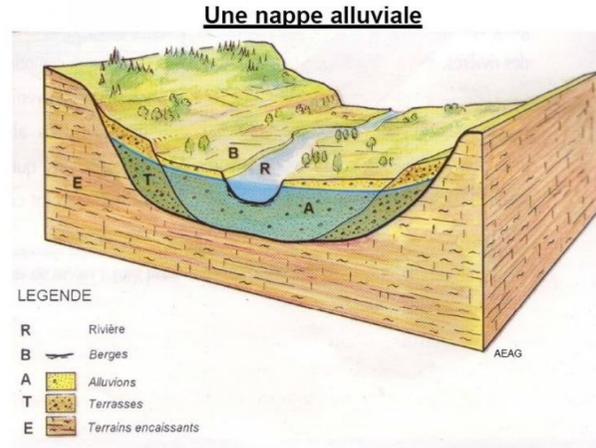
n et K déterminées

n et K évolutives

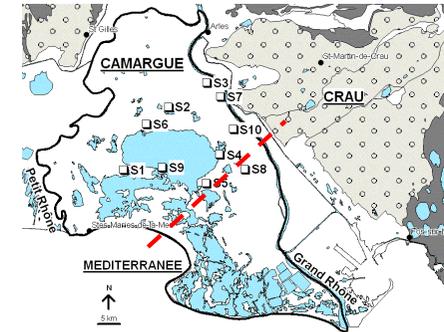
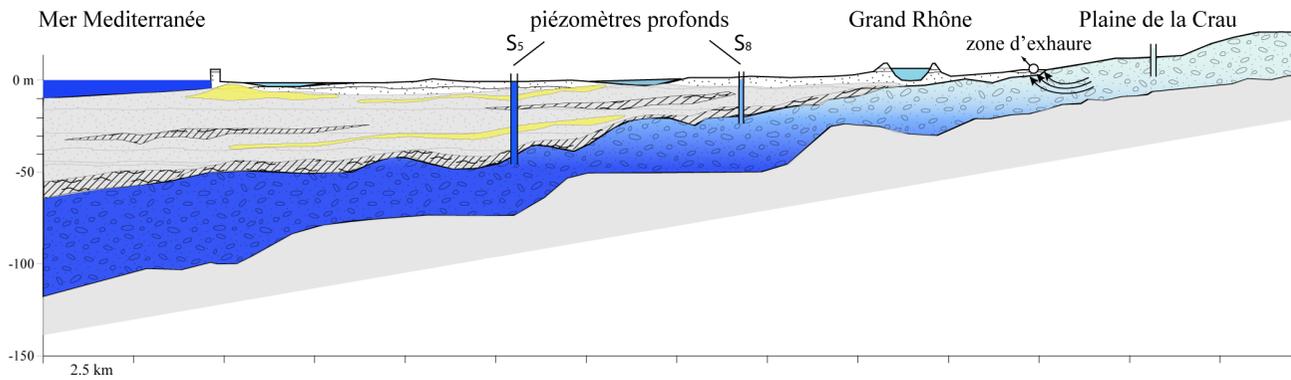
□ **Paysages associés**

**a) Les aquifères poreux**

Les nappes alluviales



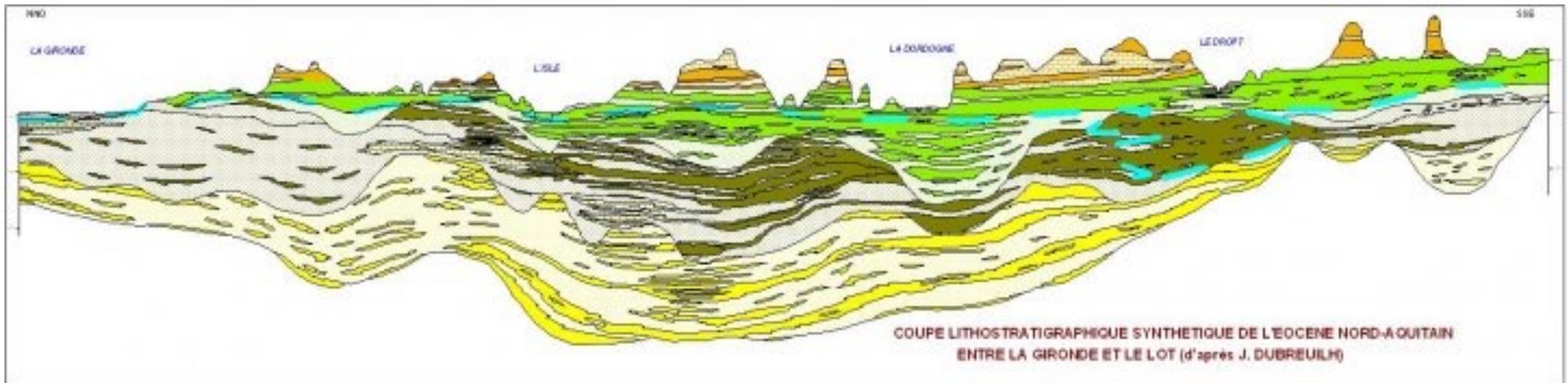
S-W



□ **Paysages associés**

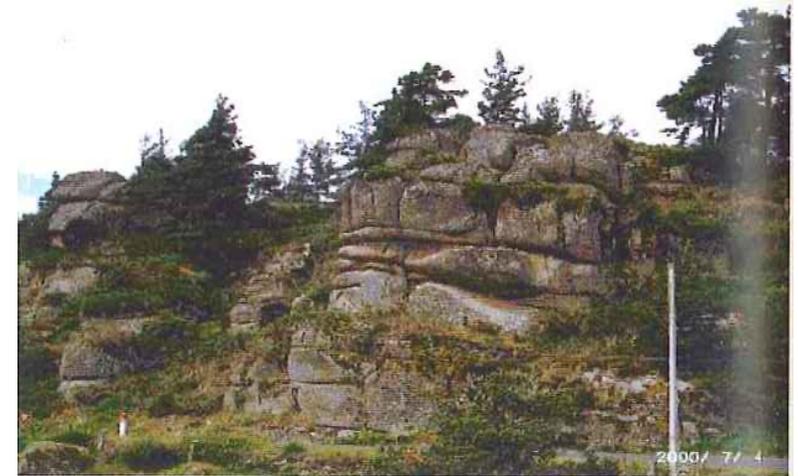
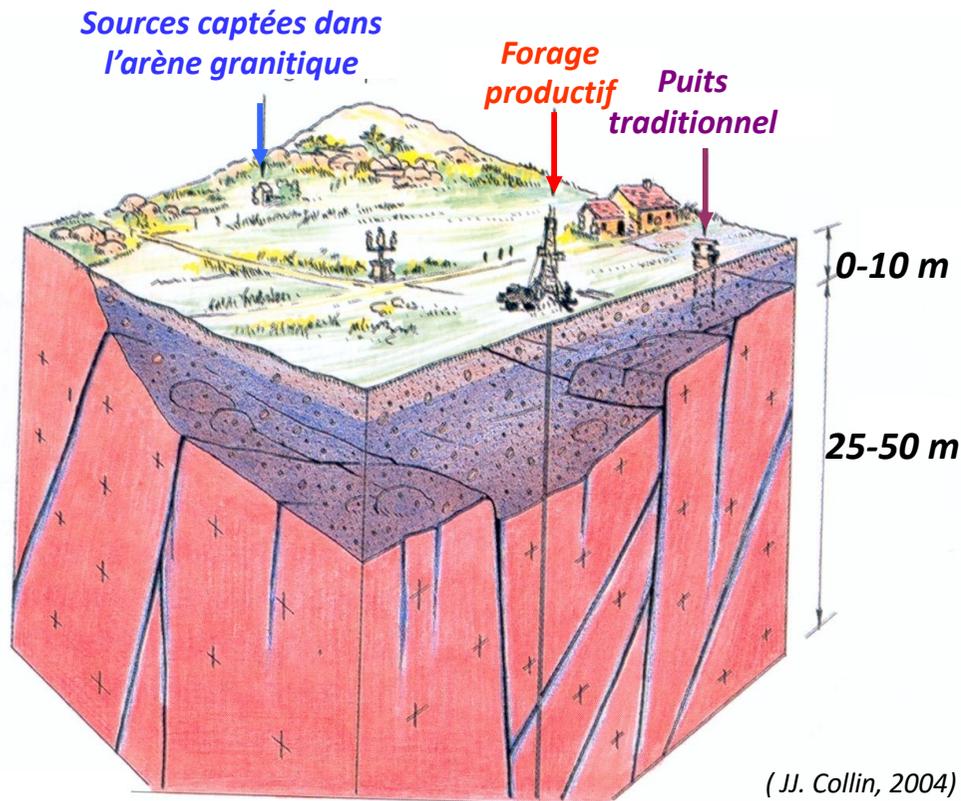
**a) Les aquifères poreux**

Les bassins sédimentaires



STRATIGRAPHIE :		LITHOLOGIE DOMINANTE :	
	PL IO-QUATERNAIRE		Calcaires
	OLIGOCENE		Argiles et marnes
	EOCENE SUPERIEUR		Sables
	EOCENE MOYEN		
	EOCENE INFERIEUR		LIMITE SUPERIEUR DU SYSTEME 214

### b) Aquifères fissurés/fracturés/ de socle



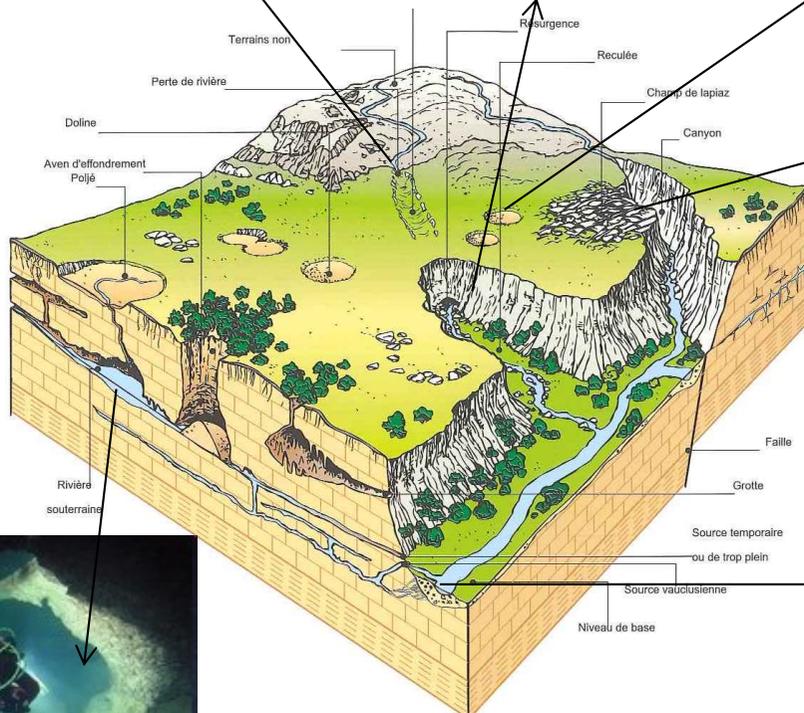
c) Les aquifères karstiques



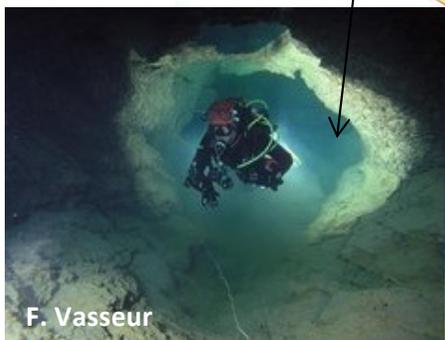
Doline sur le Causse de Sauveterre



Lapiaz



Bakalowicz, 1999



F. Vasseur

⇒ Organisation des vides contrôlée par la circulation de l'eau : karstification



Fontaine de Vaucluse Qmoy = 21 m<sup>3</sup>/s

□ Différents types de réservoirs

- Roches non consolidés/meubles : sables, alluvions, cendres volcaniques...

Porosité primaire = n et K de matrice

▶ Poreux

- Cas particulier:

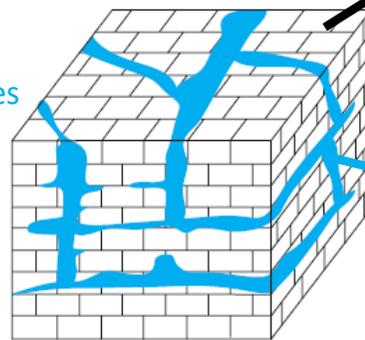
Double porosité (primaire et secondaire)

Exemple: Craie (Orléans, falaise d'Etretat),  
Aquifère de Floride

Porosité de matrice,  
circulations lentes  
type milieu poreux

Porosité de  
conduits,  
circulations rapides

Exemple: Aquifère de Floride



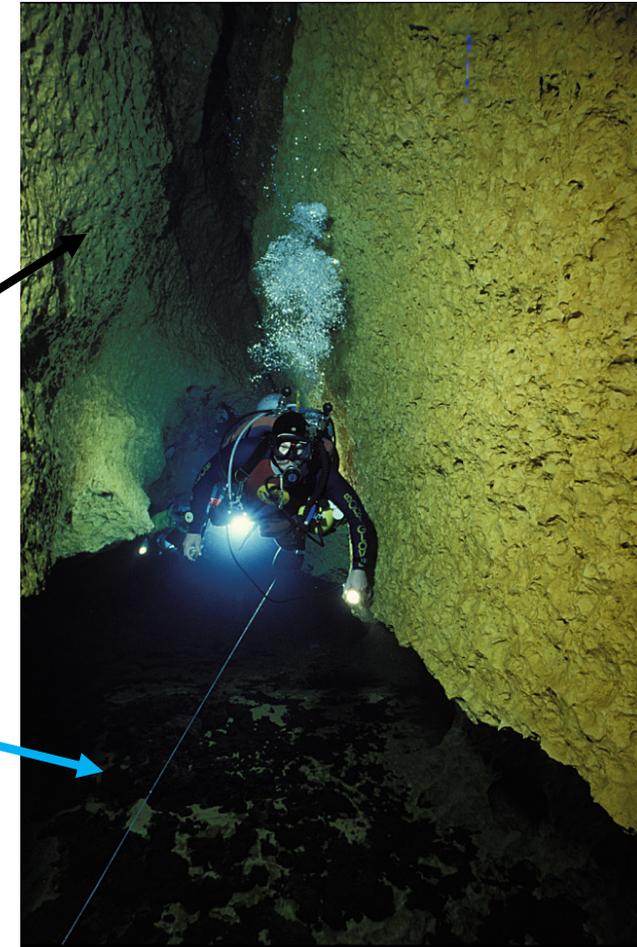
C. Caverns in limestone

Photos Wes Skiles

- Roches consolidés/compactes : grès, tufs, calcaires, gneiss, granites

Porosité secondaire = n et K de fissures, fractures

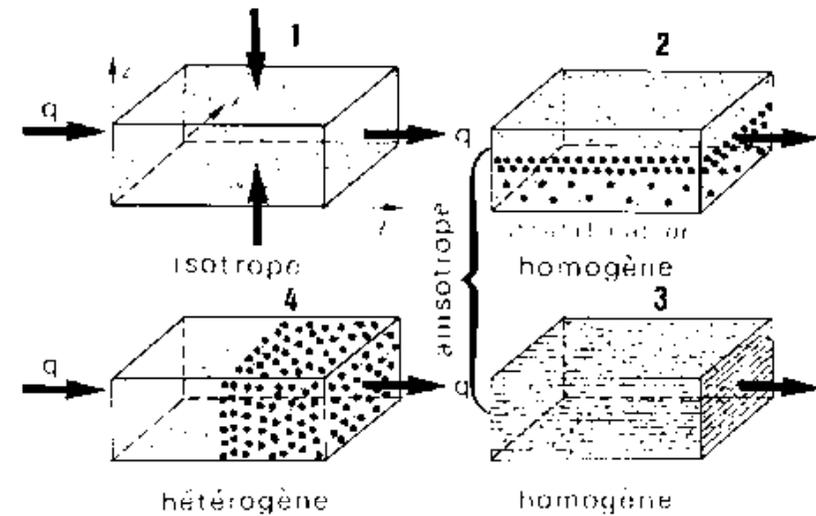
▶ Fissurés



Propriétés du réservoir aquifère

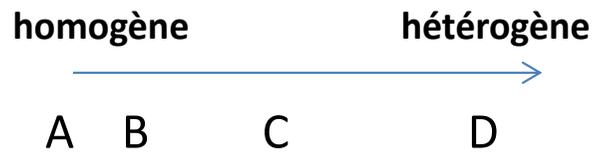
- Continuité ou discontinuité
- Homogénéité ou hétérogénéité
- Isotropie ou anisotropie

Représentativité de l'échelle d'observation?

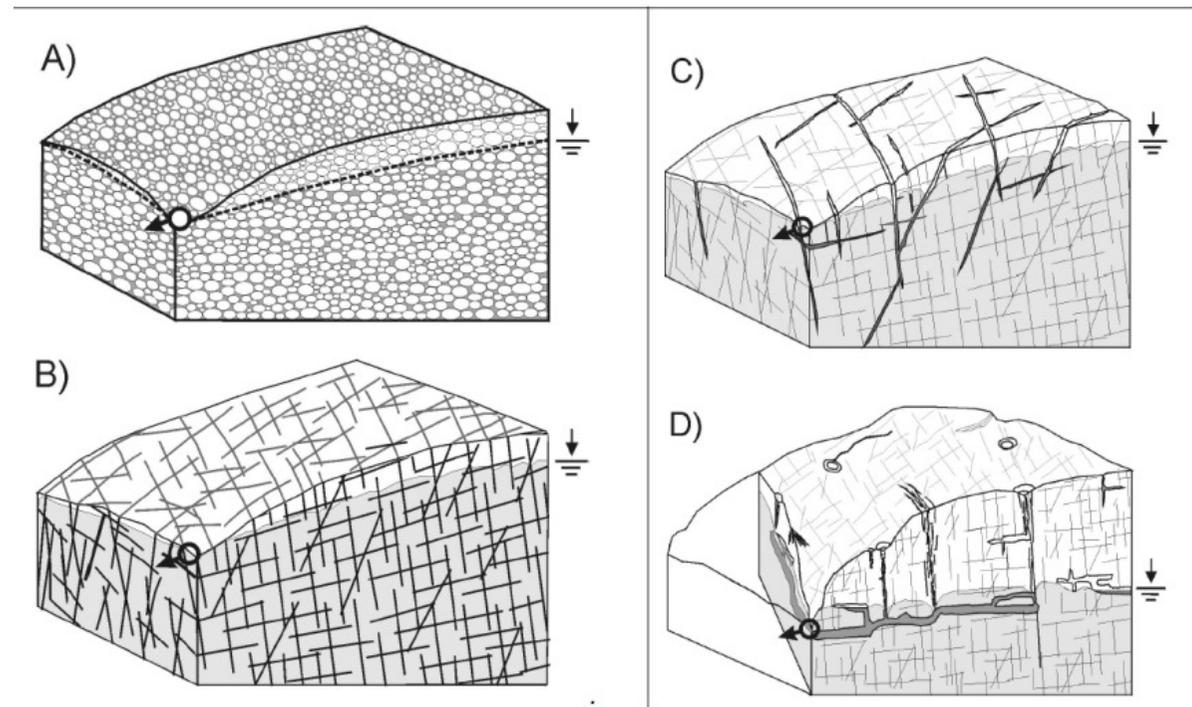


(Castany, 1982)

⇒ Classifier ces milieux du plus homogène au plus hétérogène



(Pochon et Zwahlen, 2003 dans Manuel et méthodes, n° 33, BRGM, 1999)



Propriétés du réservoir aquifère

- Continuité ou discontinuité
- Homogénéité ou hétérogénéité
- Isotropie ou anisotropie

Représentativité de l'échelle d'observation?

VER = Volume Élémentaire Représentatif

	Milieu poreux marin	Milieu poreux continental	Milieu fracturé	Milieu karstique
Homogénéité 10 <sup>-1</sup> m	Homogène	Homogène	Homogène	Homogène
Homogénéité 10 <sup>2</sup> m	Homogène	Très hétérogène	Homogène à peu hétérogène	Très hétérogène
Isotropie	Isotrope	Très anisotrope	Isotrope à anisotrope	Très anisotrope
Taille du VER (m)	10 <sup>-2</sup> à 10 <sup>1</sup>	10 <sup>1</sup> à 10 <sup>3</sup>	10 <sup>1</sup> à 10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup> à 10 <sup>4</sup>
Productivité attendue	Faible à moyenne Irrégulière	Moyenne à forte Irrégulière	Faible à moyenne Régulière	Faible à très forte Irrégulière

(Gilli et al., 2012)

L.Kiraly / Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers 1 (3), September 2003, p.5

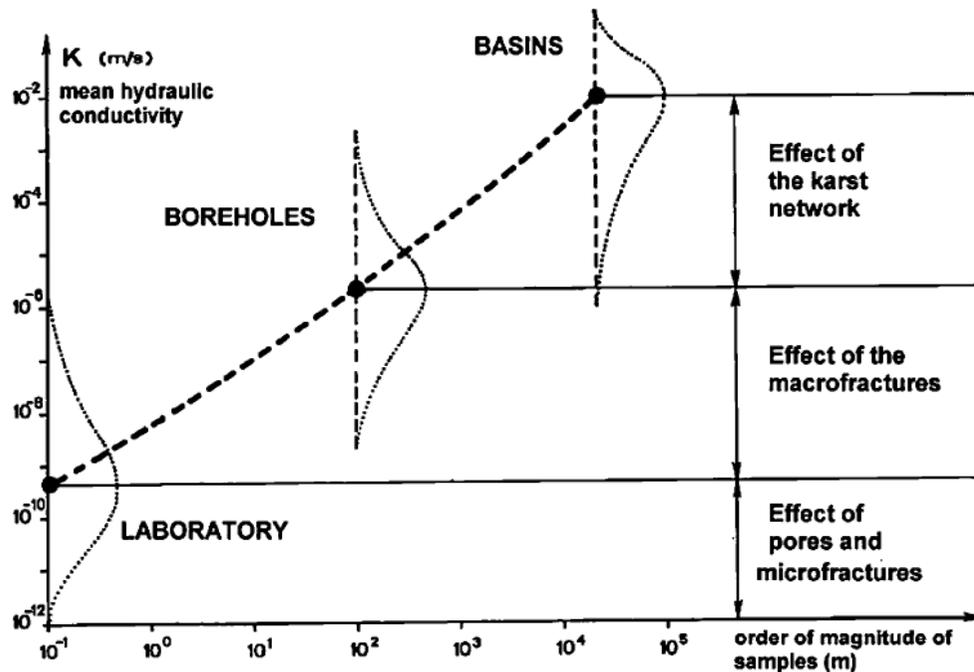
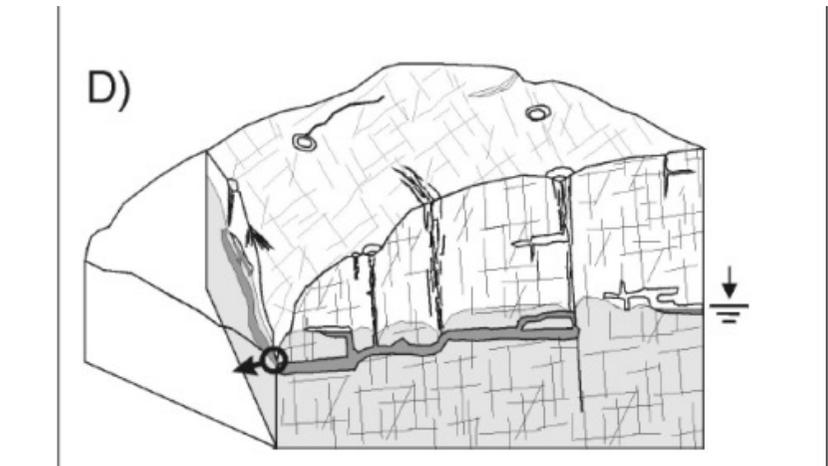
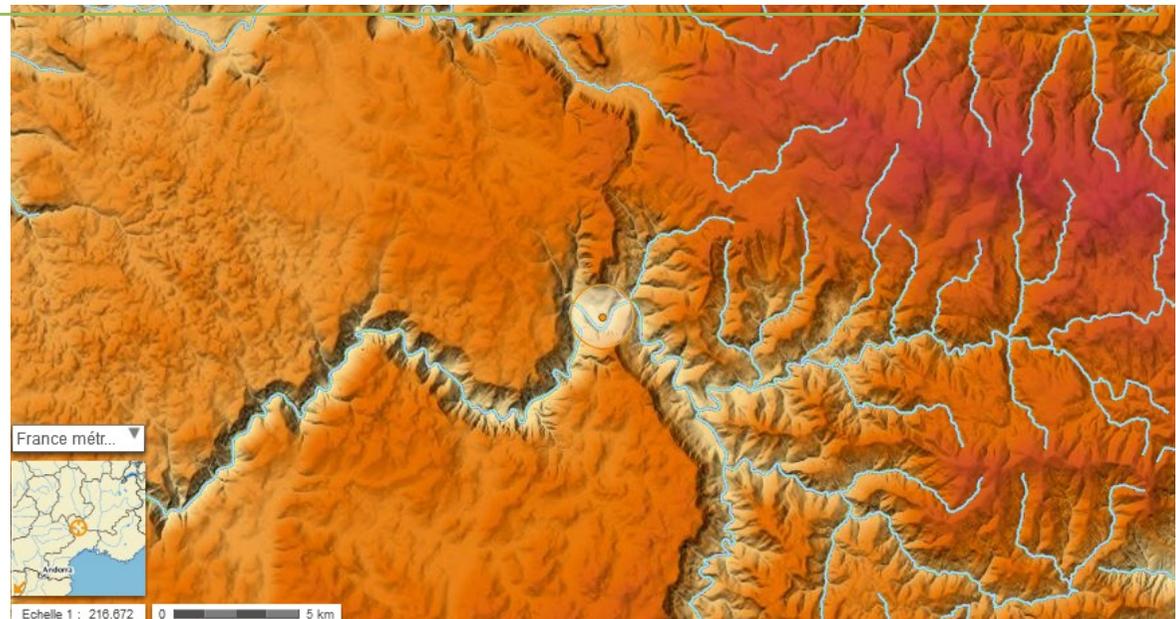


Fig. 3. Scale effect on the hydraulic conductivity in fractured and karstified limestone aquifers (after Kiraly 1975, modified).



## □ Variabilité des propriétés hydrodynamiques

	Alluvial	Karstique	Socle
<b>Hétérogénéité</b>	Faible △ Condition de dépôt	+++	++
<b>K</b>	$10^{-2}$ à $10^{-5}$ m/s	$10^{-7}$ à $10^{-1}$ m/s	Altérites: $10^{-7}$ à $5 \cdot 10^{-6}$ m/s Horizon fissuré: $10^{-6}$ et $5 \cdot 10^{-3}$ m/s
<b>Q moyen</b>	Qlq m <sup>3</sup> /h à 100 <sup>aine</sup> de m <sup>3</sup> /h	1 <sup>ère</sup> source: 21m <sup>3</sup> /s	Nbrses sources, faibles Q
<b>V</b>	100 <sup>aine</sup> de m/an	m/h	



# HYDROGEOLOGIE GENERALE

## HLST 304



Piezomètre dans le glissement de Super-Sauze, Haute-Provence



Forage artésien, Indonésie

Site expérimental de Kerrien, Bretagne



### I. Structure et propriétés des aquifères

CM1. L'eau souterraine dans le cycle de l'eau

CM2. Caractéristiques du réservoir aquifère

**CM3. Caractérisation de la fonction capacitive du réservoir aquifère** *Comment est contenue l'eau dans la roche ? (Cf. TP1-2)*

1. Quantification des vides
2. Caractéristique de l'eau contenue dans ces vides
3. Quantification de l'eau contenue dans ces vides

**A la fin de ce cours, vous devez être capable de....**

- Définir la différence entre la porosité et la porosité efficace
- Citer et décrire les caractéristiques des roches influençant la porosité et la porosité efficace
- Donner la définition de l'emmagasinement
- Calculer le volume d'eau que l'on peut retirer d'une nappe dans le cas d'une nappe libre ou captive

Aquifère = réservoir naturel pouvant contenir et transférer de l'eau

Deux fonctions à considérer :

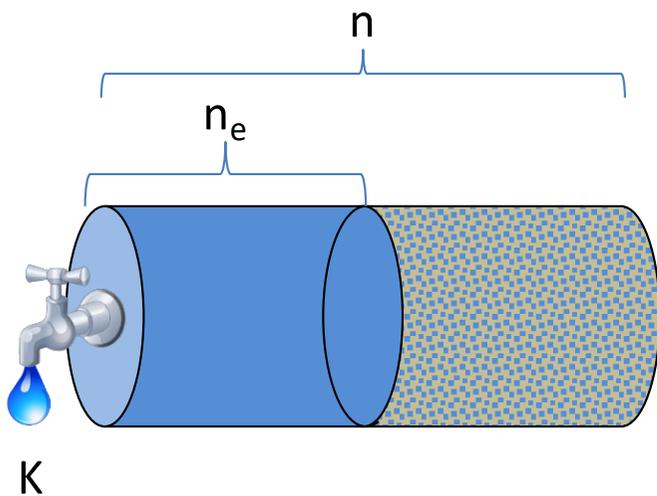
- **Stockage - Fonction capacitive** = volume d'eau contenu dans l'aquifère et pouvant être extrait.  
(Caractéristique du réservoir aquifère)  
dépend de :

- Porosités ( $n$  et  $n_e$ )
- Emmagasinement ( $S$ )
- Volume ( $V$ )

- **Écoulements - Fonction conductrice** = capacité de l'eau à circuler dans l'aquifère.  
(Principes des écoulements souterrains)

Paramètres :

- Gradient ( $i$ )
- Perméabilité = conductivité hydraulique ( $K$ )
- Transmissivité ( $T$ )
- Dispersion



## □ Quantification des vides

### ▪ Porosité $n$ en %

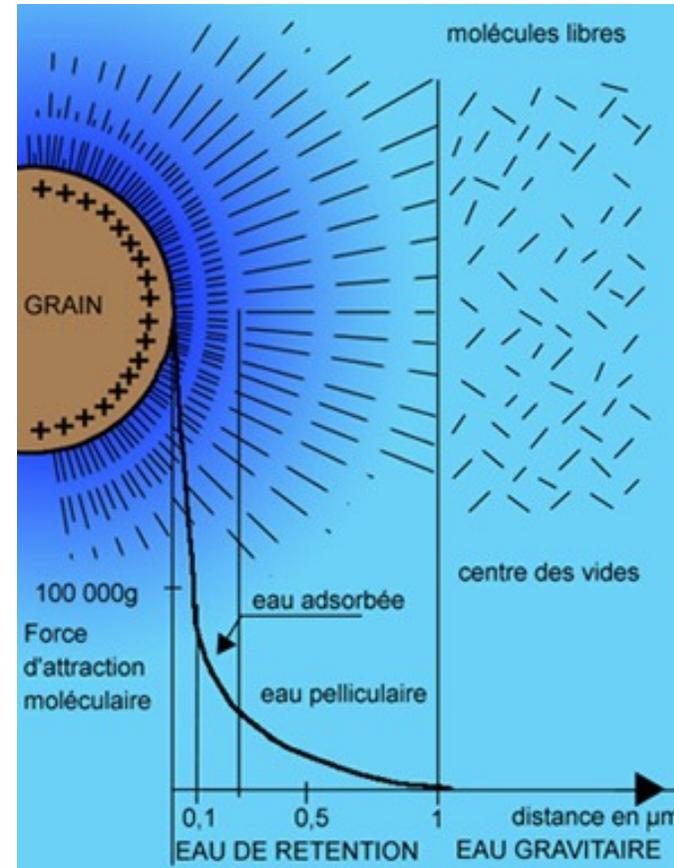
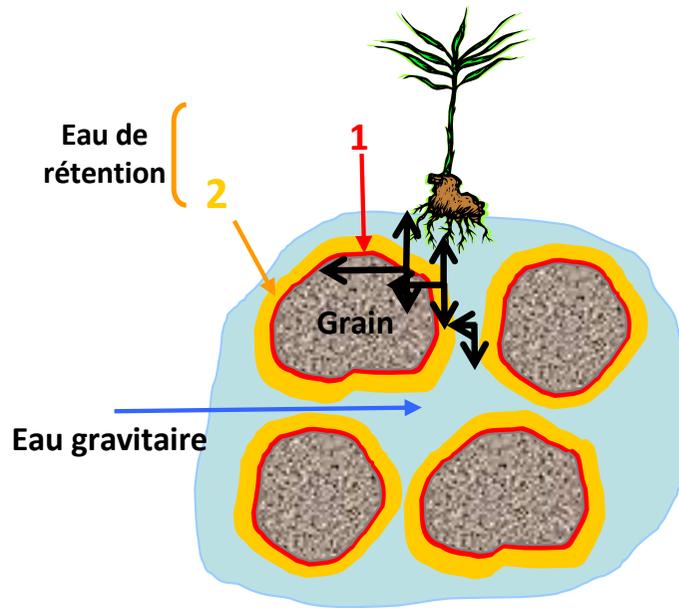
Propriété d'un milieu poreux ou fissuré de comporter des vides interconnectés ou non.

$$n = \frac{V_{vides}}{V_{total}} \times 100$$

Types de sédiments	Porosité (n) %
Gravier moyen	45
Sable gros	38
Sable moyen	40
Sable fin	43
Argile	42

(Castany, 1982)

□ **Caractéristique de l'eau contenue dans les vides**



1. Eau adsorbée : non mobilisable  
 2. Eau liée = pelliculaire

Eau libre :  
 Participe à l'écoulement

## □ Quantification de l'eau contenue dans les vides

### ▪ Teneur en eau $\theta$ en %

Proportion d'eau contenu dans un réservoir saturé ou non.

- Milieu saturé (eau + solide):  $\theta = n$
- Milieu non-saturé (eau + air + solide):  
 $\theta = \text{humidité}$

$$\theta = \frac{V_{\text{eau contenue}}}{V_{\text{total}}} \times 100$$

## □ Quantification de l'eau contenue dans les vides

### ▪ Teneur en eau $\theta$ en %

Proportion d'eau contenu dans un réservoir saturé ou non.

- Milieu saturé (eau + solide):  $\theta = n$
- Milieu non-saturé (eau + air + solide):  
 $\theta = \text{humidité}$

### ▪ Porosité efficace $n_e$ en %

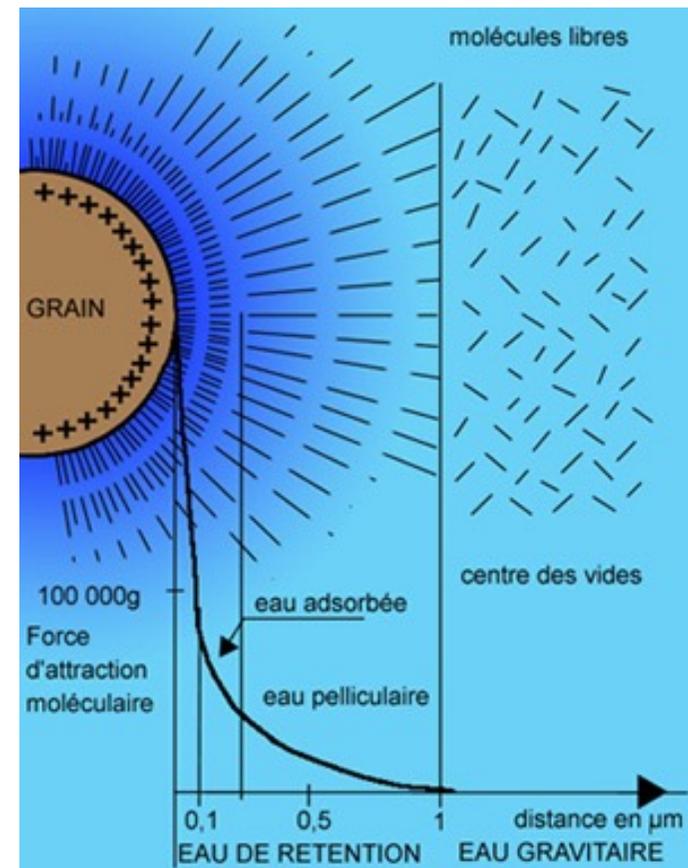
Proportion d'espace poral interconnecté disponible pour l'écoulement gravitaire.

$$V_{\text{gravitaire}} < V_{\text{vides}}$$

$$n_e = \frac{V_{\text{eau gravitaire}}}{V_{\text{total}}} \times 100 < n = \frac{V_{\text{vides}}}{V_{\text{total}}} \times 100$$

Eau adsorbée : non mobilisable  
Eau liée = pelliculaire

Eau libre : Participe à l'écoulement



## □ Quantification de l'eau contenue dans les vides

### ▪ Teneur en eau $\theta$ en %

Proportion d'eau contenu dans un réservoir saturé ou non.

- Milieu saturé (eau + solide):  $\theta = n$
- Milieu non-saturé (eau + air + solide):  
 $\theta = \text{humidité}$

### ▪ Porosité efficace $n_e$ en %

Proportion d'espace porale interconnecté disponible pour l'écoulement gravitaire.

$$n_e = \frac{V_{\text{eau gravitaire}}}{V_{\text{total}}} \times 100$$

Types de sédiments	Porosité (n) %	Porosité efficace (ne) %
Gravier moyen	45	40
Sable gros	38	34
Sable moyen	40	30
Sable fin	43	28
Argile	42	-

(Castany, 1982)

Types de réservoirs	Porosité efficace ( $n_e$ ) %
Graviers	20 à 30
Sables	5 à 20
Alluvions	8 à 10
Calcaire fissuré	2 à 10
Grès fissuré	2 à 15
Granite fissuré	0.1 à 2

(Banton et al., 1997)

- Facteurs influençant la porosité et la porosité efficace

- Granulométrie

Types de sédiments	Porosité TP (n) %
Sable grossier	44
Sable fin	51-54
Sable non trié	36-37

Types de sédiments	$d_{10}$ mm	Porosité (n) %
Gravier moyen	2.5	45
Sable gros	0.250	38
Sable moyen	0.125	40
Sable fin	0.09	43
Argile	0.0002	42

(Castany, 1982)

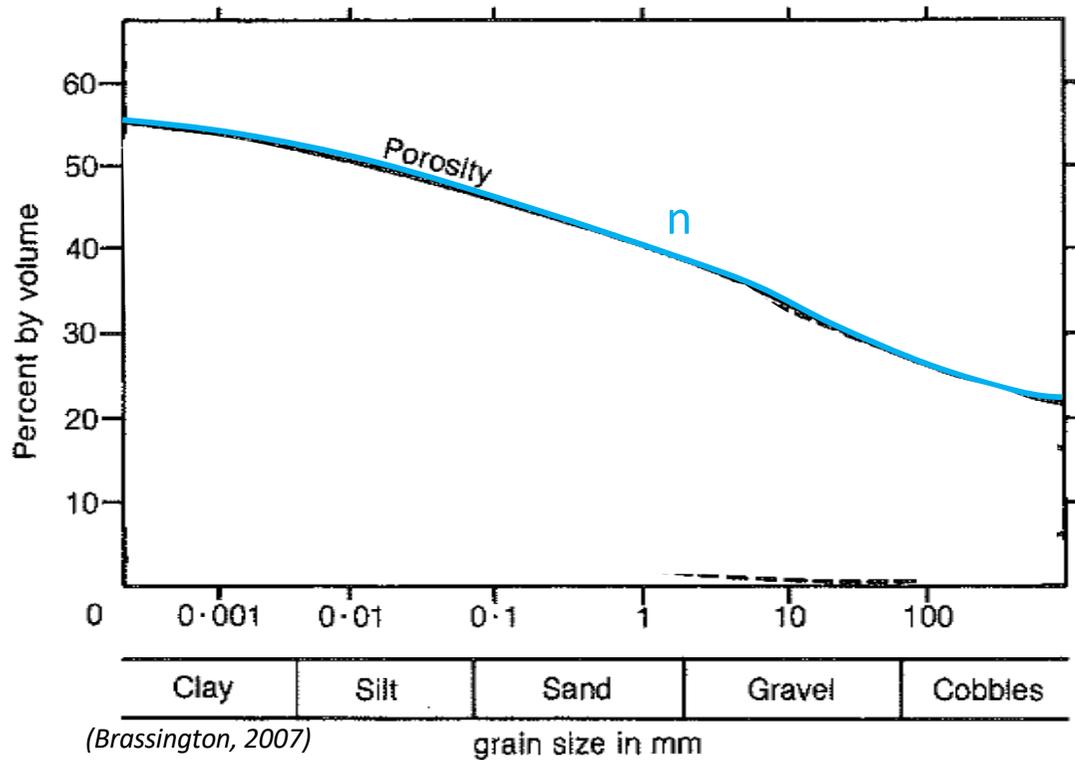
- Variation de la porosité en fonction de la taille des grains?
- Comparaison valeur TP par rapport valeur littérature?

- Facteurs influençant la porosité et la porosité efficace
  - Granulométrie

Types de sédiments	Porosité TP (n) %
Sable grossier	44
Sable fin	51-54
Sable non trié	36-37

Types de sédiments	d <sub>10</sub> mm	Porosité (n) %
Gravier moyen	2.5	45
Sable gros	0.250	38
Sable moyen	0.125	40
Sable fin	0.09	43
Argile	0.0002	42

(Castany, 1982)



- **Facteurs influençant la porosité et la porosité efficace**
  - Granulométrie

Types de sédiments	Porosité TP (n) %	Porosité efficace TP (ne) %
Sable grossier	44	38
Sable fin	51-54	1,1-4
Sable non trié	36-37	1,5-5

Types de sédiments	d <sub>10</sub> mm	Porosité (n) %	Porosité efficace (ne) %
Gravier moyen	2.5	45	40
Sable gros	0.25	38	34
Sable moyen	0.125	40	30
Sable fin	0.09	43	28
Argile	0.0002	42	-

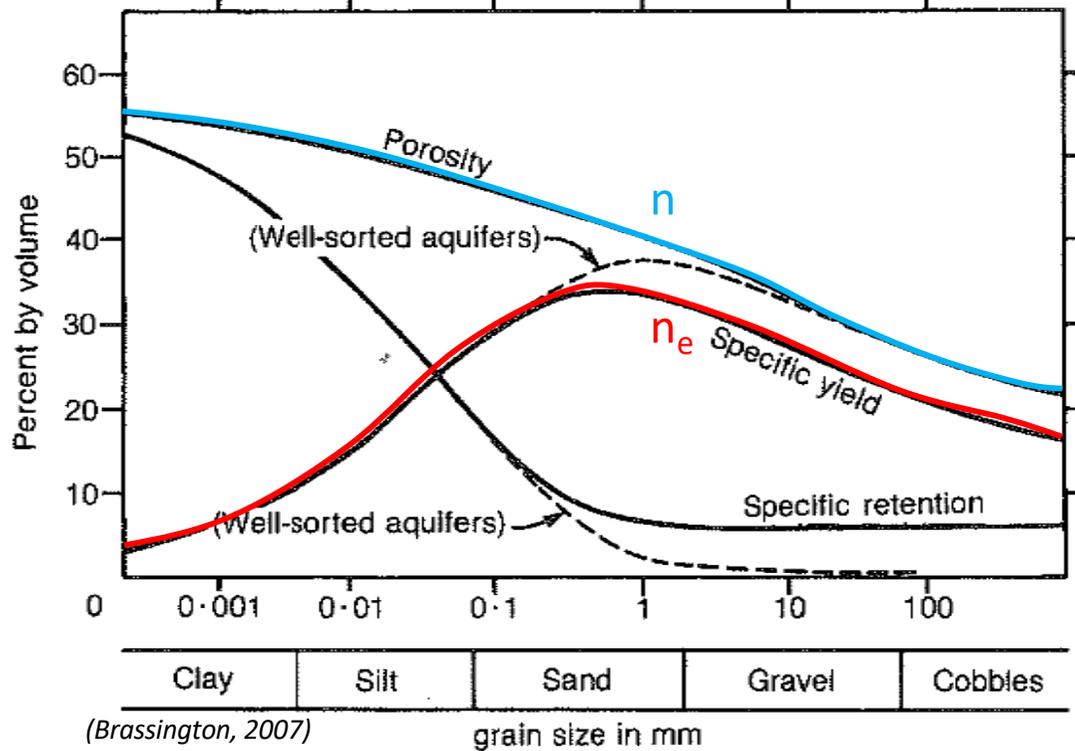
(Castany, 1982)

- Facteurs influençant la porosité et la porosité efficace
  - Granulométrie

Types de sédiments	Porosité TP (n) %	Porosité efficace TP (ne) %
Sable grossier	44	38
Sable fin	51-54	1,1-4
Sable non trié	36-37	1,5-5

Types de sédiments	d <sub>10</sub> mm	Porosité (n) %	Porosité efficace (ne) %
Gravier moyen	2.5	45	40
Sable gros	0.25	38	34
Sable moyen	0.125	40	30
Sable fin	0.09	43	28
Argile	0.0002	42	-

(Castany, 1982)

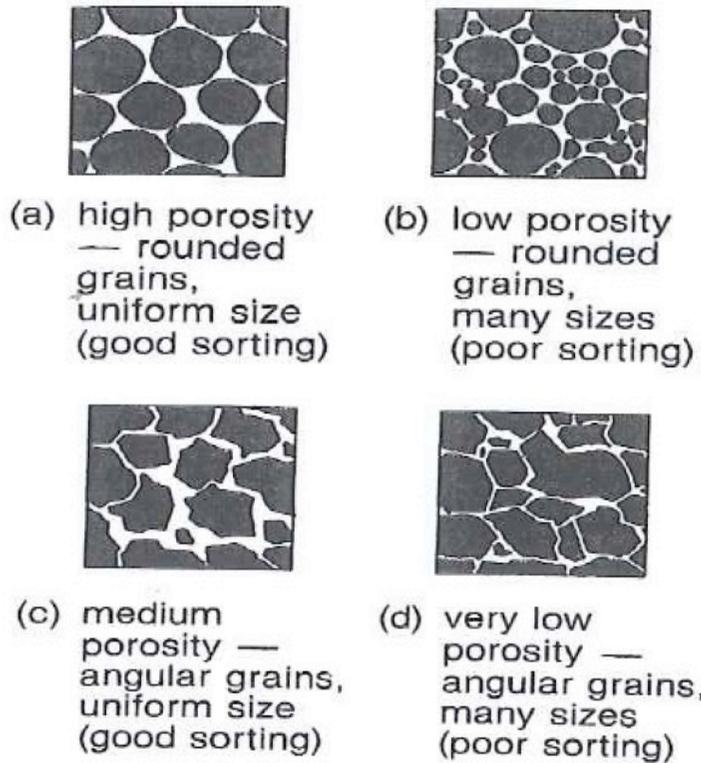


(Brassington, 2007)

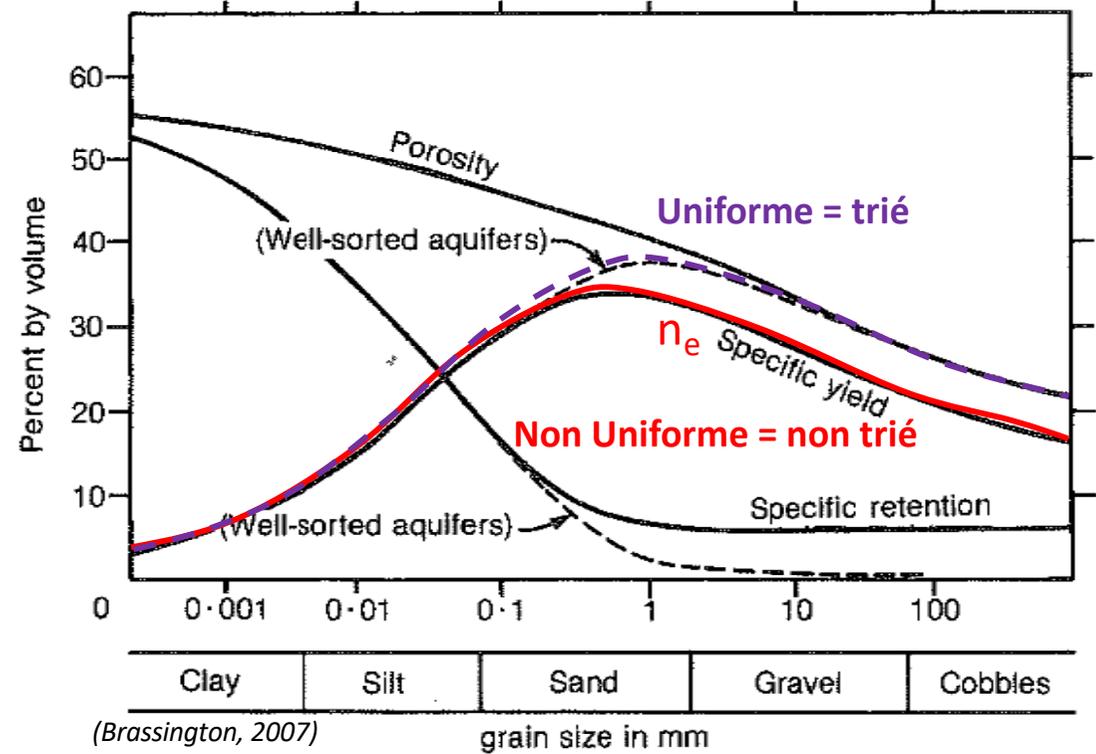
Facteurs influençant la porosité et la porosité efficace

- Granulométrie
- Uniformité/Arrangement des grains

Types de sédiments	Porosité efficace TP ( $n_e$ ) %
Sable grossier	38
Sable fin	1-4
Sable non trié	1,5-5



Brassington, 1998

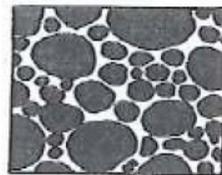


▪ **Facteurs influençant la porosité et la porosité efficace**

- Granulométrie
- Uniformité/Arrangement des grains
- Forme des grains/type de roche



(a) high porosity — rounded grains, uniform size (good sorting)



(b) low porosity — rounded grains, many sizes (poor sorting)



(c) medium porosity — angular grains, uniform size (good sorting)



(d) very low porosity — angular grains, many sizes (poor sorting)

Types de réservoirs	Porosité efficace ( $n_e$ ) %
Graviers	20 à 30
Sables	5 à 20
Alluvions	8 à 10
Calcaire fissuré	2 à 10
Grès fissuré	2 à 15
Granite fissuré	0.1 à 2

(Banton et al., 1997)

▪ **Facteurs influençant la porosité et la porosité efficace**

- Granulométrie
- Uniformité/Arrangement des grains
- Forme des grains/type de roche
- Tassement

arrangement cubique n=47%

rhomboédrique (tassé) n= 26%

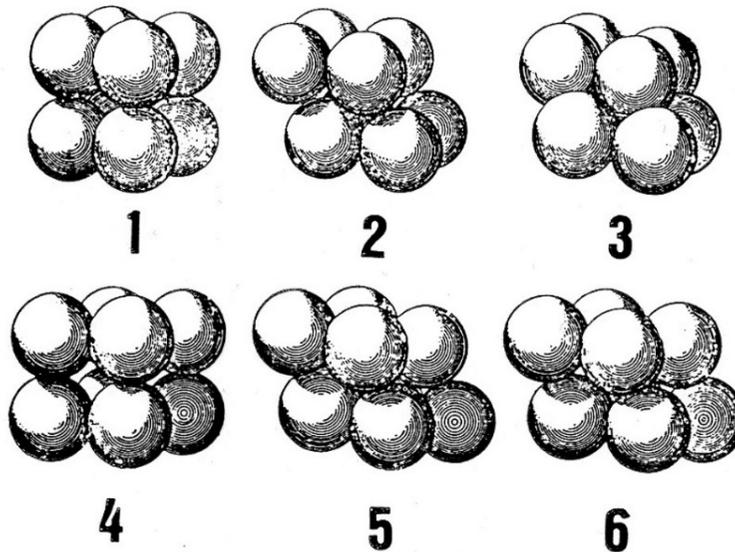
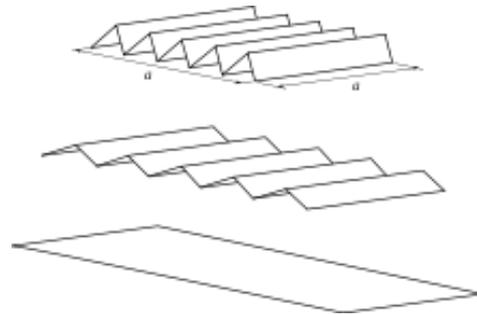


Figure 44 - La porosité totale, donc la porosité efficace, dépend de l'arrangement des grains. D'après Graton et Fraser. Elle décroît de 47,6 % pour le type 1, cubique à 25,9 % pour le type 6, rhomboédrique.

**▪ Facteurs influençant la porosité et la porosité efficace**

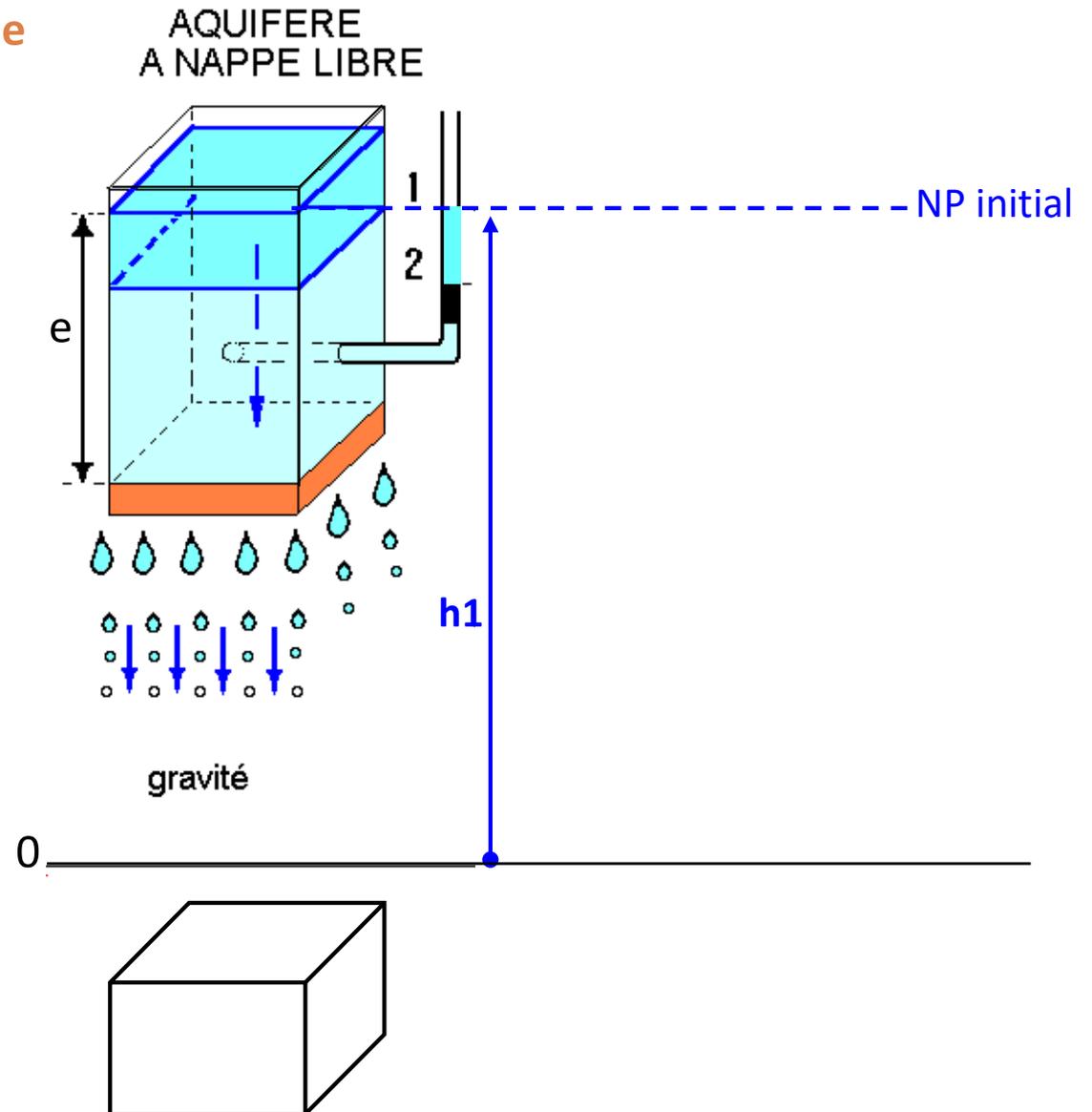
- Granulométrie
- Uniformité/Arrangement des grains
- Forme des grains/type de roche
- Tassement
- Surface spécifique



### □ Quantification de l'eau contenue dans les vides

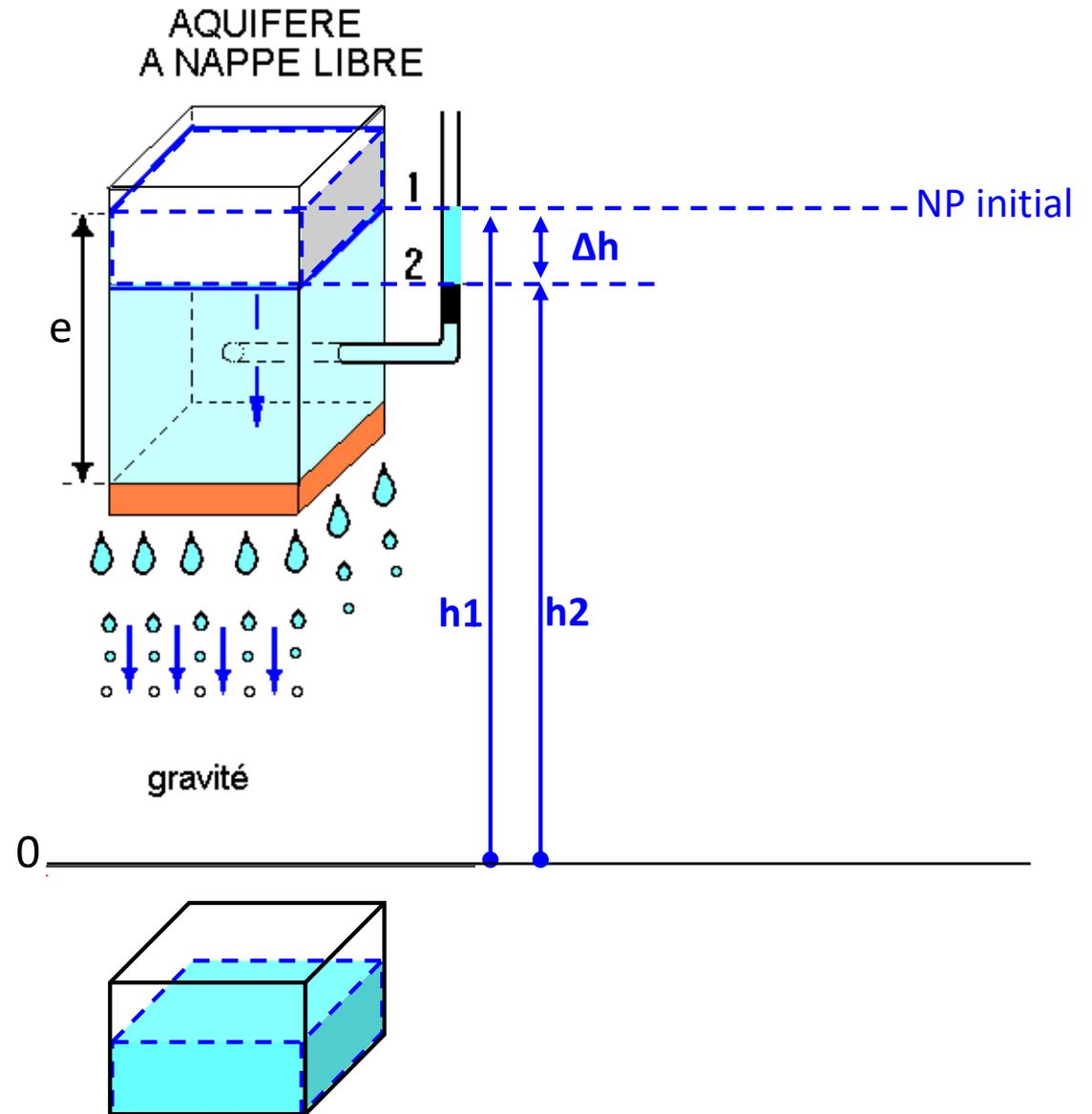
- Teneur en eau  $\theta$  en %
- Porosité efficace  $n_e$
- Emmagasinement  $S$

Quantité d'eau libérée par un abaissement du niveau d'eau ( $\Delta h$ )?



- Teneur en eau  $\theta$  en %
- Porosité efficace  $n_e$
- Emmagasinement  $S$

Quantité d'eau libérée par un abaissement unitaire du niveau d'eau ( $\Delta h$ )?

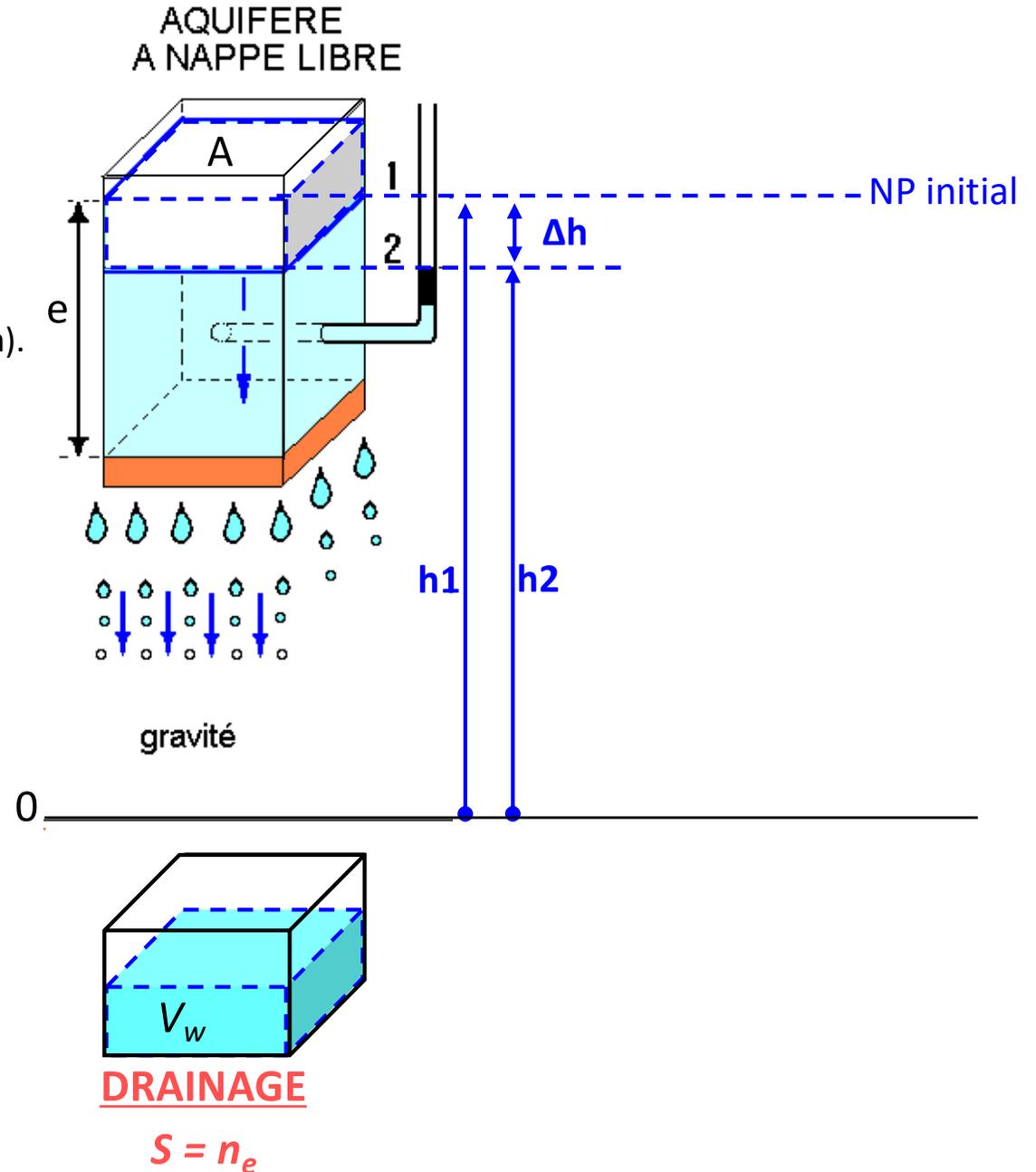


- Teneur en eau  $\theta$  en %
- Porosité efficace  $n_e$
- Emmagasinement  $S$

Volume d'eau que peut libérer l'aquifère par unité de surface ( $A=1m^2$ ) suite à un abaissement unitaire du niveau d'eau ( $\Delta h=1m$ ).

$$S = \frac{V_w}{\Delta h \cdot A}$$

- Aquifère libre:  $0.05 < S = n_e < 0.35$

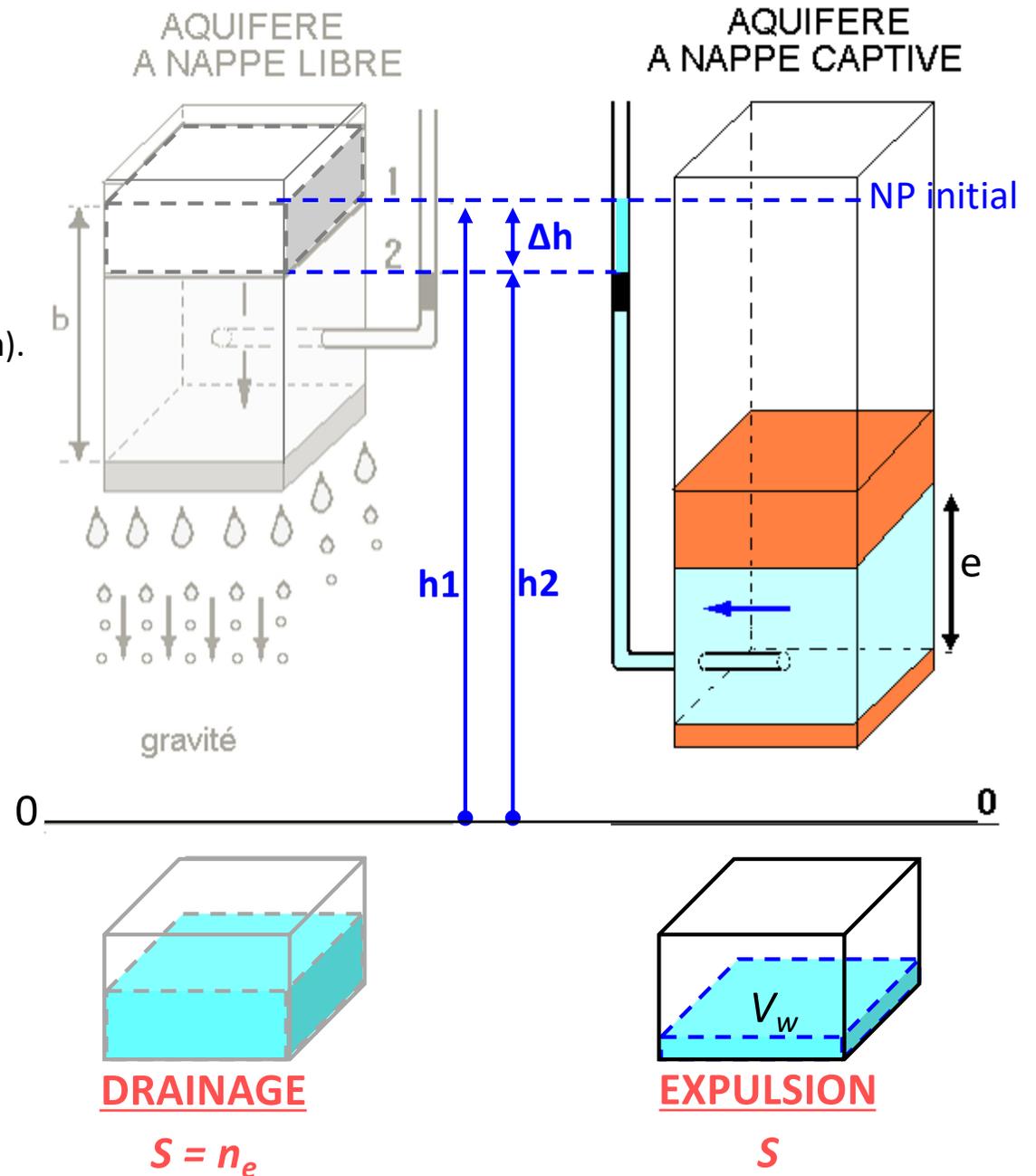


- Teneur en eau  $\theta$  en %
- Porosité efficace  $n_e$
- Emmagasinement  $S$

Volume d'eau que peut libérer l'aquifère par unité de surface ( $A=1m^2$ ) suite à un abaissement unitaire du niveau d'eau ( $\Delta h=1m$ ).

$$S = \frac{V_w}{\Delta h \cdot A}$$

- Aquifère libre:  $0.05 < S < 0.35$

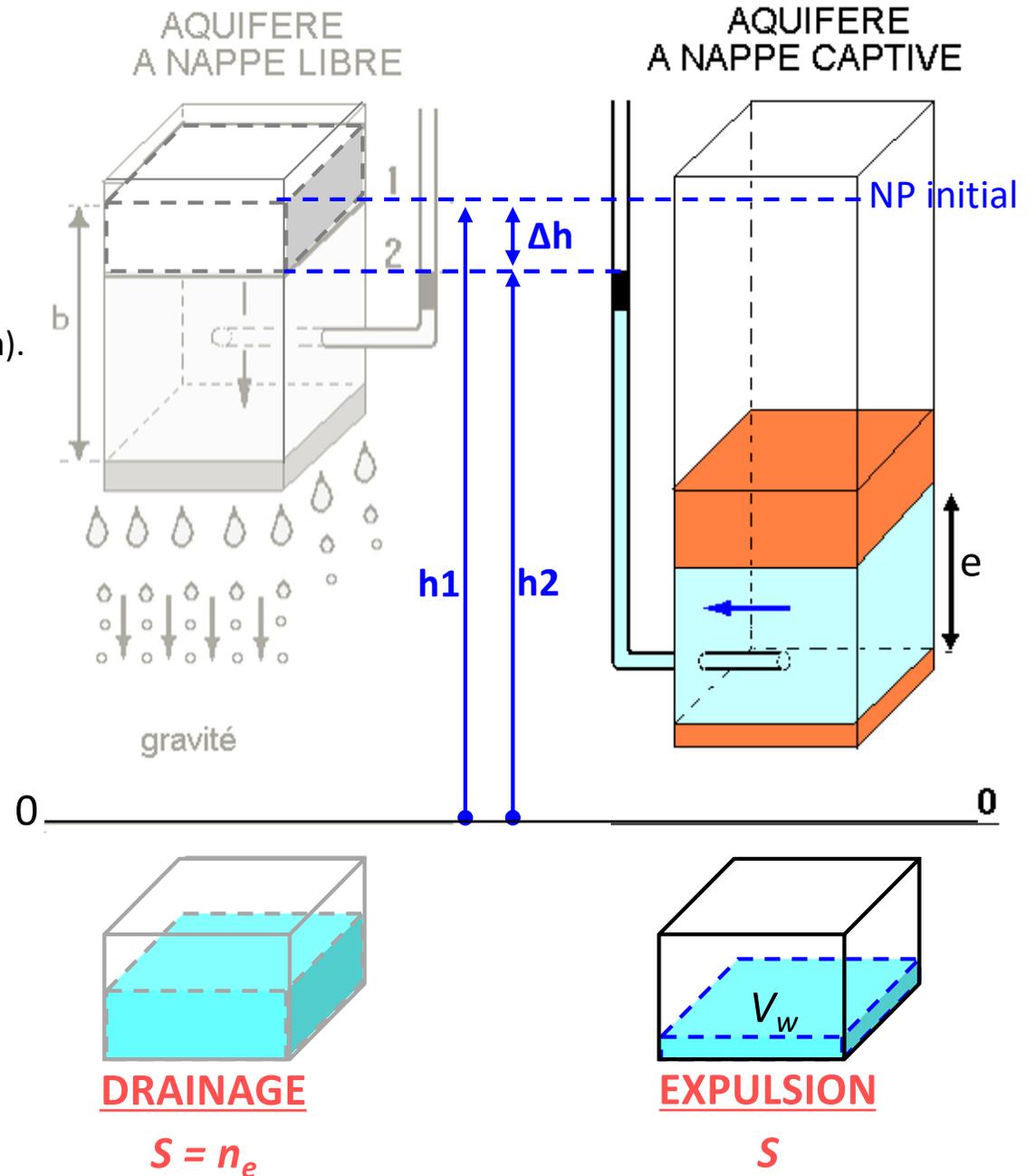


- Teneur en eau  $\theta$  en %
- Porosité efficace  $n_e$
- Emmagasinement  $S$

Volume d'eau que peut libérer l'aquifère par unité de surface ( $A=1m^2$ ) suite à un abaissement unitaire du niveau d'eau ( $\Delta h=1m$ ).

$$S = \frac{V_w}{\Delta h \cdot A}$$

- Aquifère libre:  $0.05 < S < 0.35$
- Aquifère captif:  $10^{-6} < S < 0.001$



- Teneur en eau  $\theta$  en %
- Porosité efficace  $n_e$
- Emmagasinement  $S$

Volume d'eau que peut libérer l'aquifère par unité de surface ( $A=1m^2$ ) suite à un abaissement unitaire du niveau d'eau ( $\Delta h=1m$ ).

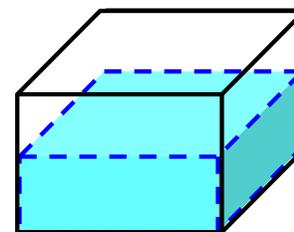
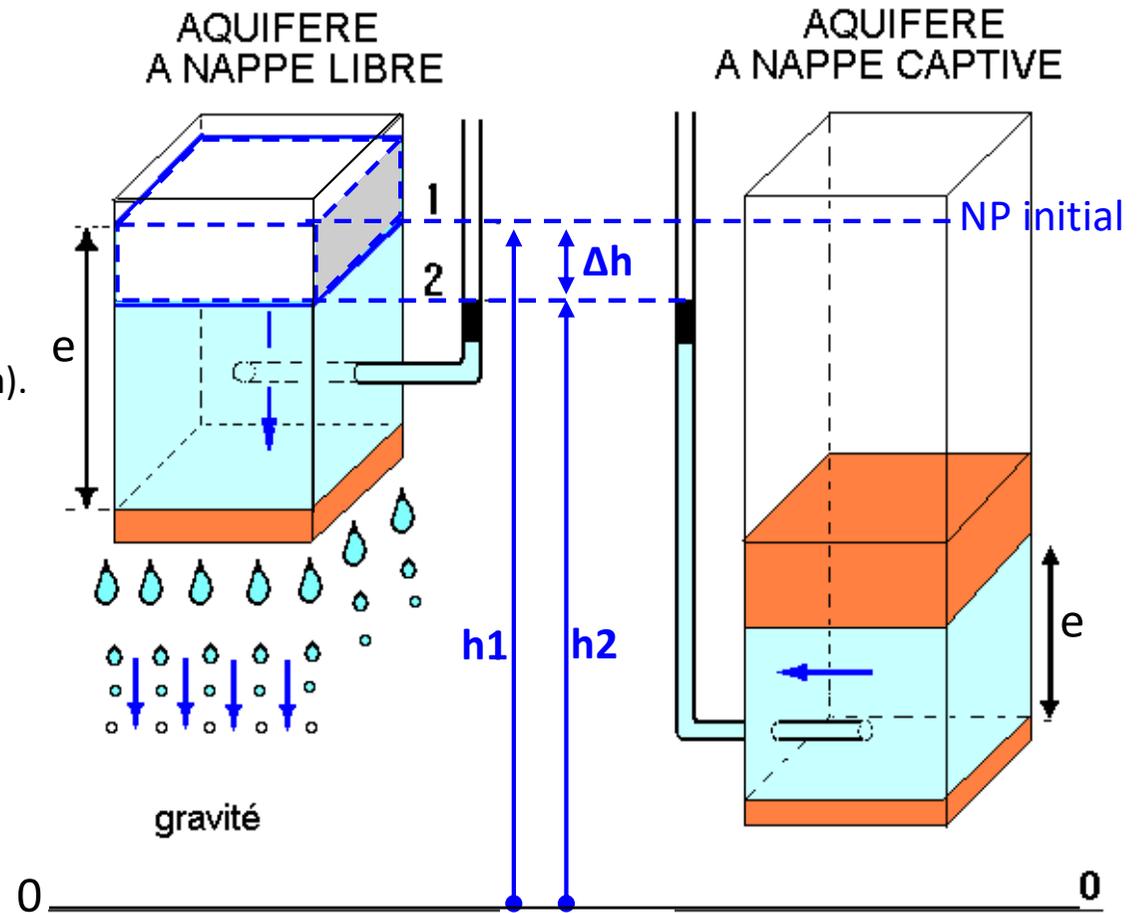
$$S = \frac{V_w}{\Delta h \cdot A}$$

- Aquifère libre:  $0.05 < S < 0.35$
- Aquifère captif:  $10^{-6} < S < 0.001$

- Emmagasinement spécifique  $S_s$  ( $m^{-1}$ )

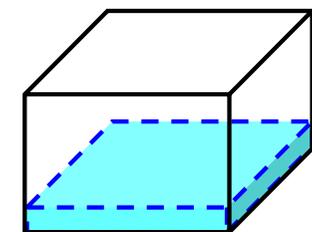
Volume d'eau que peut libérer l'aquifère par unité de volume ( $A=1m^2$  et  $e = 1m$ ) suite à un abaissement unitaire du niveau d'eau ( $\Delta h$ ).

$$S = S_s \cdot e$$



**DRAINAGE**

$$S = n_e$$



**EXPULSION**

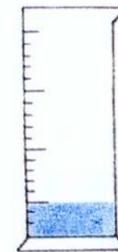
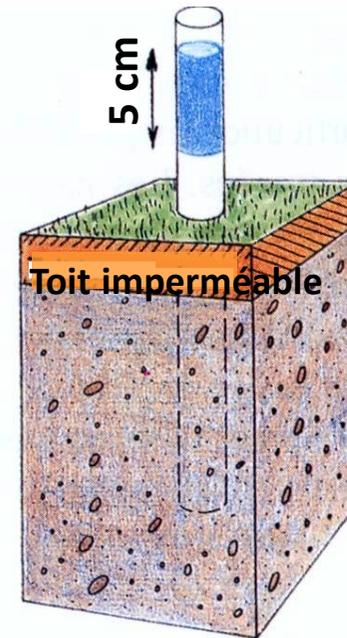
$$S$$

## Application

Déterminer le volume d'eau produit par un aquifère captif si au cours d'une année la surface piézométrique est abaissée de 5 cm sur l'ensemble de l'aquifère.

L'aquifère a une épaisseur de 30 m, une superficie de 3 km<sup>2</sup> et un emmagasinement spécifique de  $10^{-4} \text{ m}^{-1}$ .

(J.J. Collin, 2004)



**Nappe captive**

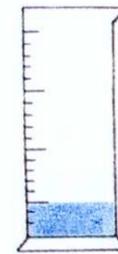
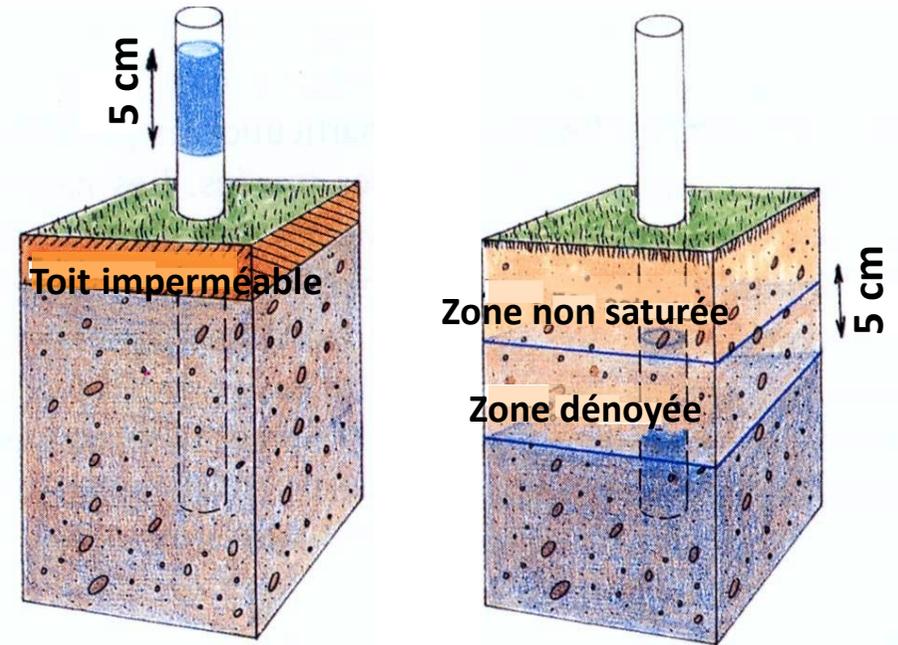
## 👉 Application

Déterminer le volume d'eau produit par un aquifère captif si au cours d'une année la surface piézométrique est abaissée de 5 cm sur l'ensemble de l'aquifère.

L'aquifère a une épaisseur de 30 m, une superficie de 3 km<sup>2</sup> et un emmagasinement spécifique de 10<sup>-4</sup> m<sup>-1</sup>.

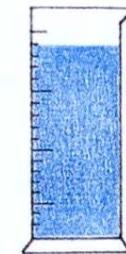
**Quel serait ce volume si la nappe était libre avec S=0.167?**

(J.J. Collin, 2004)



**Nappe captive**

$$V=450 \text{ m}^3$$



**Nappe libre**

## Application

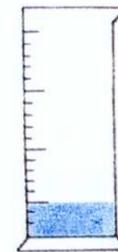
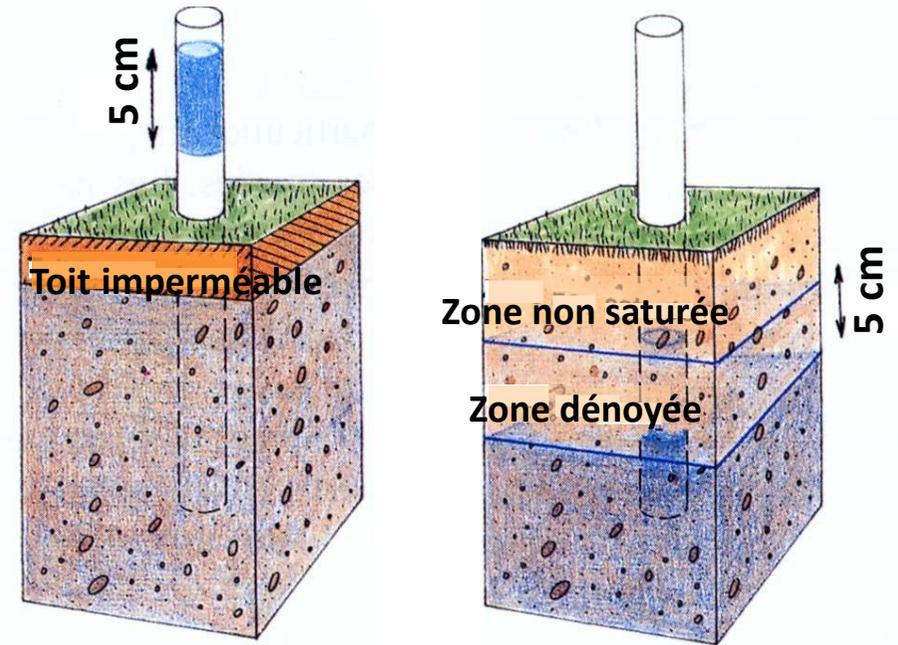
Déterminer le volume d'eau produit par un aquifère captif si au cours d'une année la surface piézométrique est abaissée de 5 cm sur l'ensemble de l'aquifère.

L'aquifère a une épaisseur de 30 m, une superficie de 3 km<sup>2</sup> et un emmagasinement spécifique de 10<sup>-4</sup> m<sup>-1</sup>.

Quel serait ce volume si la nappe était libre avec  $S=0.167$ ?

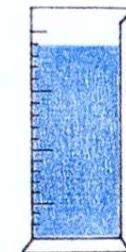
**L'abaissement du niveau dans une nappe libre libère un volume d'eau très supérieur à celui obtenu dans une nappe captive**

(J.J. Collin, 2004)



Nappe captive

$$V=450 \text{ m}^3$$



Nappe libre

$$V=25050 \text{ m}^3$$



Piezomètre dans le glissement de Super-Sauze, Haute-Provence



# HYDROGEOLOGIE GENERALE

## HLST 304

---

### I. Structure et propriétés des aquifères

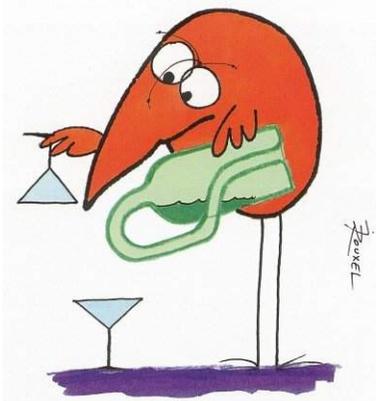
CM1. L'eau souterraine dans le cycle de l'eau

CM2-3. Caractéristiques du réservoir aquifère

#### **CM4. Principes des écoulements souterrains**

*Comment l'eau fait pour couler dans cette roche?*

1. Charge hydraulique et écoulements
2. Caractéristiques hydrodynamiques des aquifères



A la fin de ce cours, vous devez être capable de....

- Calculer la charge hydraulique d'une nappe
- Citer la loi de Darcy et l'utiliser pour calculer un débit vertical ou horizontal

Aquifère = réservoir naturel pouvant contenir et transférer de l'eau

Deux fonctions à considérer :

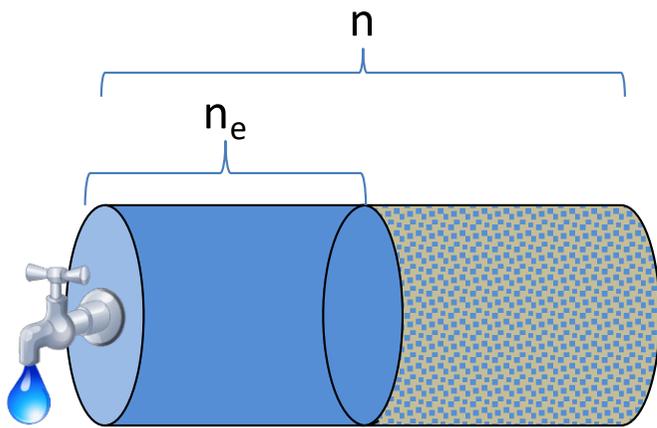
- **Stockage - Fonction capacitive** = volume d'eau contenu dans l'aquifère et pouvant être extrait.  
dépend de :

- Porosités ( $n$  et  $n_e$ )
- Emmagasinement ( $S$ )
- Volume ( $V$ )

- **Écoulements - Fonction conductrice** = capacité de l'eau à circuler dans l'aquifère.

Paramètres :

- Gradient ( $i$ )
- Perméabilité = conductivité hydraulique ( $K$ )
- Transmissivité ( $T$ )
- Dispersion



$K, Q, v$

## 1. Charge hydraulique et écoulement

### □ Equilibre hydrostatique en milieux poreux saturé

- Dans un forage, quelle est la pression à la base de la crépine?
  - Expérience du tonneau de Pascal
  - Prélèvements à 60m de profondeur dans un conduit karstique
  
- Suivi du niveau piézométrique par capteur de pression

Gamme DIVER



## 1. Charge hydraulique et écoulement

- **Equilibre hydrostatique en milieux poreux saturé**
- **Hydrodynamique en milieux poreux saturé**

 Application : vidéo

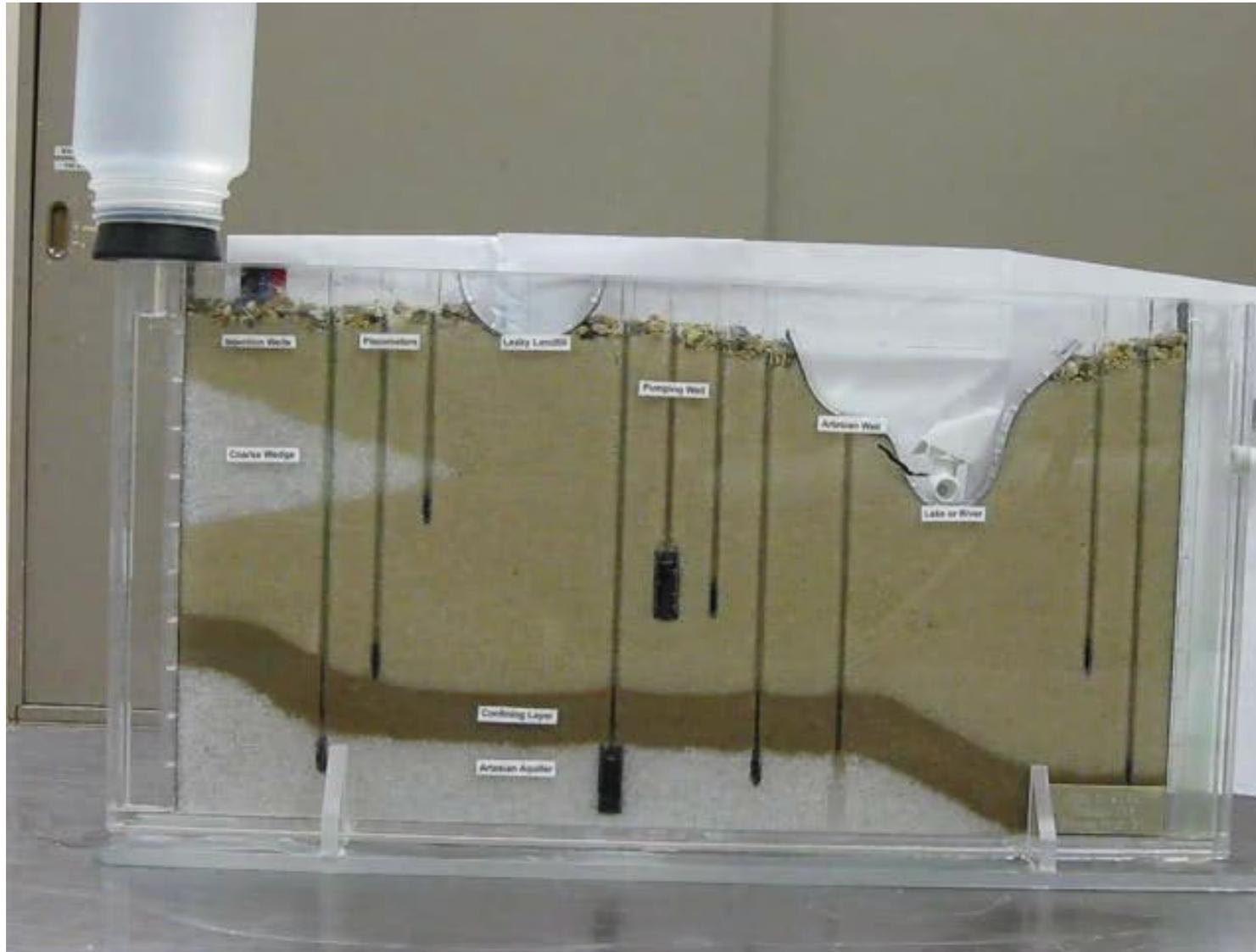
Décrire la surface piézométrique.

Dans les 3 cas suivants, y a-t-il écoulement d'eau dans la nappe?

- 1 : niveau d'entrée = niveau de sortie
- 2 : niveau de sortie abaissée
- 3 : Niveau du lac abaissée

## 1. Charge hydraulique et écoulement

### □ Hydrodynamique en milieux poreux saturé



## 1. Charge hydraulique et écoulement

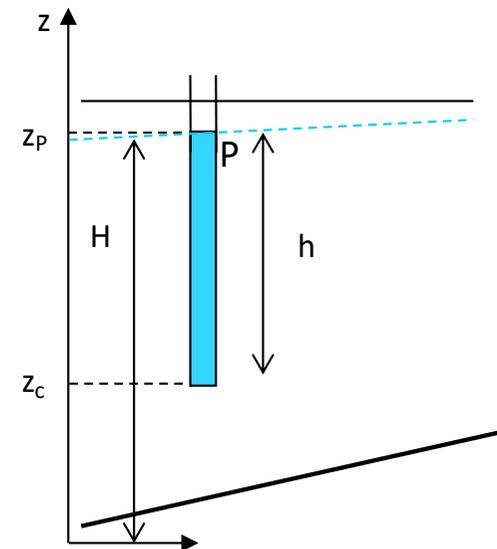
- **Hydrodynamique en milieux poreux saturé**
  - Notion de potentiel

## 1. Charge hydraulique et écoulement

- **Hydrodynamique en milieux poreux saturé**
  - Notion de potentiel
  - Charge hydraulique

Hypothèses: fluide incompressible soumis à la seule gravité

**H=?**



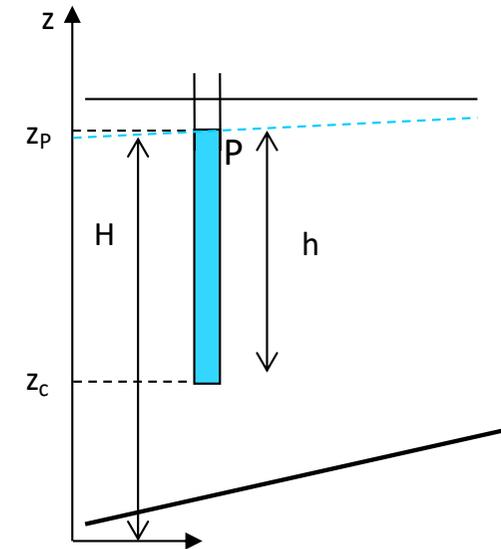
## 1. Charge hydraulique et écoulement

### □ Hydrodynamique en milieux poreux saturé

#### □ Charge hydraulique

Hypothèses: fluide incompressible soumis à la seule gravité

$$H = \frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + z \quad \rightarrow \quad H = \frac{P}{\rho g} + z$$



- $v$  : vitesse du fluide
- $z$  : altitude (comptée positivement vers le haut)
- $P$  : pression
- $\rho$  : masse volumique
- $g$  : gravité ( $\approx 9.81 \text{ m.s}^{-2}$ )

## 1. Charge hydraulique et écoulement

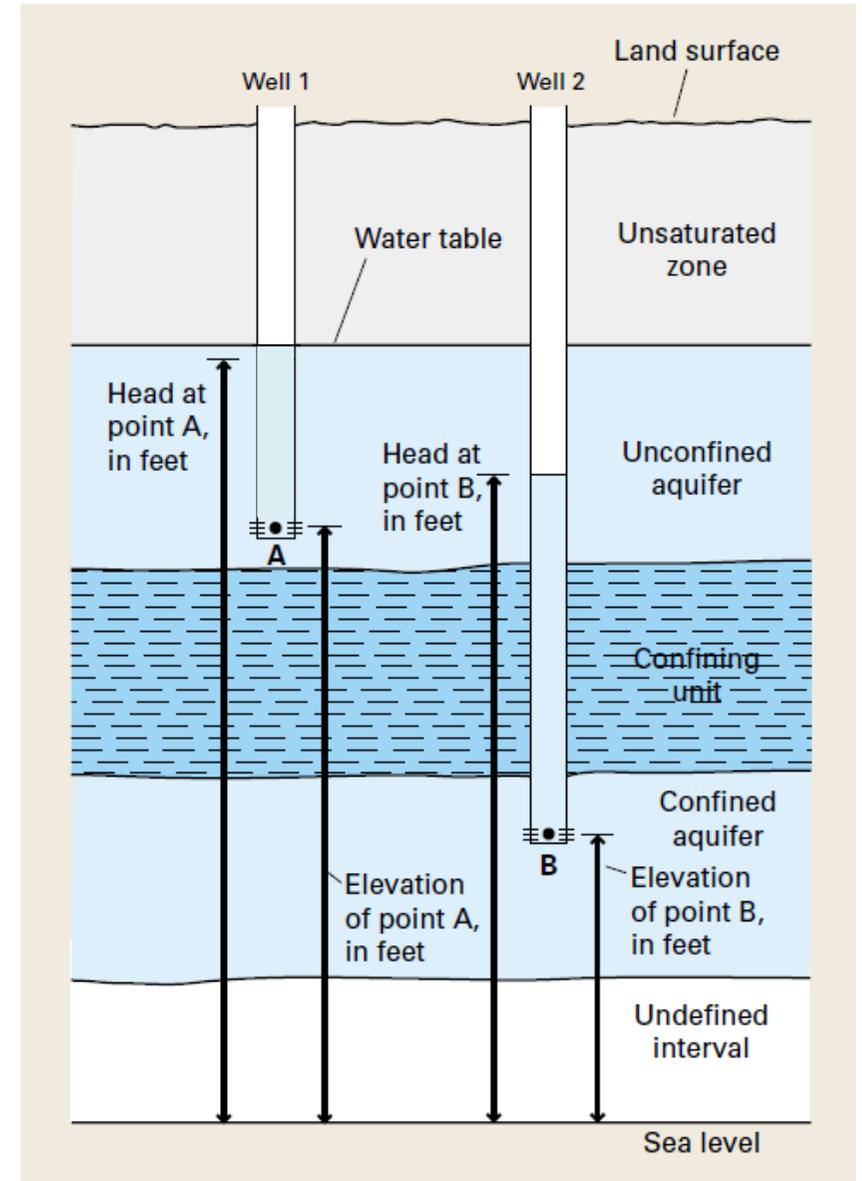
### □ Hydrodynamique en milieux poreux saturé

#### □ Charge hydraulique

Hypothèses: fluide incompressible soumis à la seule gravité

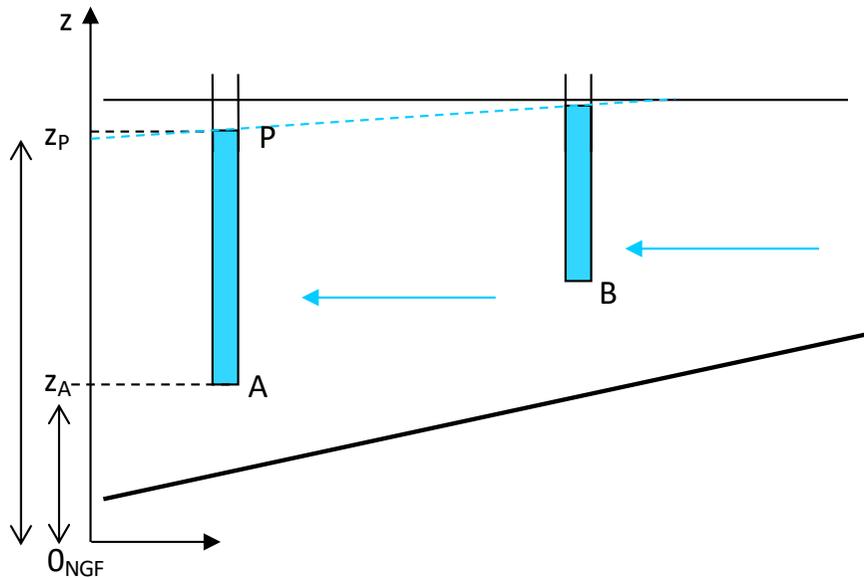
$$\rightarrow H = h + z$$

- $v$  : vitesse du fluide
- $z$  : altitude (comptée positivement vers le haut)
- $P$  : pression
- $\rho$  : masse volumique
- $g$  : gravité ( $\approx 9.81 \text{ m.s}^{-2}$ )



## □ Charge hydraulique

### 👉 Application



Hypothèses :

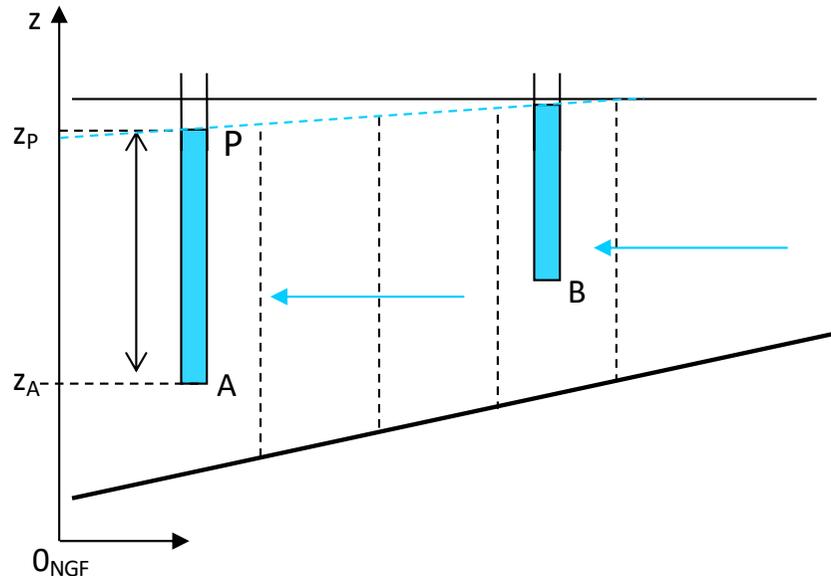
- la vitesse du fluide est négligeable
- la composante verticale de l'écoulement est négligeable

$$P_p = P_{atm} = 0 \text{ par convention (référence)}$$

- Expression de la charge hydraulique en P ( $H_p$ ) d'après Bernoulli
- Expression de la charge hydraulique en A ( $H_A$ )
- Expression de  $H_A$  en fonction du niveau piézométrique  $z_p$

## □ Charge hydraulique

### 👉 Application



Hypothèses :

- la vitesse du fluide est négligeable
- la composante verticale de l'écoulement est négligeable

----- Equipotentielles

$$P_p = P_{atm} = 0 \text{ par convention (référence)}$$

- Expression de la charge hydraulique en P ( $H_p$ ) :

$$H_p = \frac{u^2}{2g} + \frac{P_p}{\rho g} + z_p \Rightarrow H_p = \frac{P_p}{\rho g} + z_p = z_p$$

- Expression de  $H_A$  en fonction du niveau piézométrique  $z_p$

$$H_A = \frac{P_A}{\rho g} + z_A \Rightarrow H_A = \frac{P_A}{\rho g} + z_A = \frac{\rho g(z_p - z_A)}{\rho g} + z_A = z_p$$

⇒ Charge hydraulique = constante sur une verticale

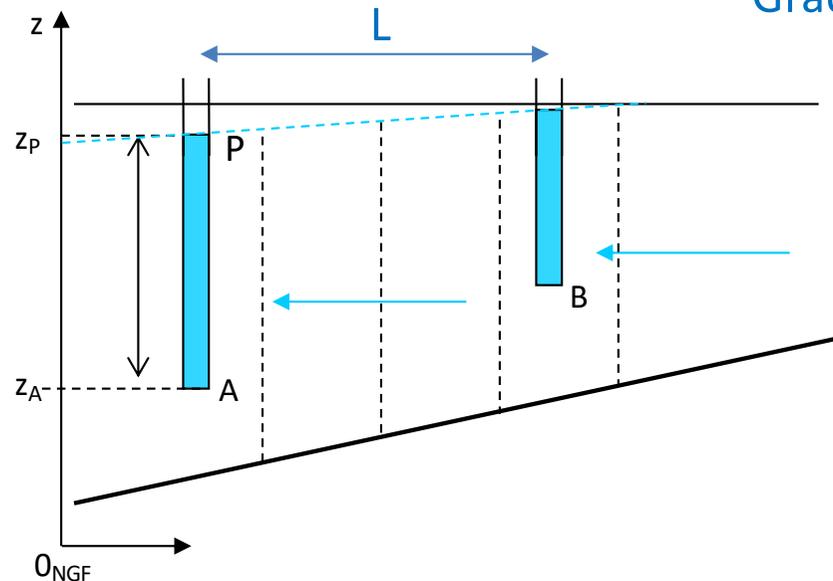
## □ Charge hydraulique



### □ Gradient hydraulique



#### Application



$$\text{Gradient} = (H_A - H_B) / L = \text{pente piézo (m/m ou \%)}$$

Hypothèses :

- la vitesse du fluide est négligeable
- la composante verticale de l'écoulement est négligeable

----- Equipotentiellles

$$P_p = P_{\text{atm}} = 0 \text{ par convention (référence)}$$

- Expression de la charge hydraulique en P ( $H_p$ ) :

$$H_p = \frac{u^2}{2g} + \frac{P_p}{\rho g} + z_p \Rightarrow H_p = \frac{P_p}{\rho g} + z_p = z_p$$

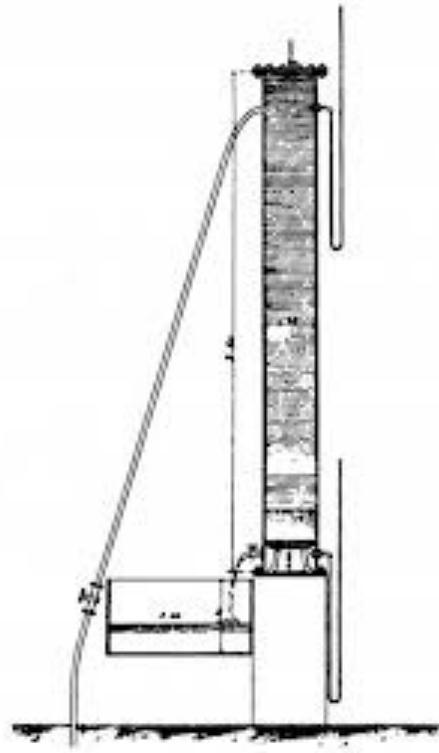
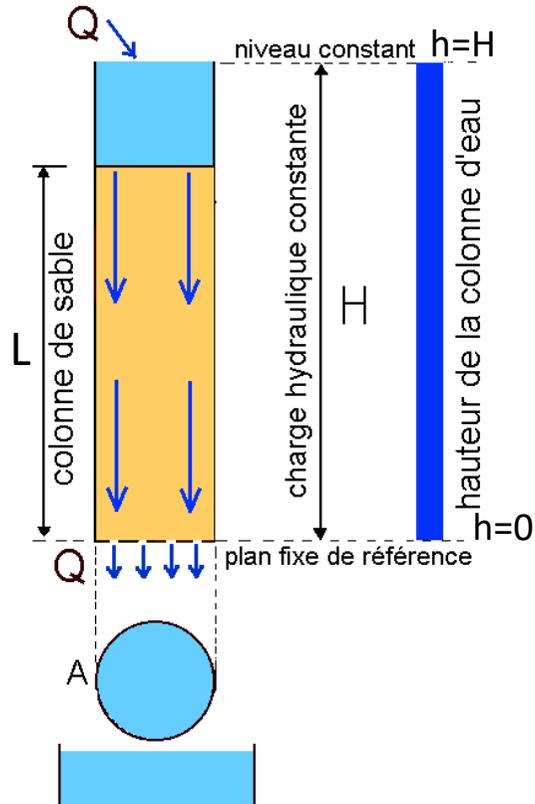
- Expression de  $H_A$  en fonction du niveau piézométrique  $z_p$

$$H_A = \frac{P_A}{\rho g} + z_A \Rightarrow H_A = \frac{P_A}{\rho g} + z_A = \frac{\rho g(z_p - z_A)}{\rho g} + z_A = z_p$$

⇒ Charge hydraulique = constante sur une verticale

□ Loi de Darcy (1856) « Les fontaines publiques de la ville de Dijon »

► L'expérience de Darcy



$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

$Q$ : débit ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )

$K$ : conductivité hydraulique ( $\text{ms}^{-1}$ )

$A$ : section traversée ( $\text{m}^2$ )

$i$ : gradient hydraulique

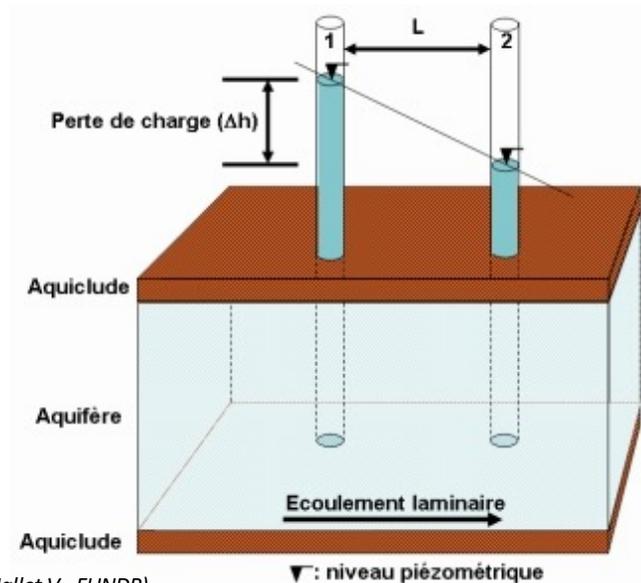
$\Delta h$ : différence de charge hydraulique  
entre l'entrée et la sortie

$L$ : distance entre les 2 points  
d'observation (m)

□ Loi de Darcy (1856)

► La loi de Darcy sur le terrain

Écoulement horizontal



(Hallet V., FUNDP)

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

Q: débit ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )

K : conductivité hydraulique ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

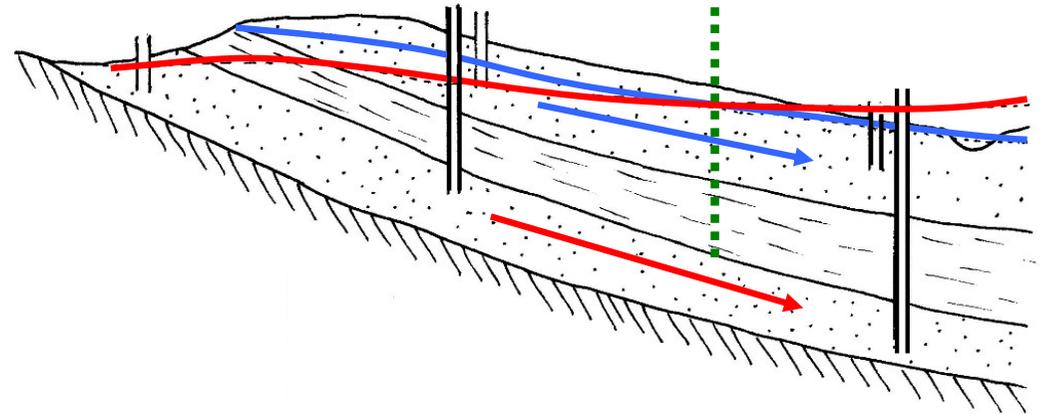
A: section traversée ( $\text{m}^2$ )

i : gradient hydraulique

$\Delta h$  : différence de charge hydraulique entre l'entrée et la sortie

L: distance entre les 2 points d'observation (m)

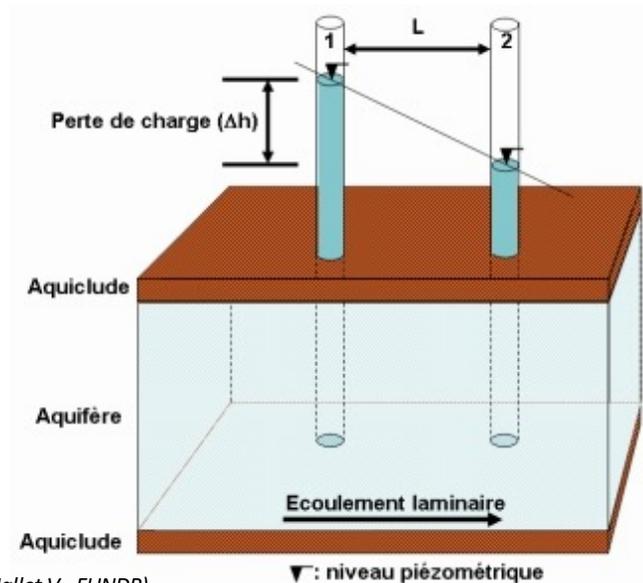
Écoulement vertical = DRAINANCE



□ Loi de Darcy (1856)

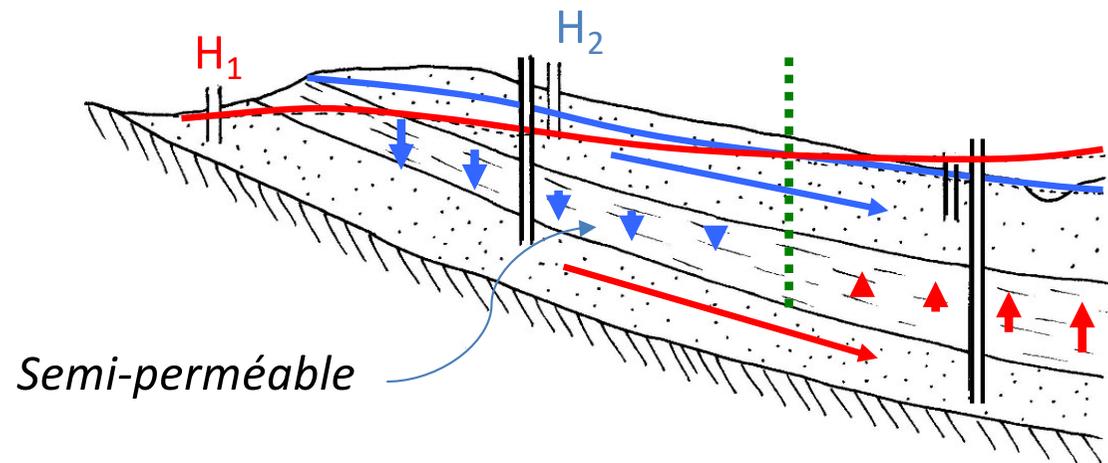
► La loi de Darcy sur le terrain

Écoulement horizontal



(Hallet V., FUNDP)

Écoulement vertical = DRAINANCE



► Conditions d'application

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

👉 Application

$H_1 = 45 \text{ m}; H_2 = 42 \text{ m}$

$K_{\text{imp}} = 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}; e_{\text{imp}} = 10 \text{ m}$

Calcul du débit pour 1 km<sup>2</sup> unitaire

## 2. Caractéristiques hydrodynamiques des aquifères

### ► K : Coefficient de perméabilité - conductivité hydraulique ( $m.s^{-1}$ )

Fonction du matériau et du fluide (eau, pétrole...)

Ordres de grandeur:

Roche	n totale (%)	n efficace (%)	K (m/s)
argile	45 à 55	0 à 5	$10^{-12}$ à $10^{-9}$
sable moyen	30 à 40	25 à 35	$10^{-5}$ à $10^{-2}$
gravier	25 à 35	20 à 30	$10^{-3}$ à 10
grès	0 à 10	0 à 5	$10^{-10}$ à $10^{-8}$
calcaire fissuré	5 à 15	0 à 10	$10^{-9}$ à $10^{-6}$
basalte massif	0 à 5	0 à 5	$10^{-11}$ à $10^{-6}$
schiste	0 à 20	0 à 5	$10^{-13}$ à $10^{-9}$

(BRGM, 2006)

Types de sédiments	Porosité TP (n) %	Porosité efficace TP (ne) %	Perméabilité TP (K) $m.s^{-1}$
Sable grossier	44	38	$10^{-2}$ à $5.10^{-3}$
Sable fin	51-54	1,1-4	$3.10^{-4}$
Sable non trié grossier	36-37	1,5-5	$3.10^{-2}$
Sable non trié fin			$2.10^{-3}$

Mesure

- Perméamètre à charge constante
- Essai par pompage

► K : Coefficient de perméabilité - conductivité hydraulique (m.s<sup>-1</sup>)

Fonction du matériau et du fluide (eau, pétrole...)

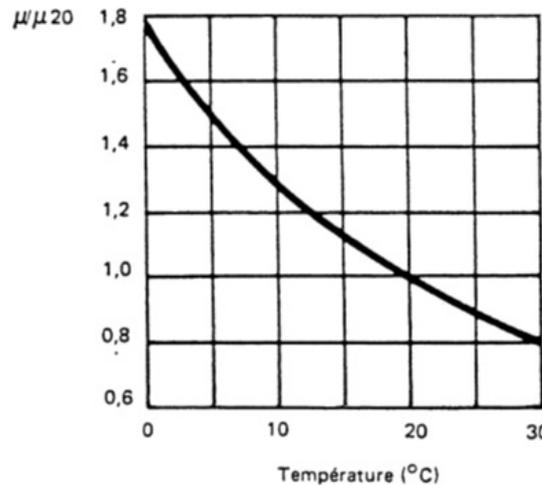
► Perméabilité intrinsèque :  $k$  (m<sup>2</sup>)

Indépendante du fluide

$$K = k_i \frac{\rho g}{\mu}$$

Avec  $\rho$ : masse volumique du fluide (Kg.m<sup>-3</sup>)

$\mu$ : viscosité dynamique du fluide (Pa.s)



1 centipoise = 10<sup>-3</sup> Pa.s

Les valeurs sont mesurées à la pression atmosphérique.

Température °C	Viscosité μ en centipoises à la pression atmosphérique
0°	1,787
10°	1,310
20°	1,002
40°	0,653
60°	0,466
80°	0,355
100°	0,282



### Application

Un essai de perméabilité d'un sable donne une valeur de  $K = 10^{-4}$  m.s<sup>-1</sup> pour une eau à 10°C.

La même formation est traversée par des remontées hydrothermales à 60°C. Quelle valeur de  $K$  ?

► K : Coefficient de perméabilité - conductivité hydraulique (m.s<sup>-1</sup>)

Fonction du matériau et du fluide (eau, pétrole...)

► Perméabilité intrinsèque :  $k$  (m<sup>2</sup>)

Indépendante du fluide

$$K = k_i \frac{\rho g}{\mu}$$

Avec  $\rho$ : masse volumique du fluide (Kg.m<sup>-3</sup>)

$\mu$ : viscosité dynamique du fluide (Pa.s)

Fonction de :

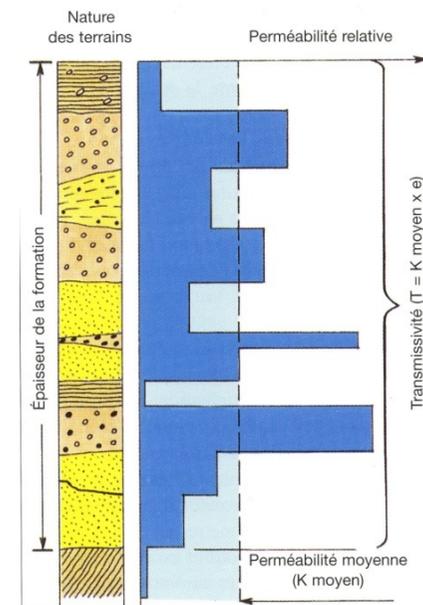
- la granulométrie
- la surface spécifique
- la porosité efficace

► Transmissivité T (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)

$$T = K \cdot e$$

Avec K: conductivité hydraulique (m.s<sup>-1</sup>)

e: épaisseur de l'aquifère (m)



Transmissivité d'un ensemble de couches (Collin, 2006)

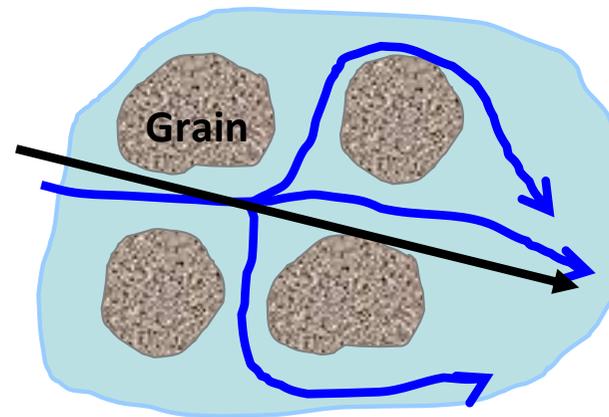
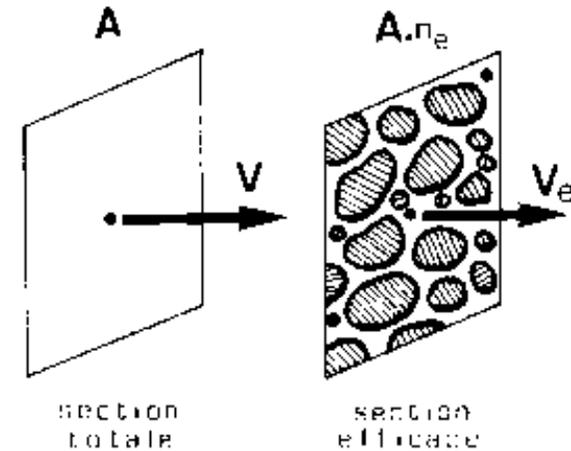
► Vitesses d'écoulement

- Vitesse de filtration (vitesse de Darcy)

$$U = \frac{Q}{A} = K.i$$

- Vitesse effective

$$V_{eff} = \frac{U}{n_e}$$



Vitesse et trajectoire de Darcy

Vitesse et Trajectoire réelles

👉 Application

$Q=1\text{m}^3/\text{s}$ ;  $A=200\,000\text{m}^2$ ;  $n_e=10\%$

Calculer  $U$  et  $V_{eff}$

► Vitesses d'écoulement

MILIEU POREUX



Hétérogène à grande échelle  
Homogène à petite échelle

MILIEU FISSURE

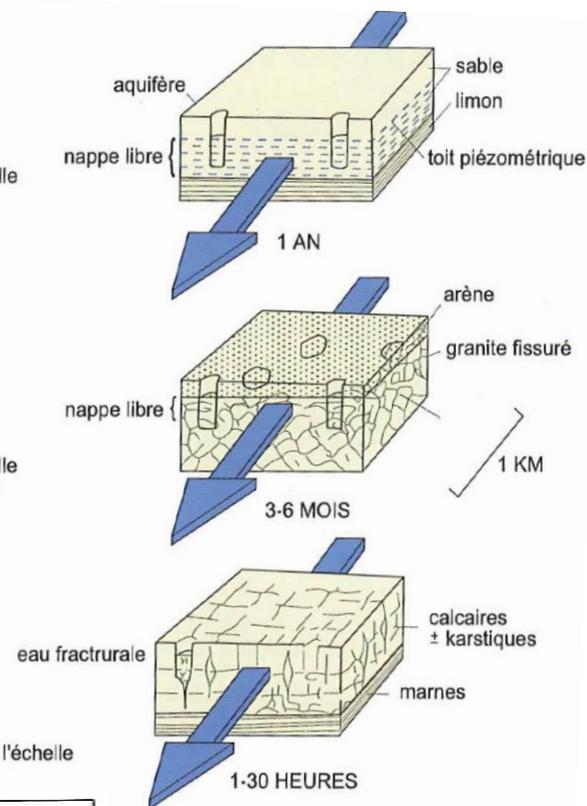


Hétérogène à grande échelle  
Homogène à petite échelle

MILIEU KARSTIQUE



Hétérogène quelle que soit l'échelle

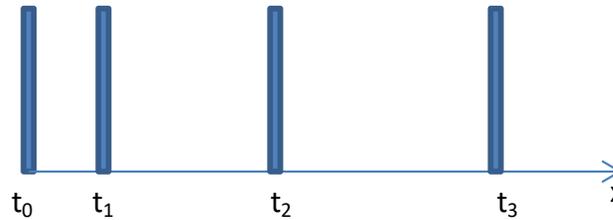


(BRGM,2006)

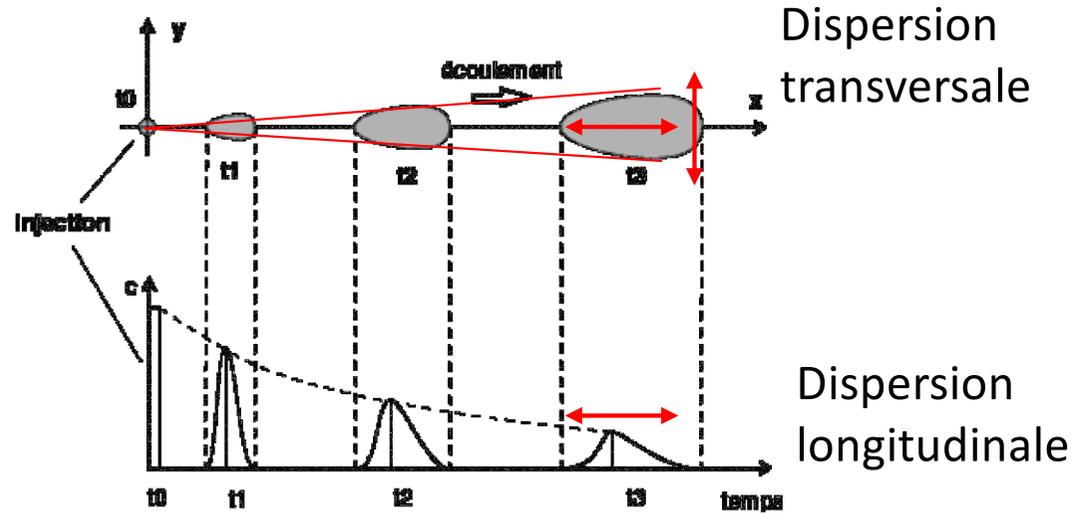
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nappes captives des sables verts du Bassin de Paris et des sables inférieurs d'Aquitaine.</li> </ul>	2 à 5 m par an (= 5 à 12 mm par jour).
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nappes d'alluvions de grandes vallées (Rhin, Rhône, Seine à Montereau).</li> </ul>	0,5 à 2 km par an (= 1 à 5 m par jour).
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nappes d'alluvions grossières de vallées alpines.</li> </ul>	30 à 300 km par an (= 100 à 1 000 m par jour).
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nappes de la craie fissurée et karstifiée en Normandie et dans le Sénonais (vitesses maximales).</li> </ul>	(= 1 à 10 km par jour).
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Circulation dans les aquifères karstiques (en conduits, très variables selon les débits).</li> </ul>	Quelques dizaines (en moyenne) à plusieurs centaines de mètres à l'heure (en crue) (= 1 km par jour à plusieurs dizaines de km par jour).
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un record : 1,1 km/h dans le karst de la source de Bèze (Côte-d'Or) en crue.</li> </ul>	

► Vitesses de déplacement

- Advection

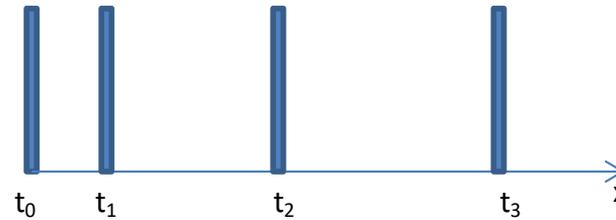


- Dispersion

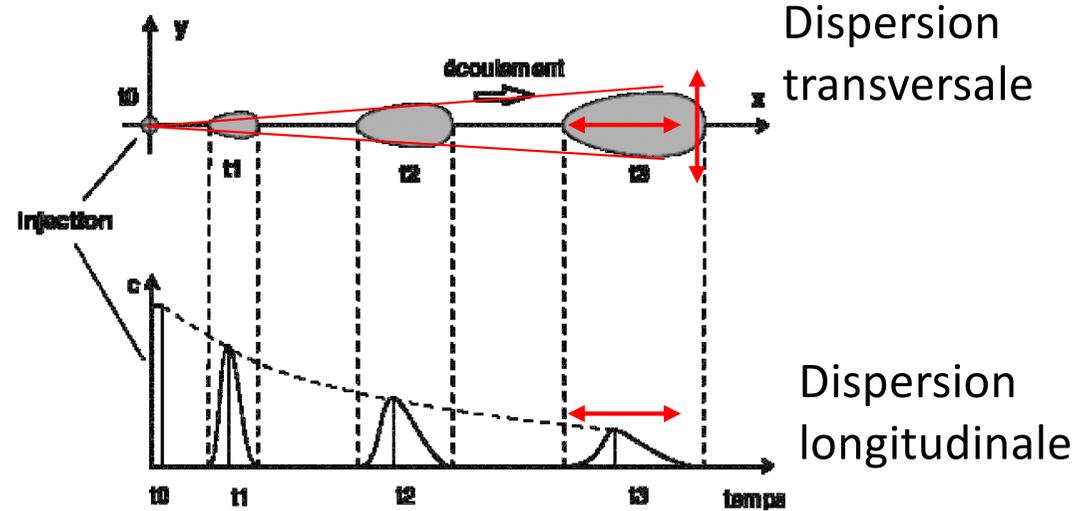
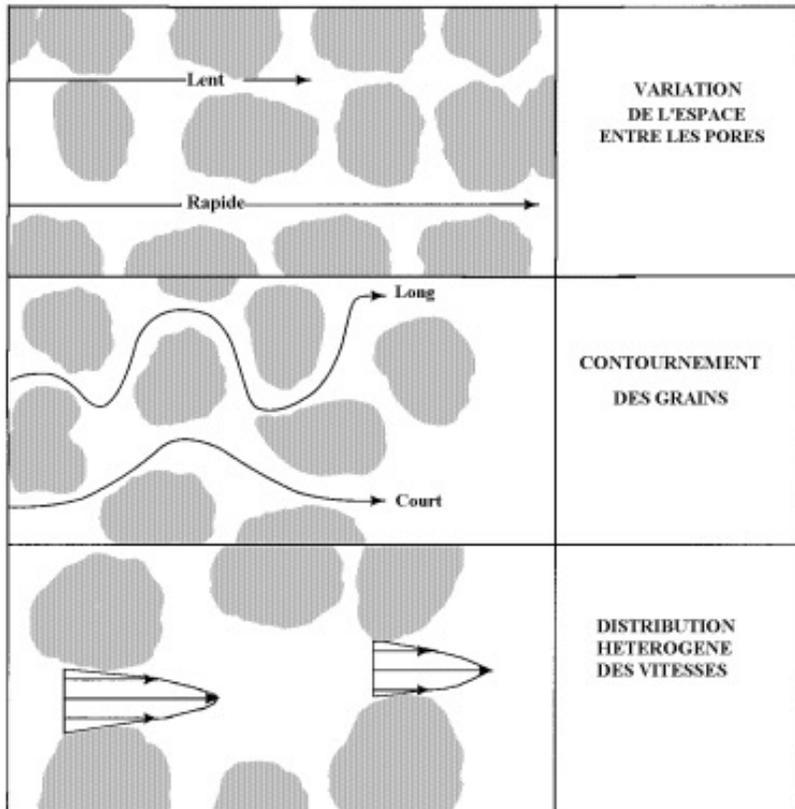


► Vitesses de déplacement

■ Advection



■ Dispersion





□ **Rappel**

Concepts	Paramètres hydrodynamiques	Symboles	Unités (SI)
<b>Fonction capacitive</b>	Porosité totale	n	%
	Porosité efficace	$n_e$	%
	Emmagasinement	S	(%)
<b>Fonction conductrice</b>	Conductivité hydraulique	K	$\text{ms}^{-1}$
	Perméabilité intrinsèque	$k_i$	$\text{m}^2$
	Transmissivité	T	$\text{m}^2\text{s}^{-1}$
	Diffusivité	T/S	$\text{m}^2\text{s}^{-1}$
<b>Piézométrie et gradients hydrauliques</b>	Niveau piézométrique	H	m d'eau
	Charge hydraulique	h	m d'eau
	Gradient hydraulique	i	—
<b>Débits et vitesses</b>	Débit d'une nappe	Q	$\text{m}^3\text{s}^{-1}$
	Débit unitaire	q	$\text{ms}^{-1}$
	Vitesse de Darcy (de filtration)	$V_D$	$\text{ms}^{-1}$

# Plan

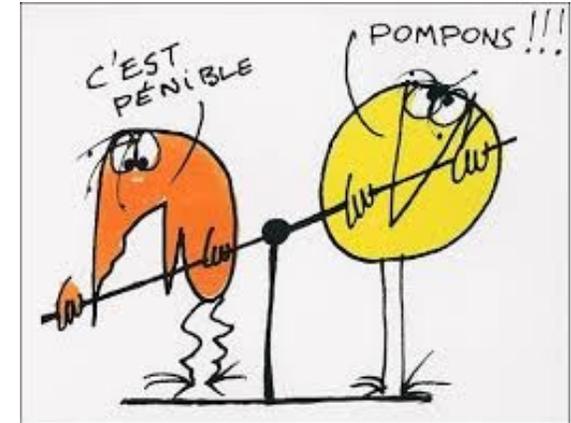
## I. Structure et propriétés des aquifères

CM1. L'eau souterraine dans le cycle de l'eau

CM2. Caractéristiques du réservoir aquifère

CM3. Caractérisation de la fonction capacitive du réservoir aquifère

CM4. Principes des écoulements souterrains



## II. Etude du fonctionnement des aquifères

### CM5. Cartographie hydrogéologique

*Où est l'aquifère et où vais-je implanter un forage?*

### CM6. Forage et essais par pompage

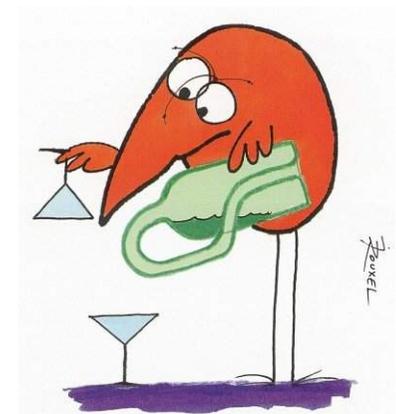
*Comment on fait un forage? Est-ce que mon forage est bien fait? Combien on peut espérer pomper?*

### CM7. Caractérisation hydrochimique de l'eau de l'aquifères

*Et l'eau de ce captage, je peux la boire?*

### CM8. Protection des eaux souterraines

*Comment faire pour ne pas en manquer et qu'elle reste bonne ?*



# HYDROGEOLOGIE GENERALE

## HLST 304



Piezomètre dans le glissement de Super-Sauze, Haute-Provence



Sources d'Ichetucknee, Floride

Site expérimental de Kerrien, Bretagne



## II. Méthode d'étude du fonctionnement des aquifères

### CM5. Cartographie hydrogéologique

*Où est l'aquifère et où vais-je implanter un forage?*

1. Etude de la structure du réservoir
2. Organisation et représentation des écoulements : la carte piézométrique

CM6. Forage et essais par pompage

CM7. Caractérisation hydrochimique de l'eau de l'aquifères

CM8. Protection des eaux souterraines

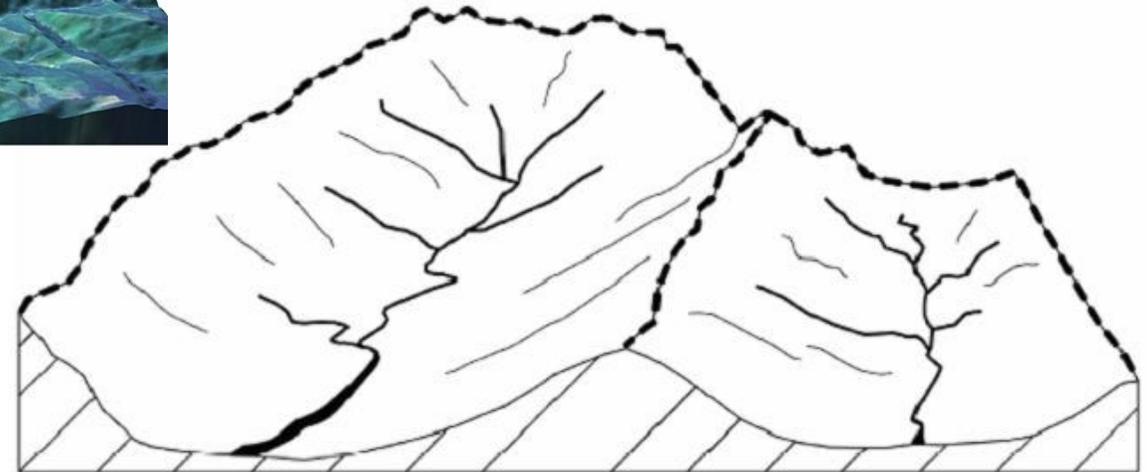
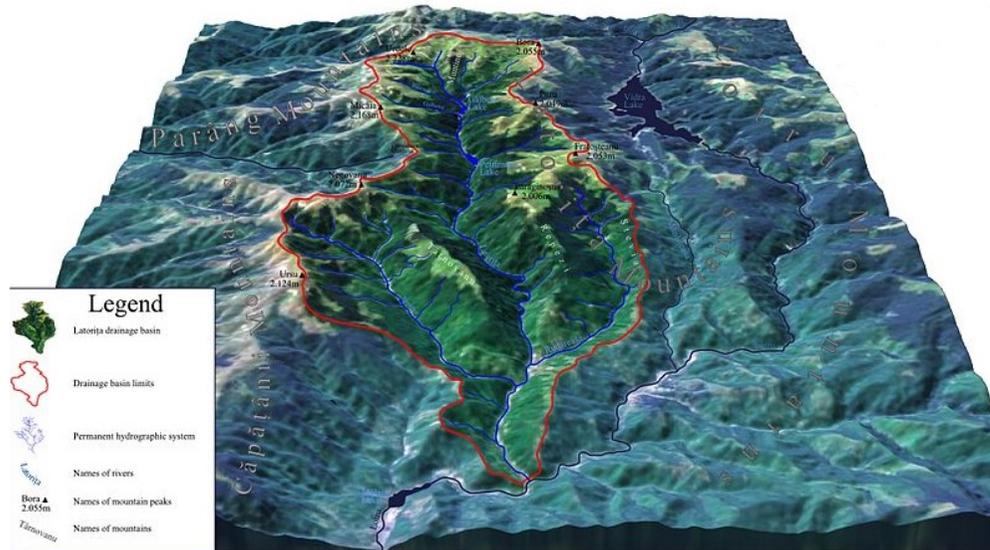
**A la fin de ce cours, vous devez être capable de....**

- Décrire et interpréter le fonctionnement d'une nappe à partir des données d'une carte hydrogéologique
- Décrire les relations nappe/rivière
- Tracer des courbes piézométriques à partir de relevé de niveau d'eau
- Tracer des lignes de courant/ de partage des eaux et des axes de drainage
- Décrire les caractéristiques de la nappe à partir des courbes piézométriques
- Calculer un gradient et un débit à partir des courbes piézométriques
- Citer et représenter schématiquement les différents types de sources

## 1. Etude de la structure du réservoir

## Où est-ce que je peux pomper de l'eau?

- En surface



Deux bassins versants voisins - en pointillé les lignes de partage des eaux

- En souterrain?  
Limite du système aquifère  
Direction, sens, organisation des écoulements?

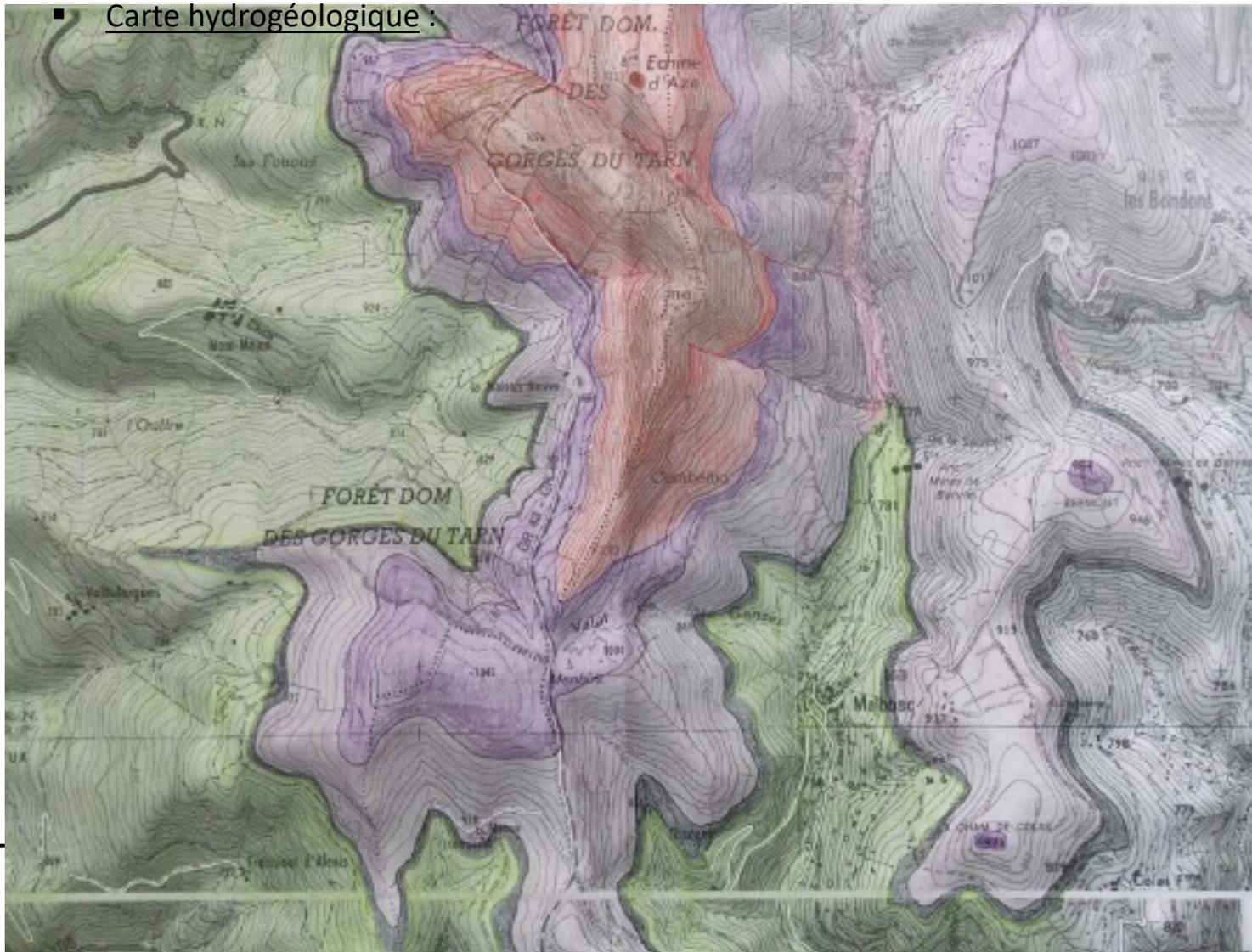
□ **Délimitation du système aquifère – Où est l'aquifère?**

▪ Identification des terrains aquifères:

- Formations perméables (et type de réservoir aquifère)
- Terrains imperméables = limites
  - En plan: Cartes de la surface du substratum et du toit de l'aquifère
  - En coupe: Coupe hydrogéologique/ Log lithologique hydrogéologique

*-Cf. TP Cartographie hydrogéologique*

■ Carte hydrogéologique :



Terrains
Aalénien
Toarcien -Domerien
Hettangien
Rhétien
Schiste
Granite

decimetriques  
= schistes carton  
→ Nombreux fossiles  
→ Couche imperméable  
= limite de réservoir



Couche imperméable 2  
= **Toarcien**



Réservoir aquifère 1  
= **Hettangien + Rhétien**

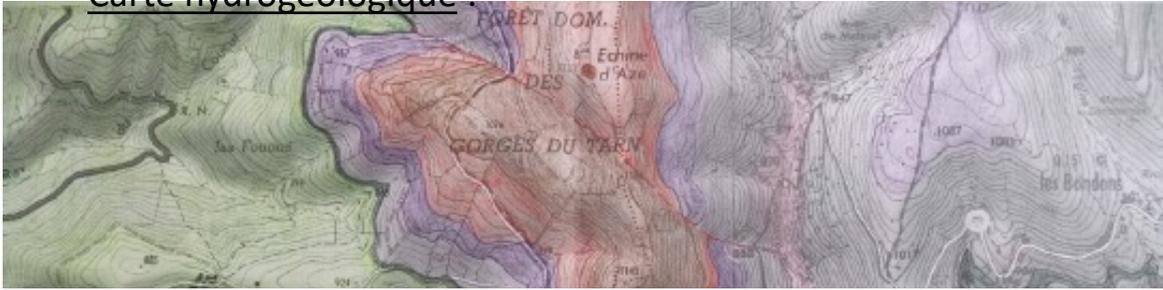
- Bancs dolomitiques avec alternance d'argilite
- 4 faciès principaux :
  - algaire
  - à trous
  - cubique
  - ondulé
- Bon réservoir aquifère

**Cartographie**

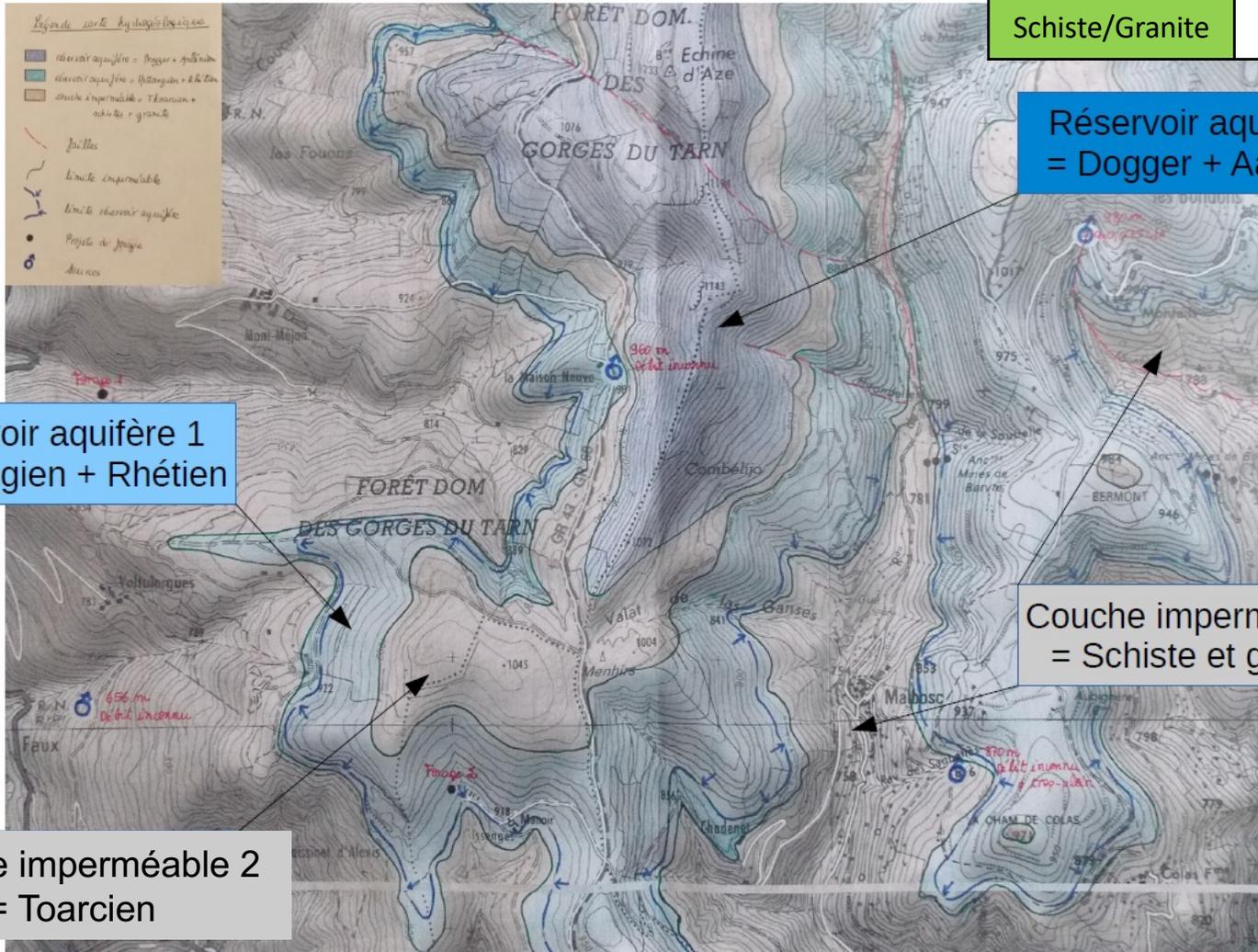
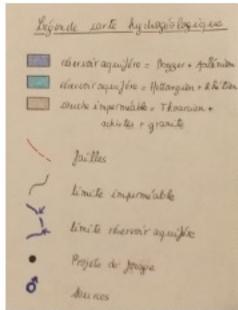
*Forage et essais par pompage*

*Caractérisation h*

■ Carte hydrogéologique :



Terrains	Perméabilité	Réservoirs
Aalénien	Perméable	1
Toarcien - Domerien	Imperméable	Mur (1) Toit (2)
Hettangien	Perméable	2
Rhétien	Perméable	
Schiste/Granite	Imperméable	Mur (2)



Réservoir aquifère 2  
= Dogger + Aalénien

Réservoir aquifère 1  
= Hettangien + Rhétien

Couche imperméable 1  
= Schiste et granite

Couche imperméable 2  
= Toarcien

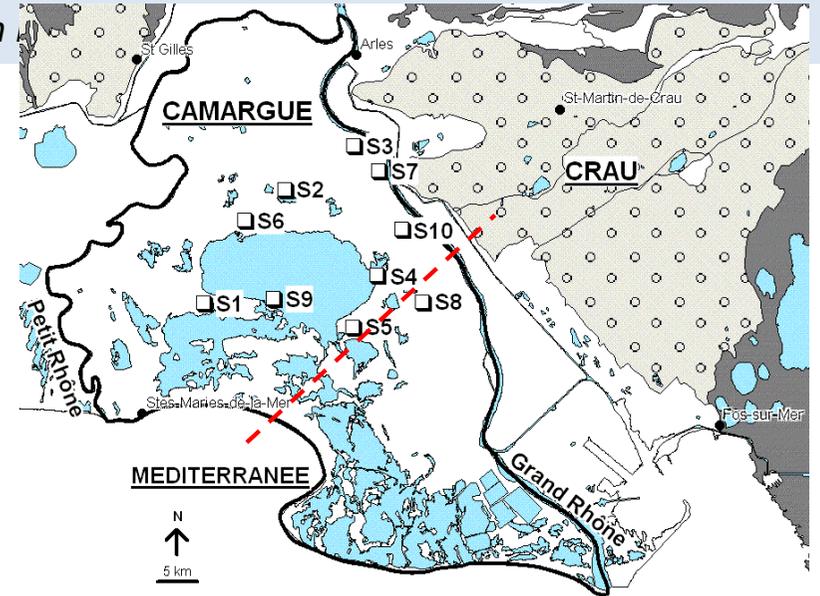
□ **Délimitation du système aquifère**

▪ Identification des terrains aquifères:

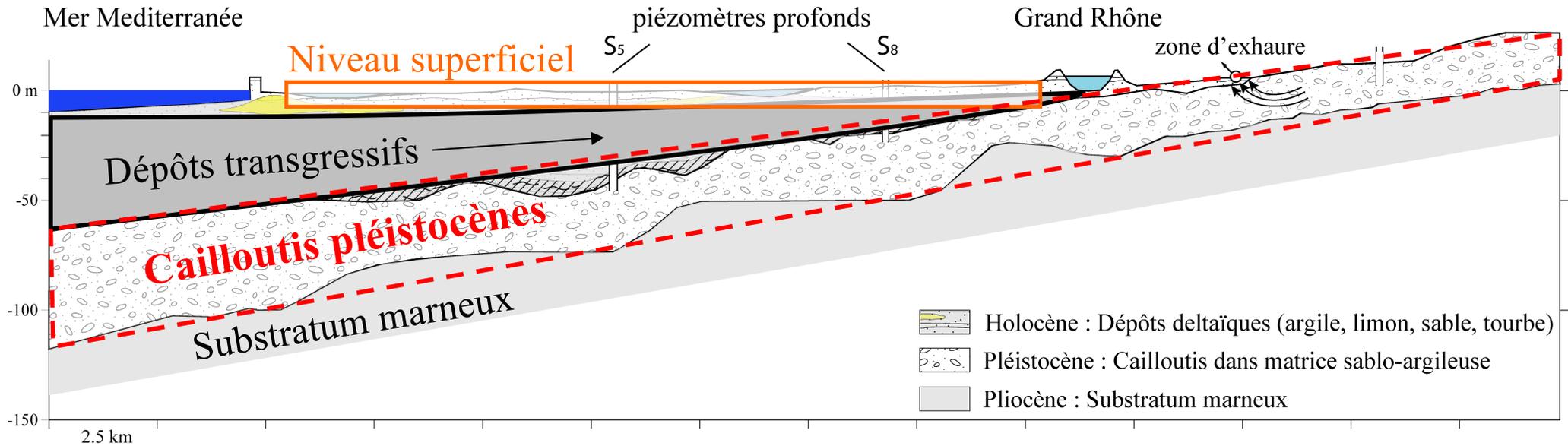
▪ Coupe hydrogéologique :

*Exemple de la basse Vallée du Rhône*

- 3 niveaux géologiques sur un substratum imperméable

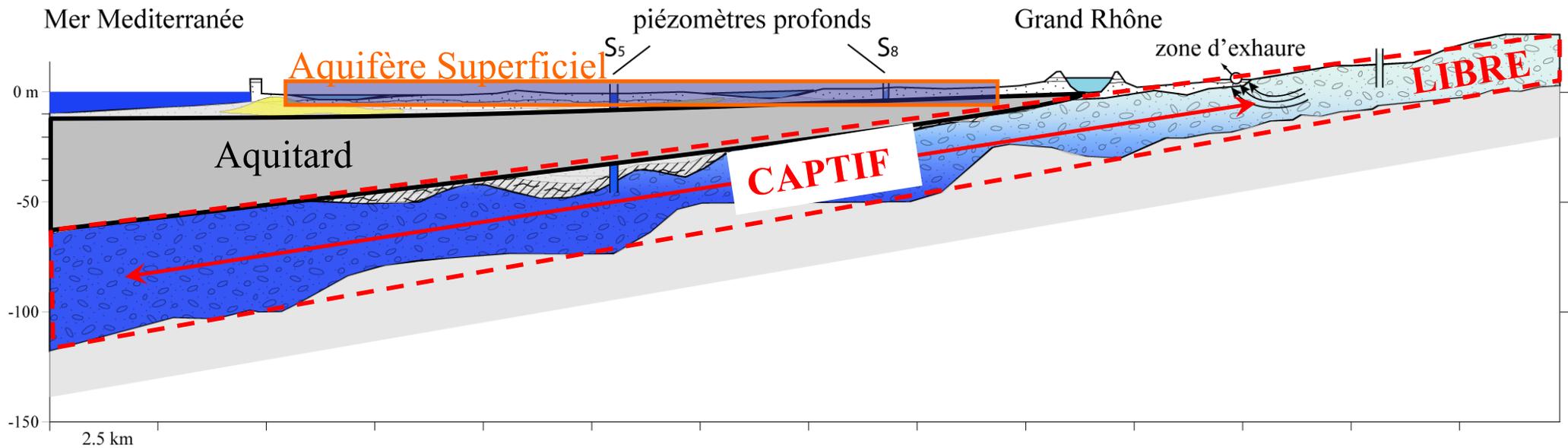
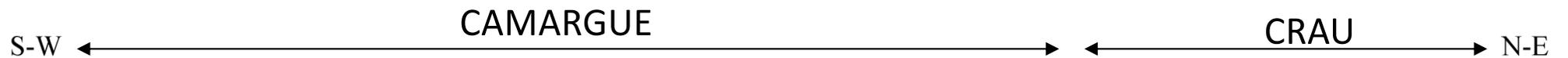
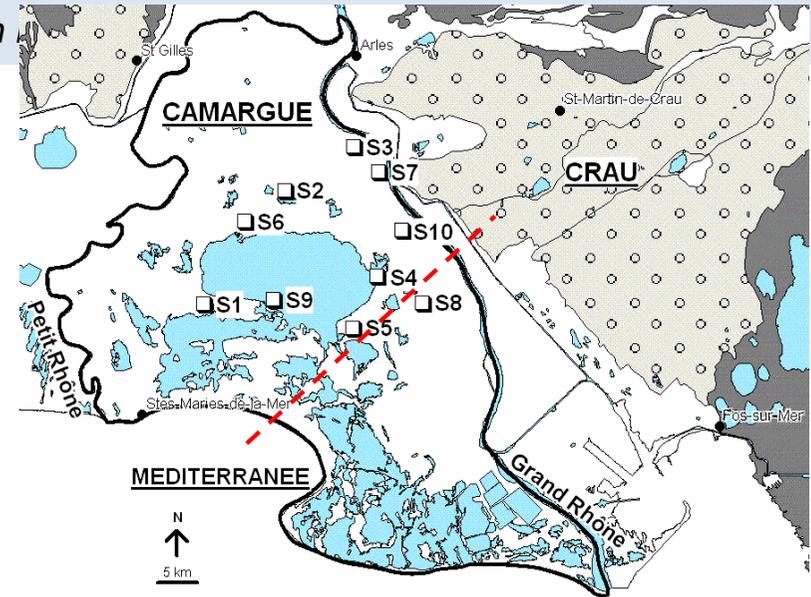


S-W ← CAMARGUE → CRAU → N-E



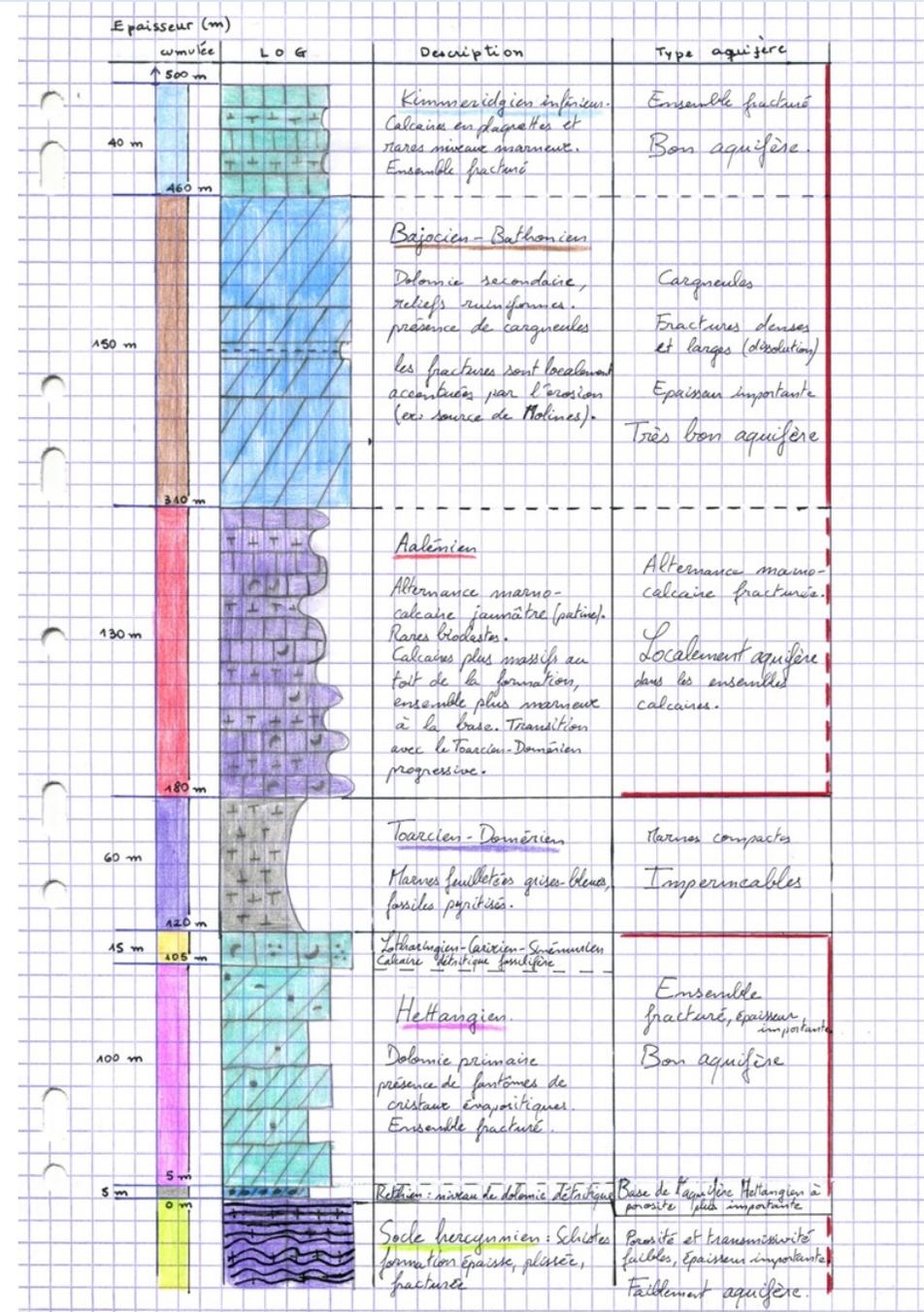
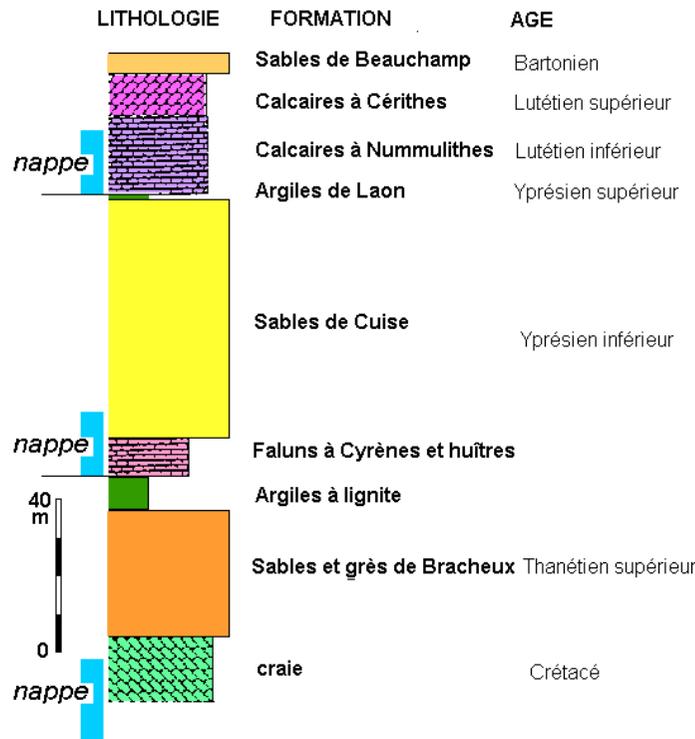
□ **Délimitation du système aquifère**

- Identification des terrains aquifères:
  - Coupe hydrogéologique :  
*Exemple de la basse Vallée du Rhône*
  - 3 niveaux géologiques sur un substratum imperméable
  - ⇒ 3 entités hydrogéologiques



■ Identification des terrains aquifères:

- Formations perméables (et type de réservoir aquifère)
- Terrains imperméables = limites
  - Coupe hydrogéologique
  - Log lithologique hydrogéologique



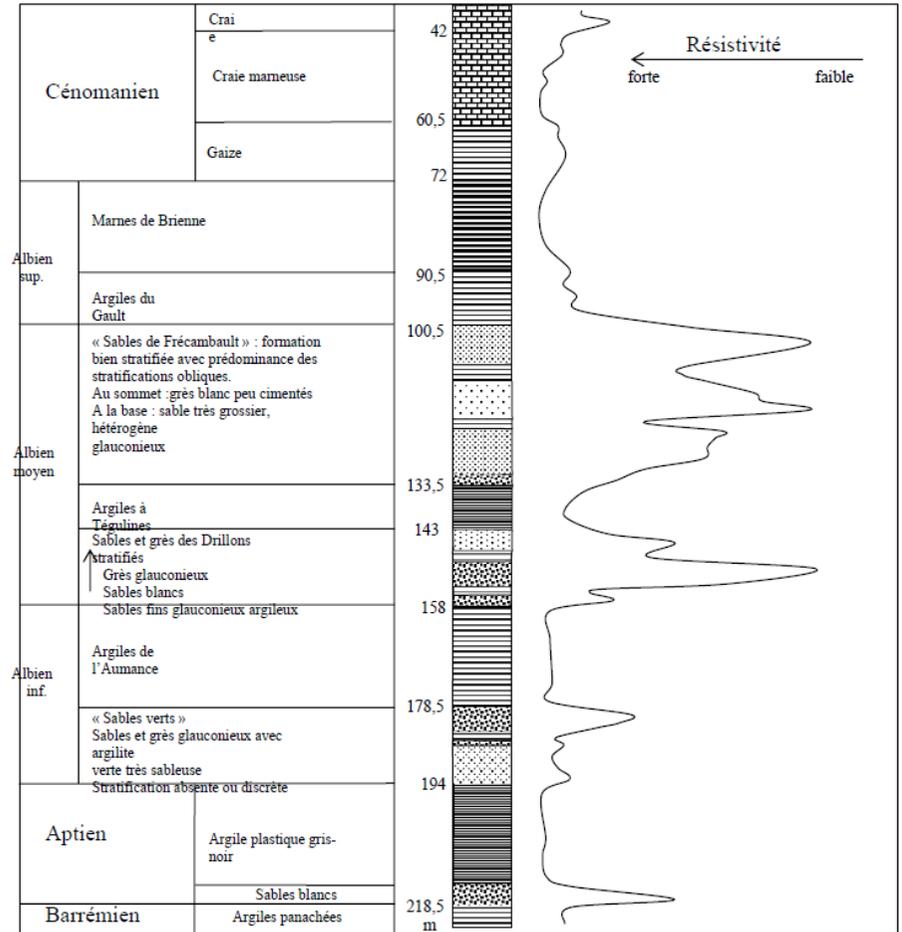
■ Log lithologique hydrogéologique

Application : Identifier les terrains perméables susceptibles de contenir une nappe

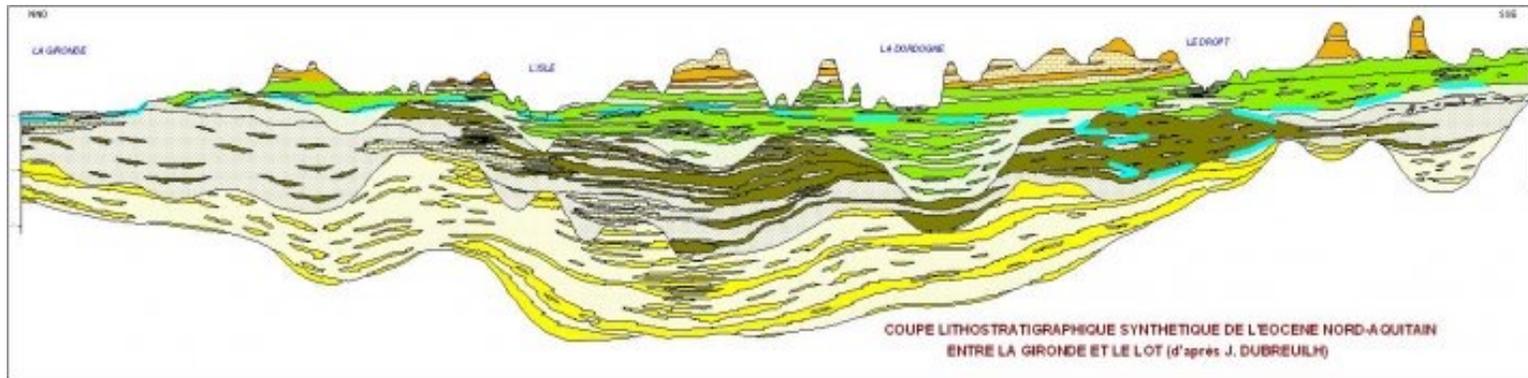
STRATIGRAPHIE :



LITHOLOGIE DOMINANTE :



Document 2A : colonne lithostratigraphique et enregistrement de la résistivité des terrains réalisés lors de la diaggraphie d'un forage.

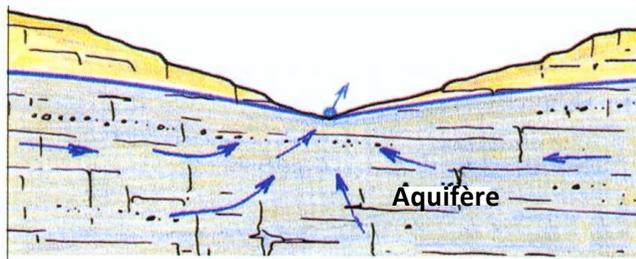


▪ Log lithologique hydrogéologique

Exemple de l'aquifère du Lez

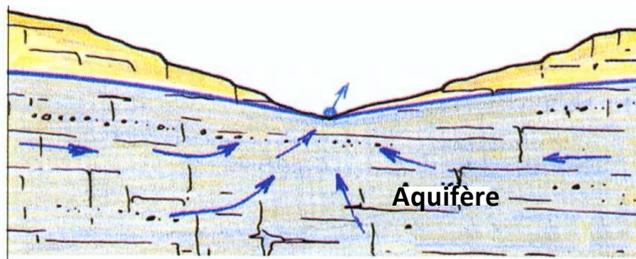
	Faciès dominant	Etage dominant	Série	Informations Hydrogéologiques	
	Sables et conglomérats		Quaternaire	perméable	
	Calcaires à Planorbis	Lutécien	Oligocène	Aquifère	
	Argiles		Eocène		Imperméable
	Lacune de sédimentation				
	Marno-calcaires	Valanginien	Crétacé inférieur	Imperméable - Toit de l'aquifère principal	
	calcaires	Berriasien			
calcaires		Jurassique supér	Perméable - Aquifère principal		
Marnes bleues Calcaires marneux	Callovo-Oxfordien			imperméable - Mur de l'aquifère principal	

- **Délimitation du système aquifère**
- Les différents types de source (exutoire du système)

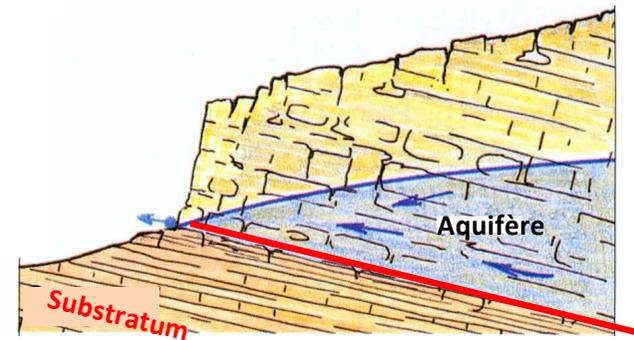


**Source de dépression/d'émergence.**

- **Délimitation du système aquifère**
- Les différents types de source (exutoire du système)

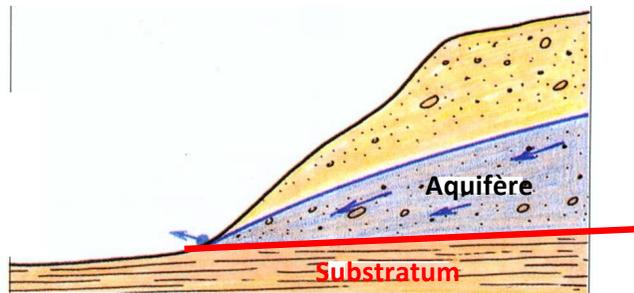


**Source de dépression/d'émergence.**



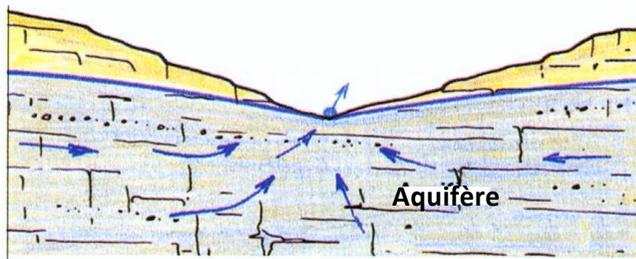
**Source de débordement. Ex : Source du Lez (cf. Sortie)**

(J.J. Collin, 2004)

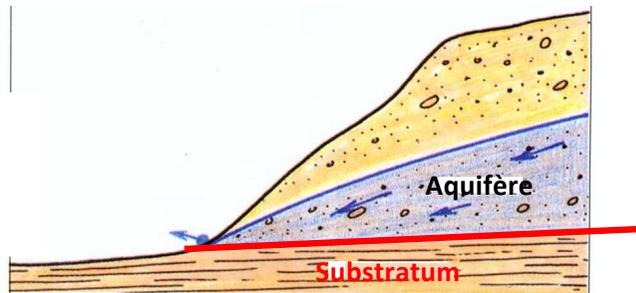


**Source de déversement, terrasses alluviales ( cf. Ex: TP4)**

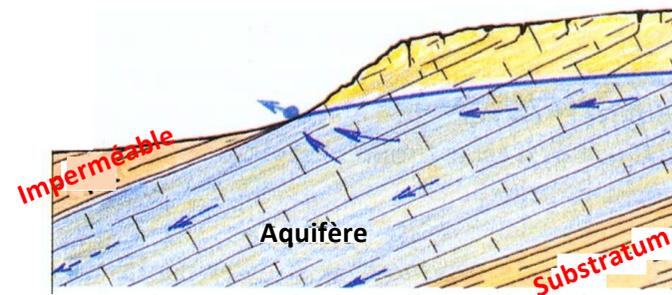
- **Délimitation du système aquifère**
- Les différents types de source (exutoire du système)



**Source de dépression/d'émergence.**



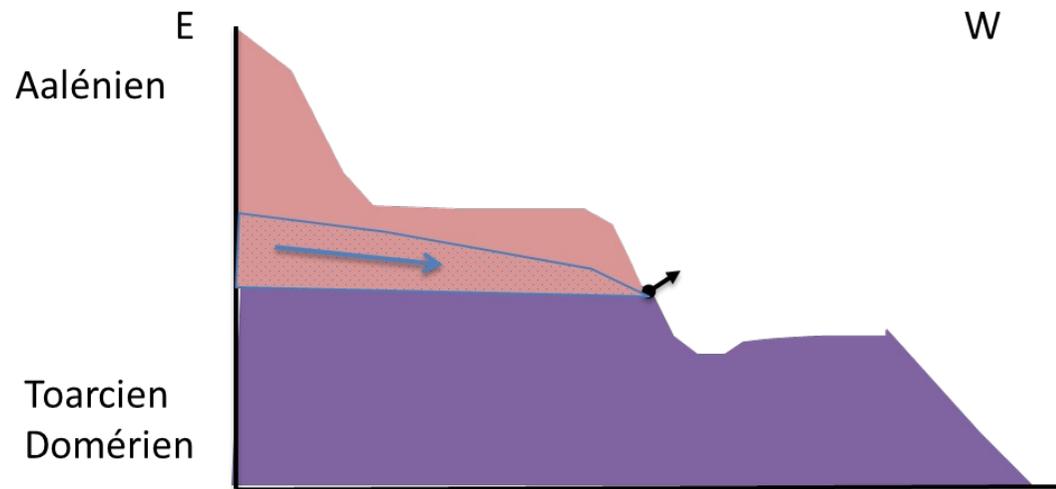
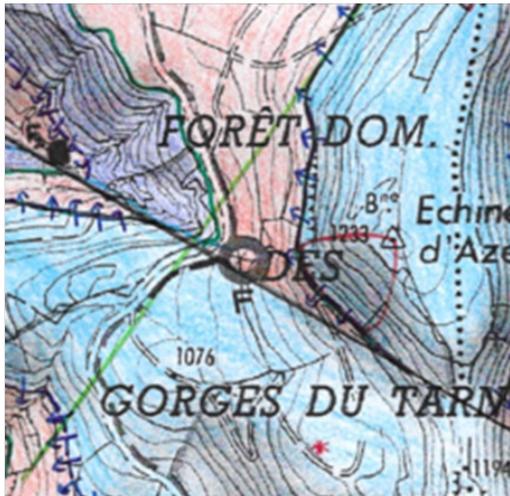
**Source de déversement, terrasses alluviales ( cf. Ex: TP4)**



**Source de trop-plein, nappe libre devenant captive. Ex: Sources du Lez ou Lirou (cf. Sortie)**

(J.J. Collin, 2004)

- **Délimitation du système aquifère**
- Les différents types de source
  - Exemple (Tarn)



□ **Caractérisation de la porosité**

▪ **Roches meubles**

⇒ Etude granulométrique en laboratoire

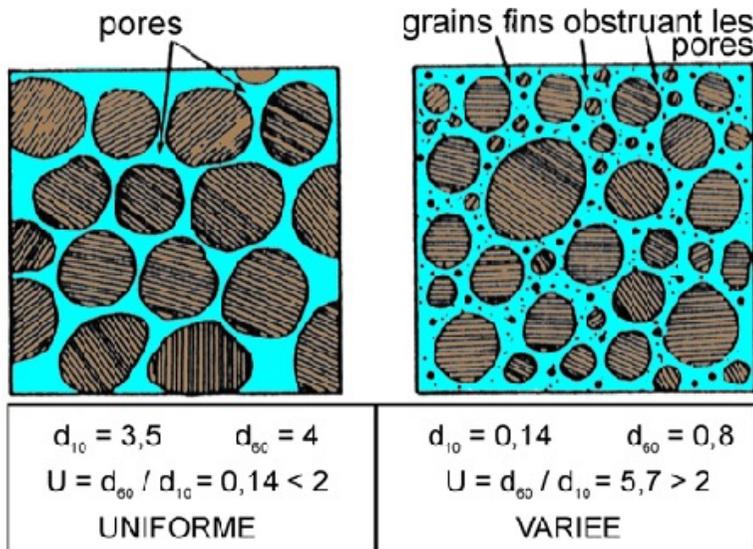
▪ Classification granulométrique

Position de la courbe : terme lithologique

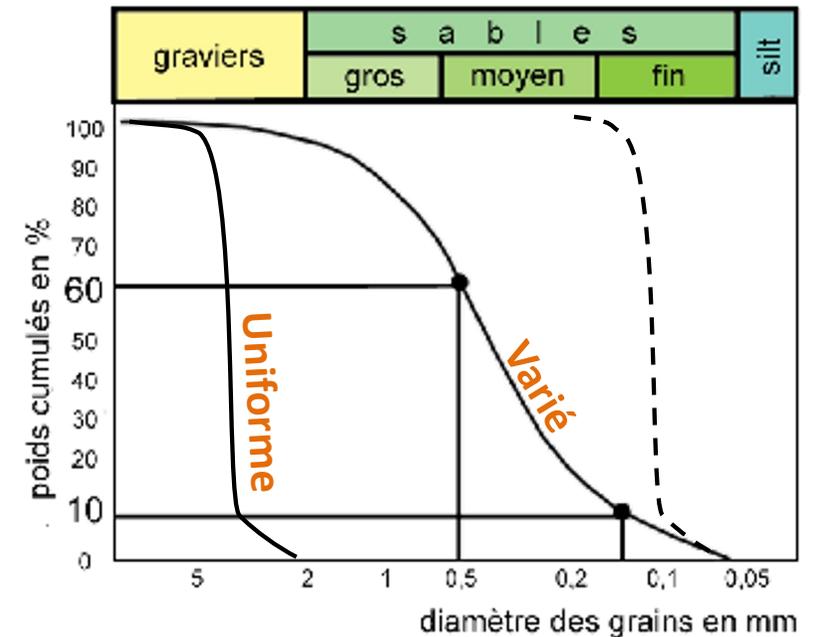
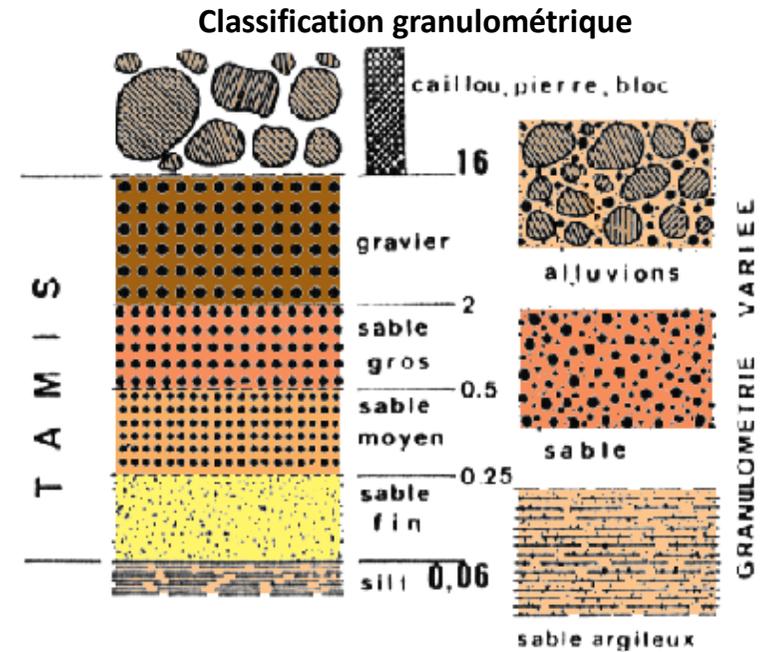
Pente de la courbe : type de granulométrie

▪ Paramètres granulométriques

- Diamètre caractéristique:  $d_{10}$ ,  $d_{60}$
- Pente: uniforme/varié
- Coefficient d'uniformité:  $U = d_{60}/d_{10}$



(Castany, 1982)

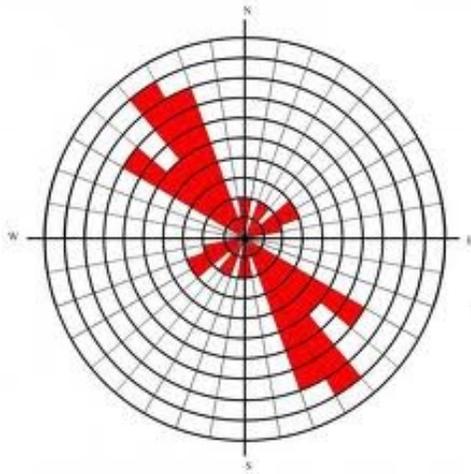


□ **Caractérisation de la porosité**

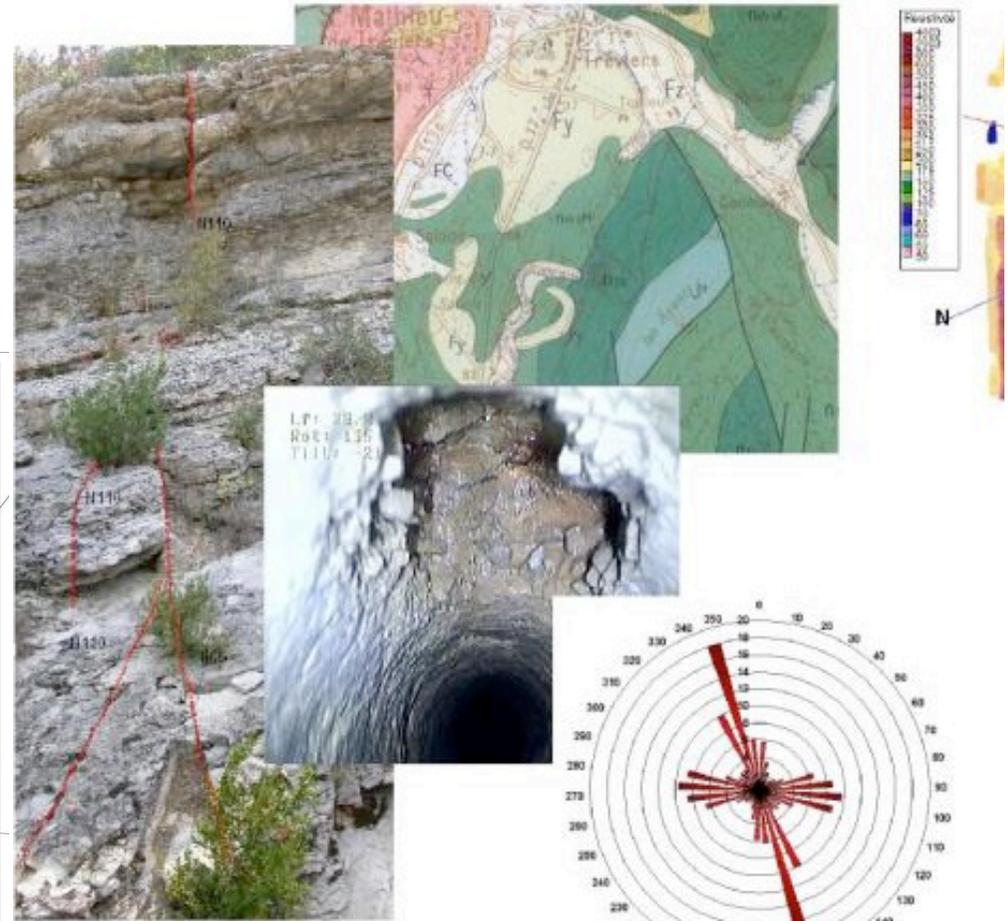
▪ **Roches compactes**

⇒ Analyse de la fracturation sur le terrain

Rosace en fréquence de la fracturation



Etude de la fracturation sur le site du Terrieu (St Matthieu de Tréviers)

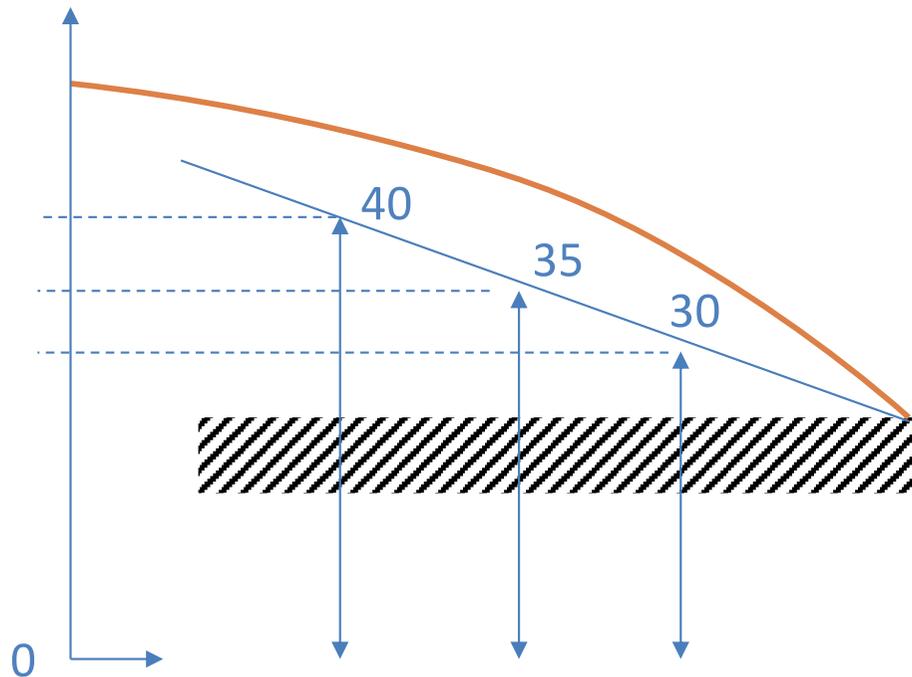


(Jazayeri, 2009)

## 2. Organisation et représentation des écoulements

### □ Relation écoulement/potentiel

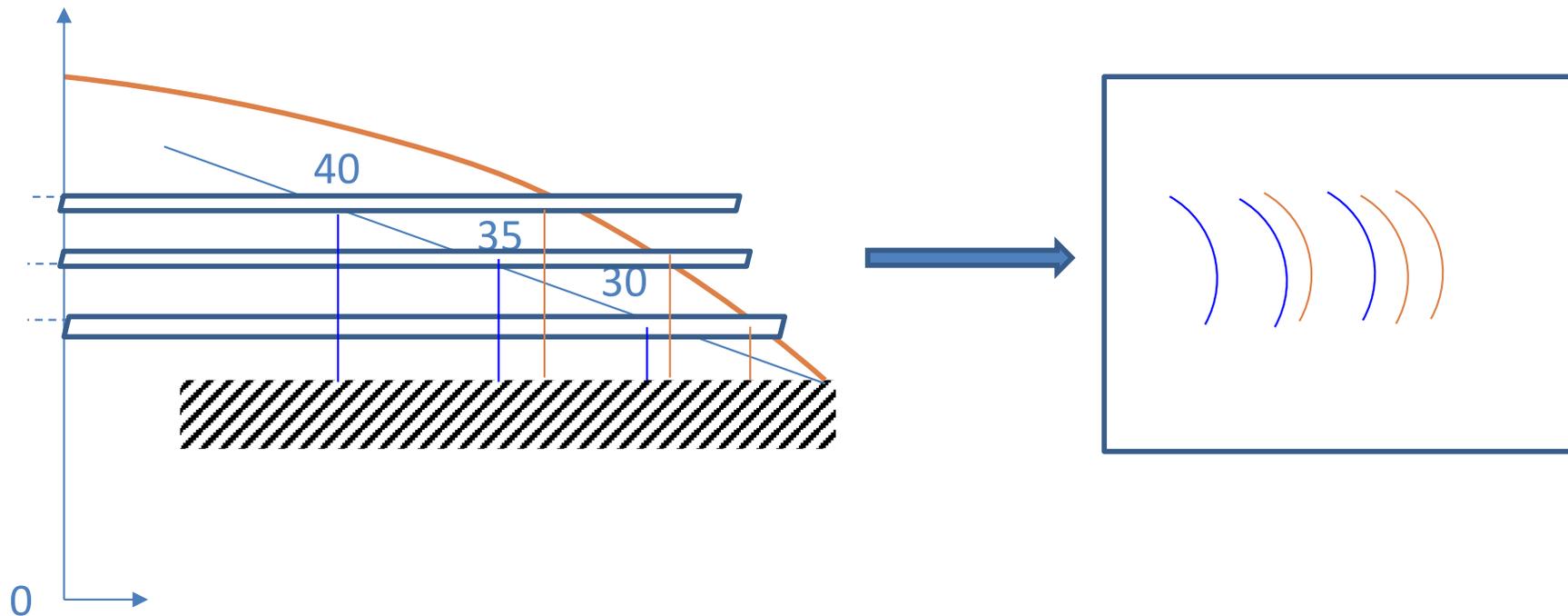
isopièzes, isohydrohypes, équipotentiellles



## 2. Organisation et représentation des écoulements

- **Relation écoulement/potentiel**
- **La carte piézométrique**

Représentation **en plan** de la surface piézométrique de la nappe = *image à 1 temps donné*



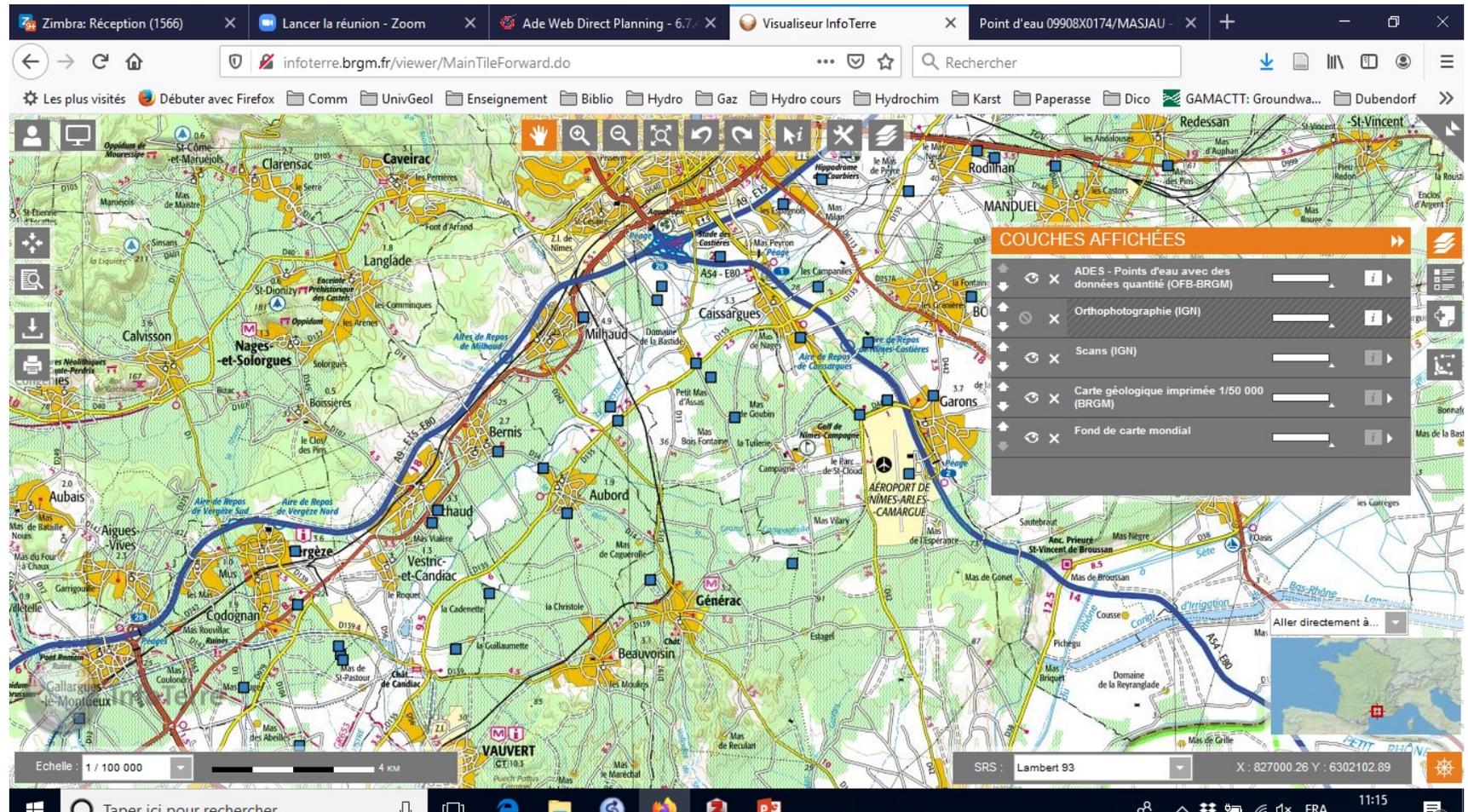
## □ La carte piézométrique

Représentation **en plan** de la surface piézométrique de la nappe

### □ Réalisation

#### ▪ Mesures

1/Recenser tous les points d'accès à la nappe  
(Infoterre, géoportail, terrain)



## □ La carte piézométrique

Représentation **en plan** de la surface piézométrique de la nappe

### □ Réalisation

#### ▪ Mesures

1/Recenser tous les points d'accès à la nappe

(Infoterre, géoportail, terrain)

**Point d'eau**  
**BSS002GQME**  
**(09908X0174/MASJAU)**  
**BRGM MONTPELLIER**

Code européen  
FR09908X0174/MASJAU

Imprimer la fiche  
Tout télécharger

**Nature**  
Puits

**État du point d'eau**  
Non renseignée

**Description**

Mesures de niveau d'eau

Description technique et hydrogéologique

**Producteurs de données**

**Descriptif du point d'eau souterrain :** BRGM  
**Données Quantité :** BRGM

**Réseau(x) de surveillance ADES**

Type de réseau	Code du réseau	Mnémonique du réseau	Nom du réseau	Date du début	Date de fin
PIEZO	000000029	RNESP	Réseau patrimonial national de suivi quantitatif des eaux souterraines	15/10/1974	
PIEZO	000000070	FR_SOP	Surveillance de l'état quantitatif des eaux souterraines de la France	15/10/1974	
PIEZO	000000073	RNESOUPMOBRGM	Réseau national de suivi quantitatif des eaux souterraines sous MO BRGM	12/11/2003	
PIEZO	060000004	RBESOUPRMC	Réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines du bassin Rhône-Méditerranée	15/10/1974	
PIEZO	060000021	RESOUPBRGMLRO	Réseau de surveillance de l'état quantitatif des eaux souterraines de la région Occitanie, zone Languedoc-Roussillon (MO BRGM)	12/11/2003	
PIEZO	060000023	FRDSOP	Surveillance de l'état quantitatif des eaux souterraines du bassin Rhône et cours d'eaux côtiers méditerranéen	15/10/1974	

**Site(s) hydrométrique(s)**

## □ La carte piézométrique

Représentation **en plan** de la surface piézométrique de la nappe

### □ Réalisation

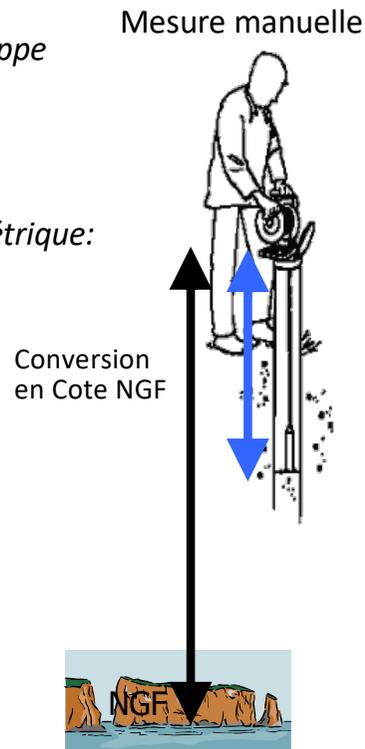
#### ▪ Mesures

1/Recenser tous les points d'accès à la nappe

(Infoterre, géoportail, terrain)

2/Réaliser une mesure du niveau piézométrique:

Profondeur de l'eau  
Altitude du point



	PIEZOMETRE	TETE N.G.F.	MESURE	NIVEAU D'EAU N.G.F.
1.	Concise	399,85	27	
2.	Ripaille limni.	388,85	16,24	
3.	Ripaille chasse	378,49	7,41	
4.	Epinanche	395,52	21,78	
5.	Baud	390,04	16,34	
6.	STEP	379,22	5,48	
7.	Dranse STEP			
8.	Vongy	399,5	22,88	
9.	Pont Bailey	385	0,12	
10.	St Agathe	390,71	17,68	
11.	Les Rouges	386,82	13,2	
12.	Amphion limni.	383,79	9,99	
13.	Gur	379,72	7,29	
14.	Soleunes	381,53	8,76	
15.	Près de Vigny	377,95	6,43	
16.	Mottay	375,78	3,82	
17.	Piézo. ordures	388,76	14,44	

### □ La carte piézométrique

Représentation **en plan** de la surface piézométrique de la nappe

#### □ Réalisation

##### ▪ Mesures

1/Recenser tous les points d'accès à la nappe

(Infoterre, géoportail, terrain)

2/Réaliser une mesure du niveau piézométrique:

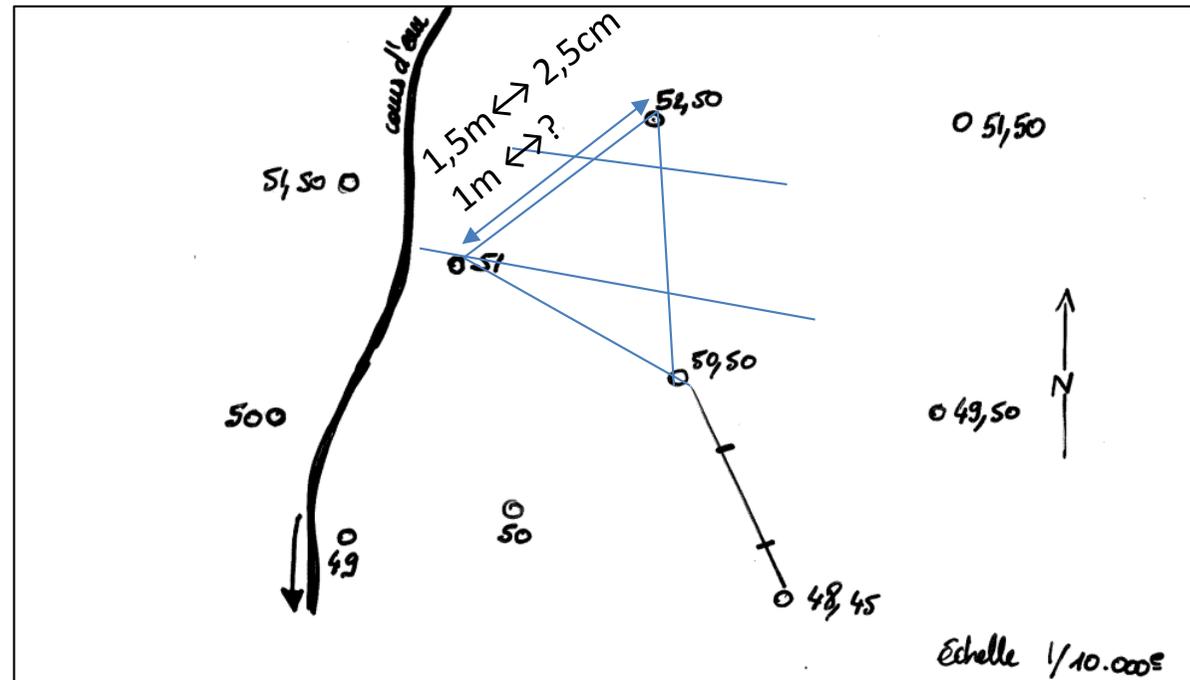
Profondeur de l'eau  
Altitude du point

##### ▪ Tracé

3/Localiser les points de mesure sur une carte

4/Choisir l'espacement des lignes isopièzes

5/Réaliser une interpolation spatiale (manuel ou logiciel)



## □ La carte piézométrique

Représentation **en plan** de la surface piézométrique de la nappe

### □ Réalisation

#### ▪ Mesures

1/Recenser tous les points d'accès à la nappe

(Infoterre, géoportail, terrain)

2/Réaliser une mesure du niveau piézométrique:

Profondeur de l'eau  
Altitude du point

#### ▪ Tracé

3/Localiser les points de mesure sur une carte

4/Choisir l'espacement des lignes isopièzes

5/Réaliser une interpolation spatiale (manuel ou logiciel)



## □ La carte piézométrique

Représentation **en plan** de la surface piézométrique de la nappe

### □ Réalisation

#### ■ Mesures

1/Recenser tous les points d'accès à la nappe

(Infoterre, géoportail, terrain)

2/Réaliser une mesure du niveau piézométrique:

Profondeur de l'eau  
Altitude du point

#### ■ Tracé

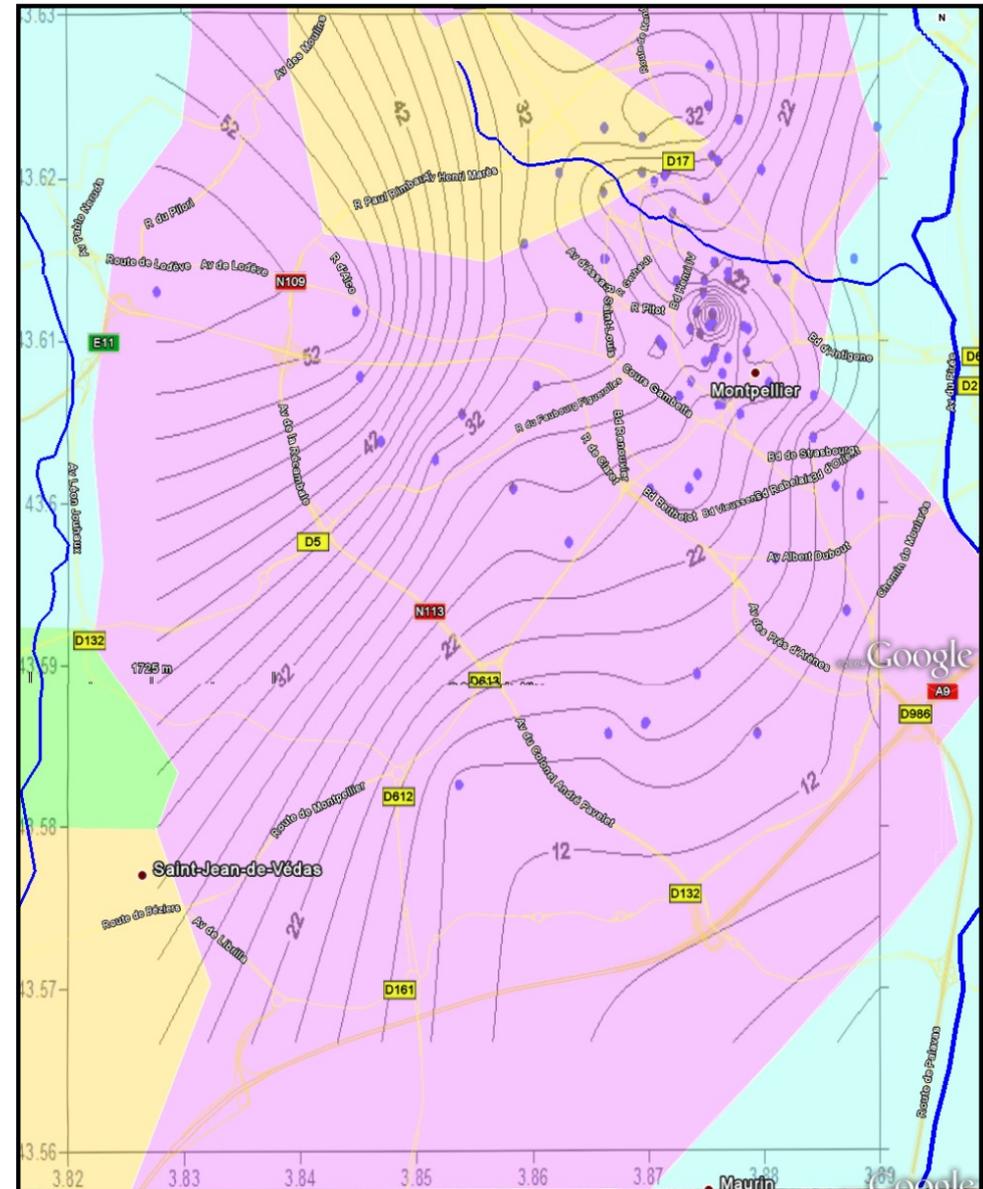
3/Localiser les points de mesure sur une carte

4/Choisir l'espacement des lignes isopièzes

5/Réaliser une interpolation spatiale (manuel ou logiciel)

Carte piézométrique de  
la nappe astienne de  
Montpellier,

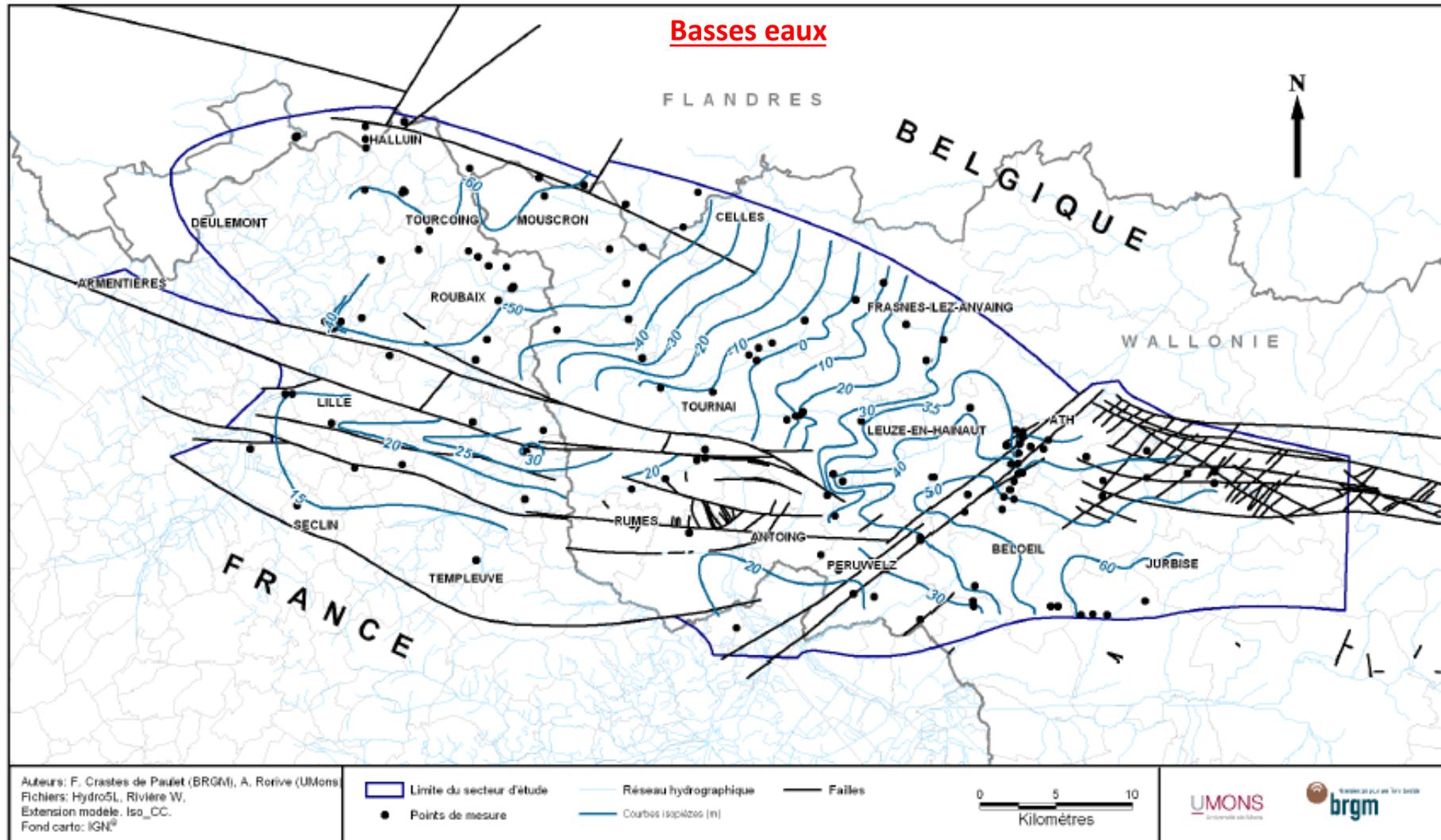
Licence STE



## 2. Organisation et représentation des écoulements

- Relation écoulement/potentiel
- La carte piézométrique

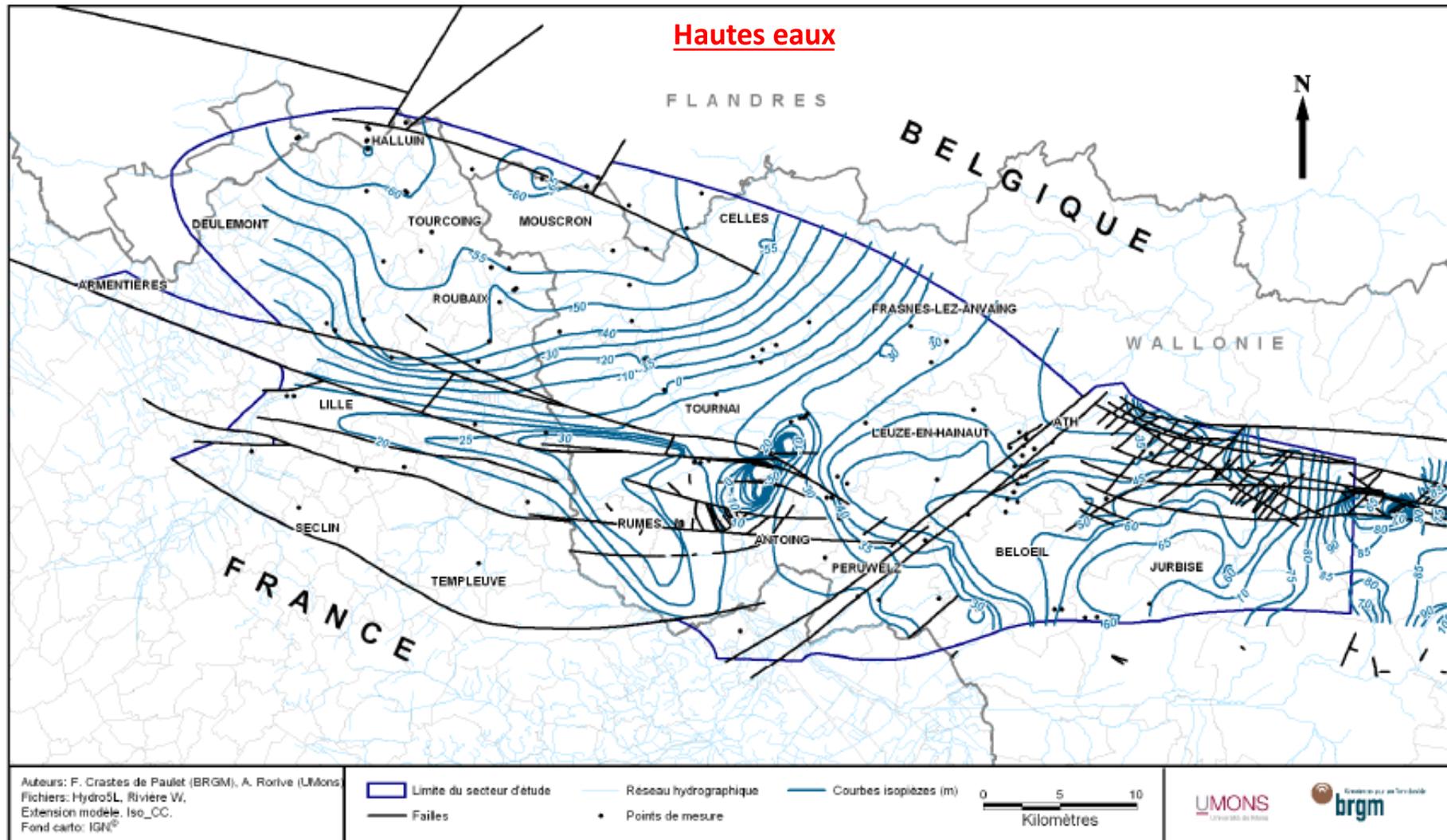
Représentation **en plan** de la surface piézométrique de la nappe = *image à 1 temps donné*



## 2. Organisation et représentation des écoulements

- Relation écoulement/potentiel
- La carte piézométrique

Représentation **en plan** de la surface piézométrique de la nappe = *image à 1 temps donné*



## □ La carte piézométrique

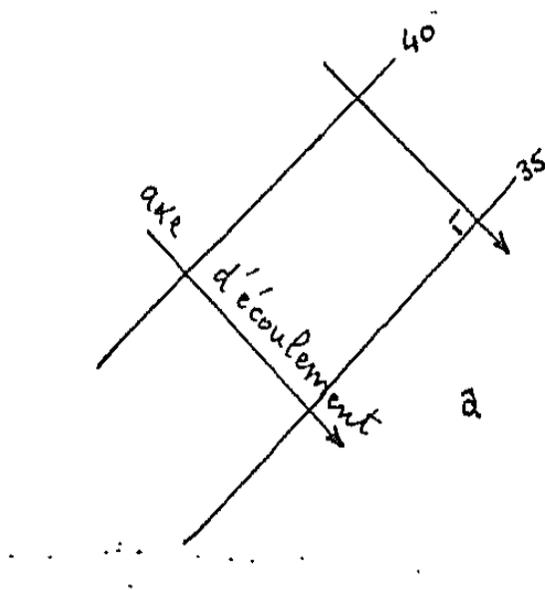
### □ Réalisation

### □ Interprétation Cf. TP 3

1/ Morphologie de la surface piézométrique : forme, groupement, orientation des courbes

⇒ **Modalité des écoulements**

→ Ligne de courant : l'eau souterraine se déplace perpendiculairement aux courbes isopièzes ⇒ **Direction, sens des écoulements**



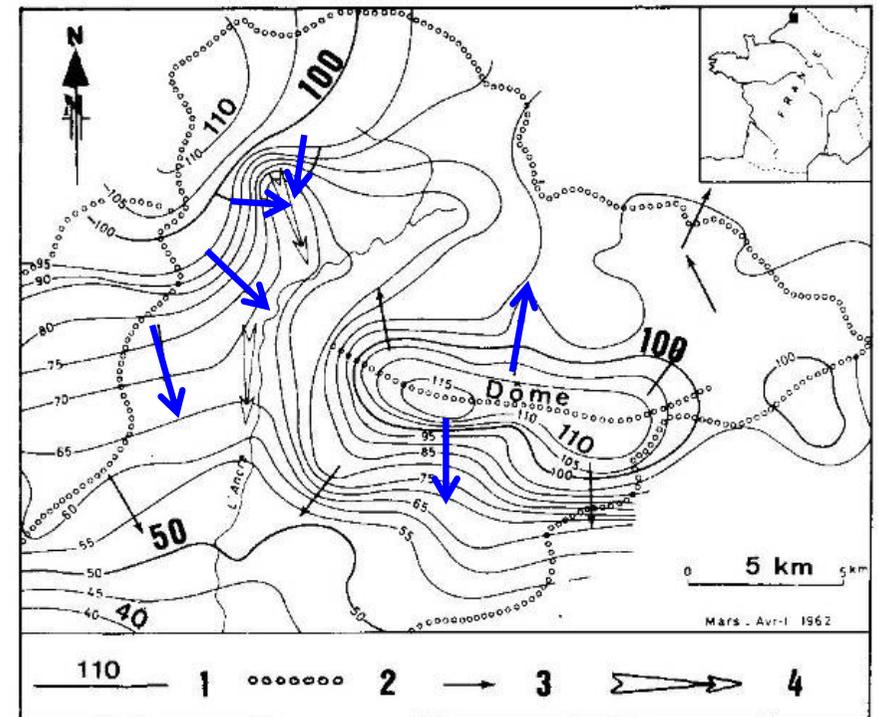
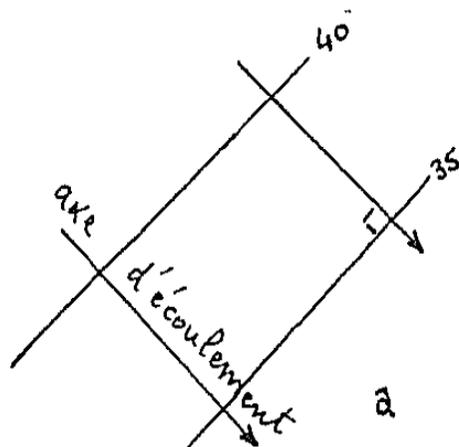
## □ La carte piézométrique

### □ Interprétation

1/ Morphologie de la surface piézométrique : forme, groupement, orientation des courbes

⇒ **Modalité des écoulements**

→ Ligne de courant : l'eau souterraine se déplace perpendiculairement aux courbes isopièzes ⇒ **Direction, sens des écoulements**



## □ La carte piézométrique

### □ Interprétation

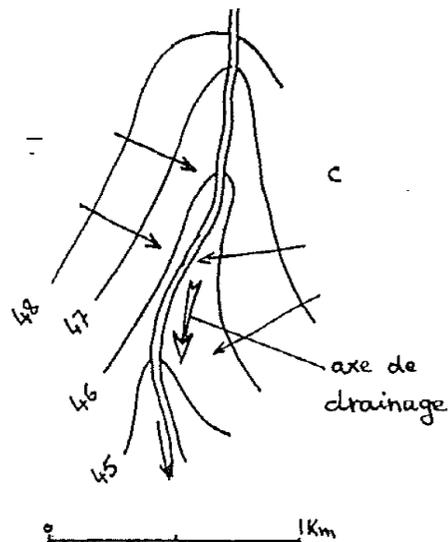
1/ Morphologie de la surface piézométrique : forme, groupement, orientation des courbes

⇒ **Modalité des écoulements**

→ Ligne de courant : l'eau souterraine se déplace perpendiculairement aux courbes isopièzes ⇒ **Direction, sens des écoulements**

→ Axes d'écoulements ⇒ **Organisation des écoulements**

- **Écoulements convergents**: axes de drainage (points bas)



## □ La carte piézométrique

### □ Interprétation

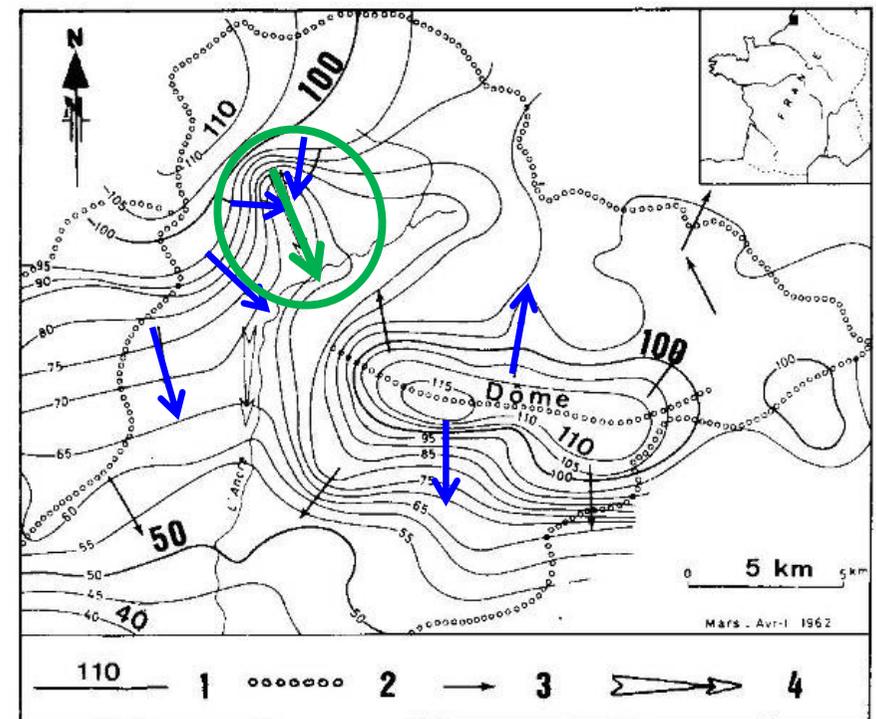
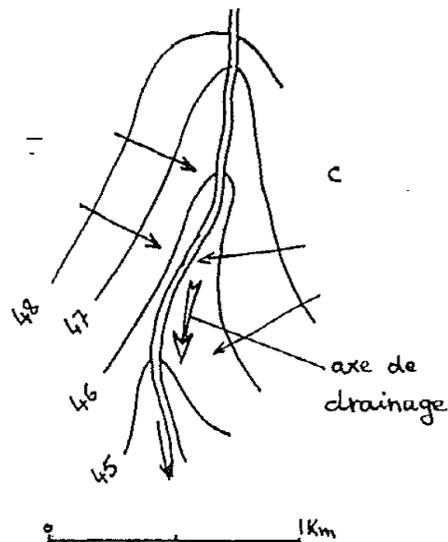
1/ Morphologie de la surface piézométrique : forme, groupement, orientation des courbes

⇒ **Modalité des écoulements**

→ Ligne de courant : l'eau souterraine se déplace perpendiculairement aux courbes isopièzes ⇒ **Direction, sens des écoulements**

→ Axes d'écoulements ⇒ **Organisation des écoulements**

- **Écoulements convergents**: axes de drainage (points bas)



## □ La carte piézométrique

### □ Interprétation

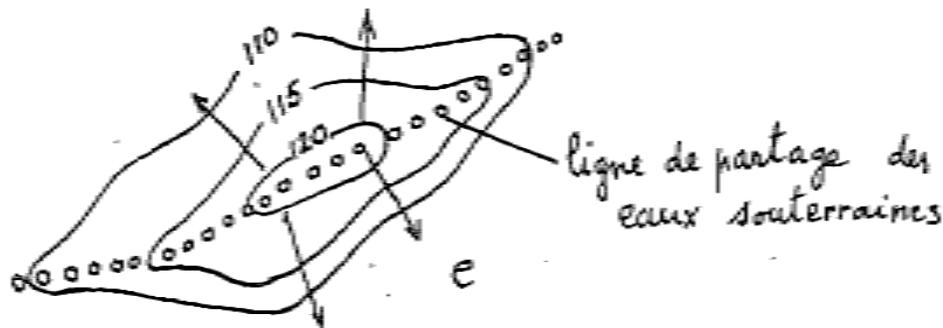
1/ Morphologie de la surface piézométrique : forme, groupement, orientation des courbes

#### ⇒ Modalité des écoulements

→ Ligne de courant : l'eau souterraine se déplace perpendiculairement aux courbes isopièzes ⇒ **Direction, sens des écoulements**

→ Axes d'écoulements ⇒ **Organisation des écoulements**

- **Écoulements convergents**: axes de drainage (points bas)
- **Écoulements divergents**: ligne de partage des eaux souterraines (points hauts)



## □ La carte piézométrique

### □ Interprétation

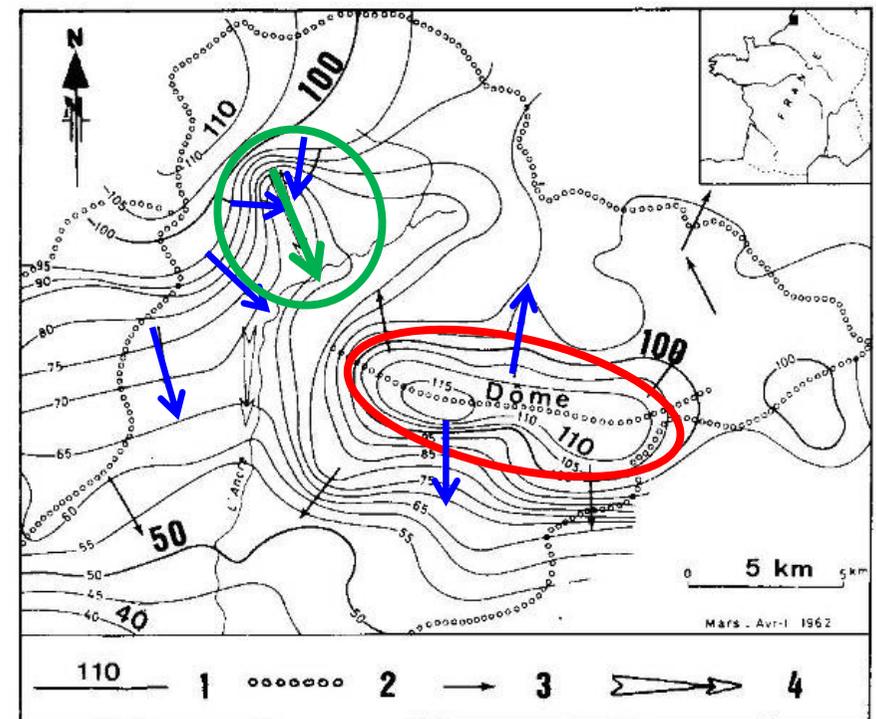
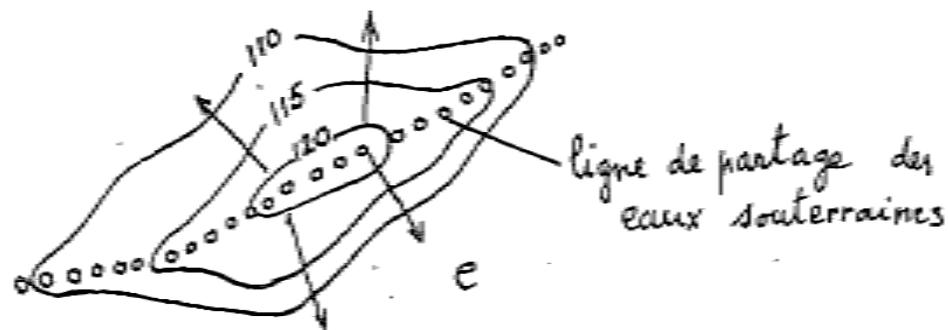
1/ Morphologie de la surface piézométrique : forme, groupement, orientation des courbes

⇒ **Modalité des écoulements**

→ Ligne de courant : l'eau souterraine se déplace perpendiculairement aux courbes isopièzes ⇒ **Direction, sens des écoulements**

→ Axes d'écoulements ⇒ **Organisation des écoulements**

- **Écoulements convergents**: axes de drainage (points bas)
- **Écoulements divergents**: ligne de partage des eaux souterraines (points hauts)



## □ La carte piézométrique

### □ Interprétation

1/ Morphologie de la surface piézométrique : forme, groupement, orientation des courbes

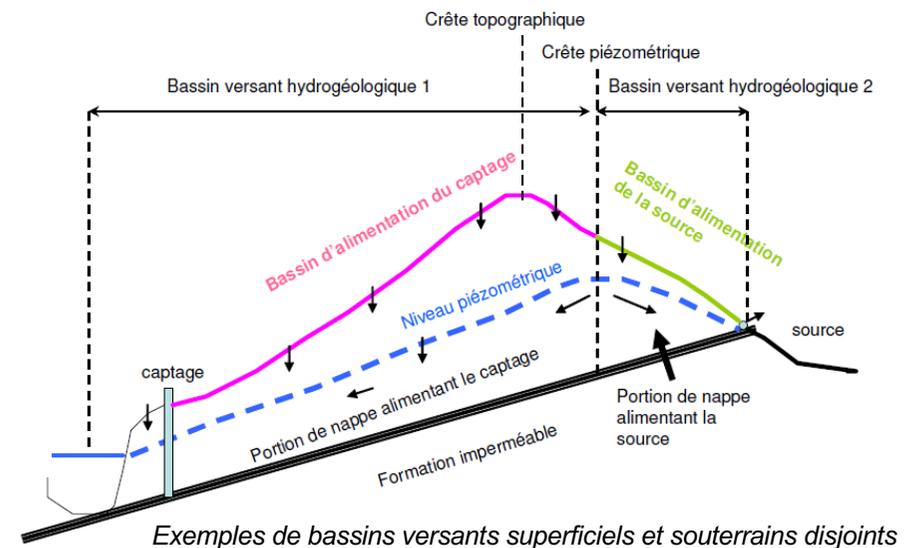
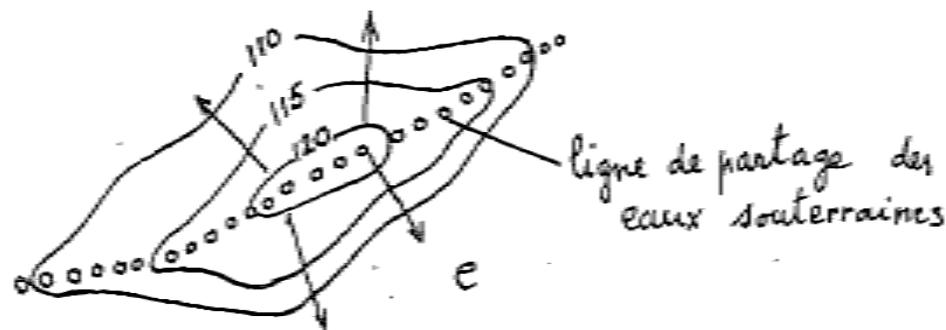
#### ⇒ Modalité des écoulements

→ Ligne de courant : l'eau souterraine se déplace perpendiculairement aux courbes isopièzes ⇒ Direction, sens des écoulements

→ Axes d'écoulements ⇒ Organisation des écoulements

- **Écoulements convergents**: axes de drainage (points bas)
- **Écoulements divergents**: ligne de partage des eaux souterraines (points hauts)

↳ Détermination des **unités (BV) hydrogéologiques**



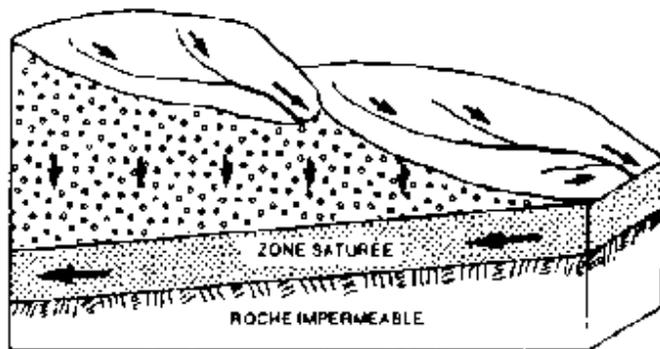
## □ La carte piézométrique

### □ Interprétation

1/ Morphologie de la surface piézométrique : forme, groupement, orientation des courbes

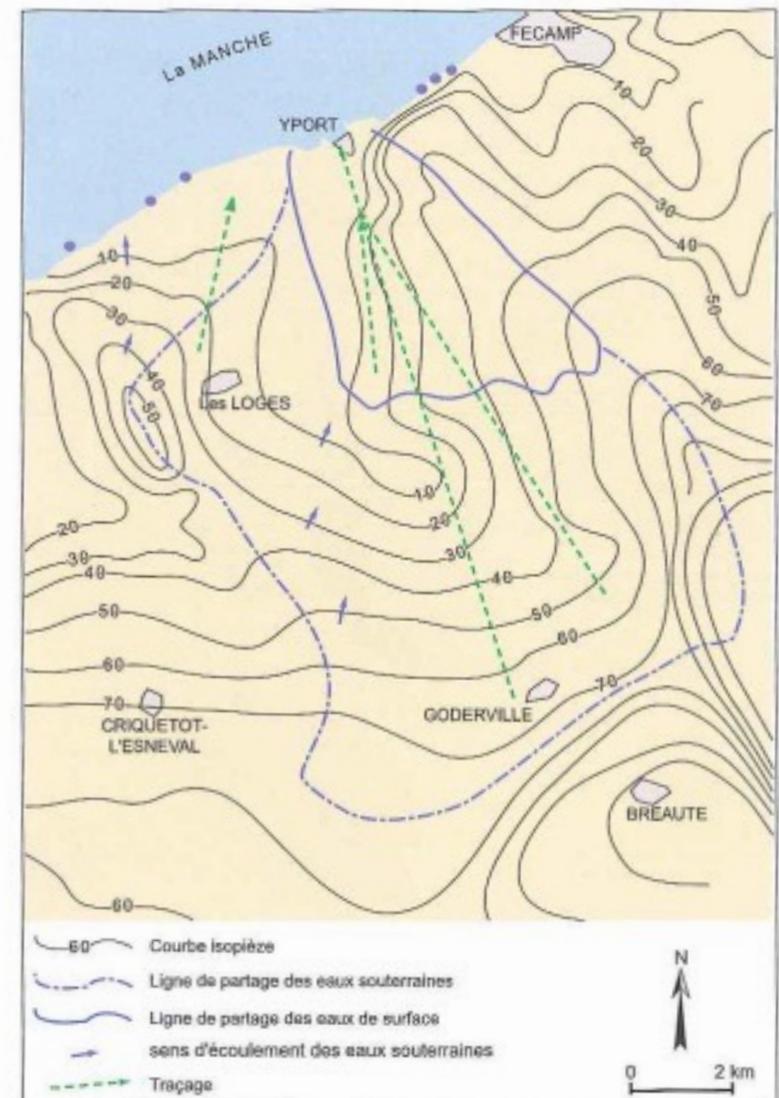
⇒ **Modalité des écoulements**

- Ex: BV hydrologique et hydrogéologique disjoints



Exemple de la nappe de la Craie dans le bassin d'Yport (76):

- BV de surface = 18 km<sup>2</sup>
- BAC (sources) = 90 km<sup>2</sup>



## □ La carte piézométrique

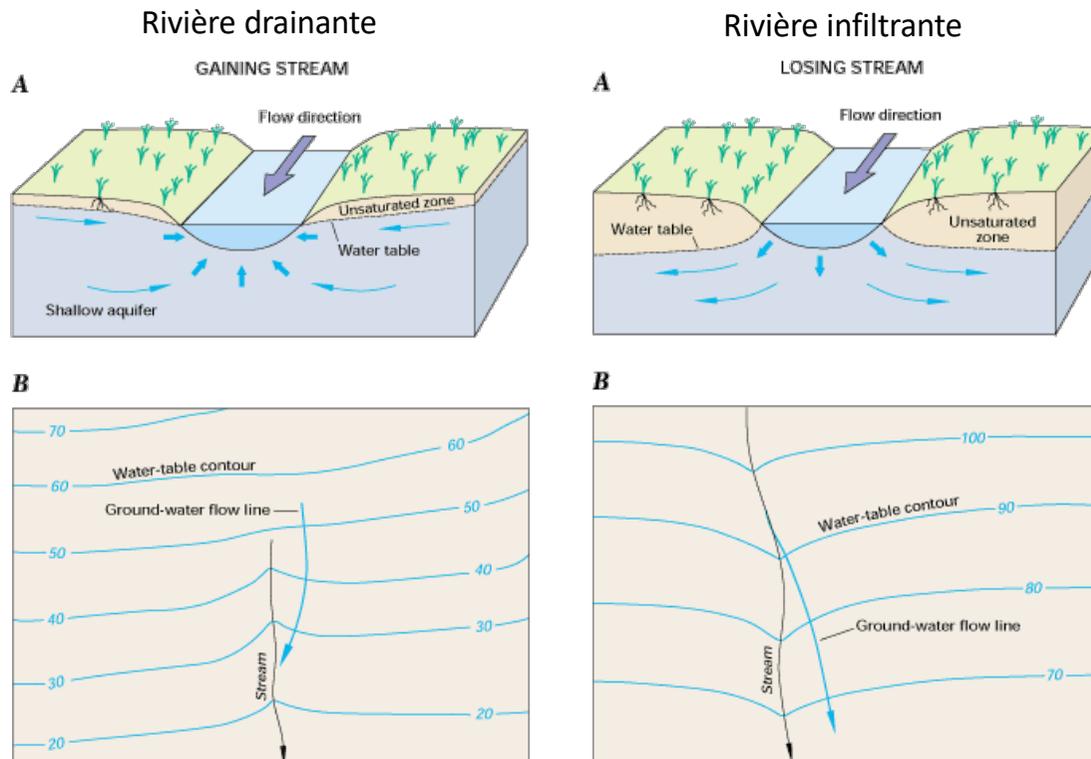
### □ Interprétation

1/ Morphologie de la surface piézométrique : forme, groupement, orientation des courbes

⇒ **Modalité des écoulements**

→ zone d'alimentation et de drainage

▪ Ex: détermination de la relation nappe/rivière



□ La carte piézométrique

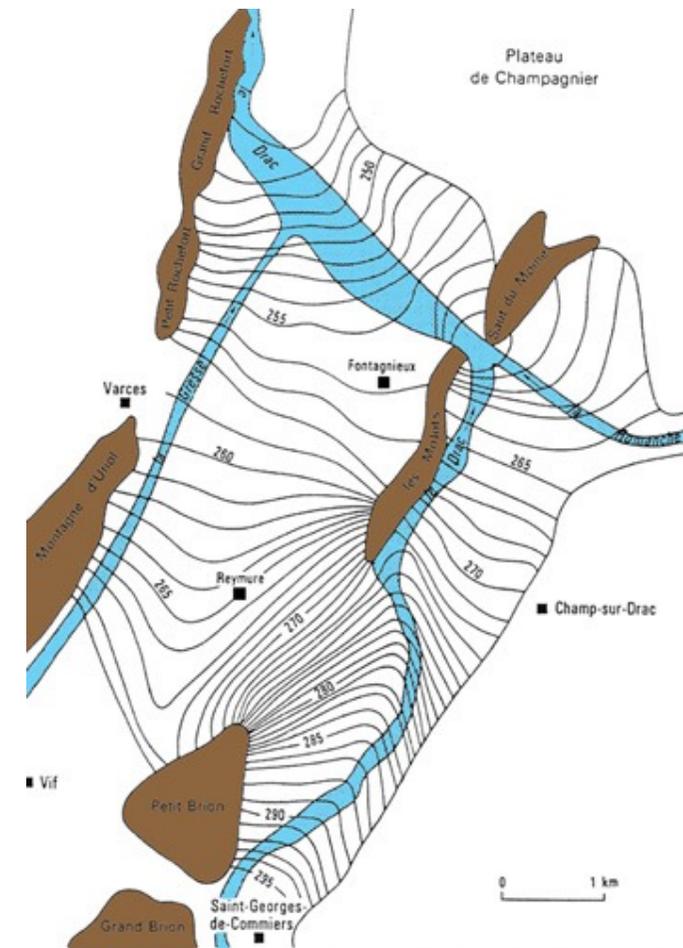
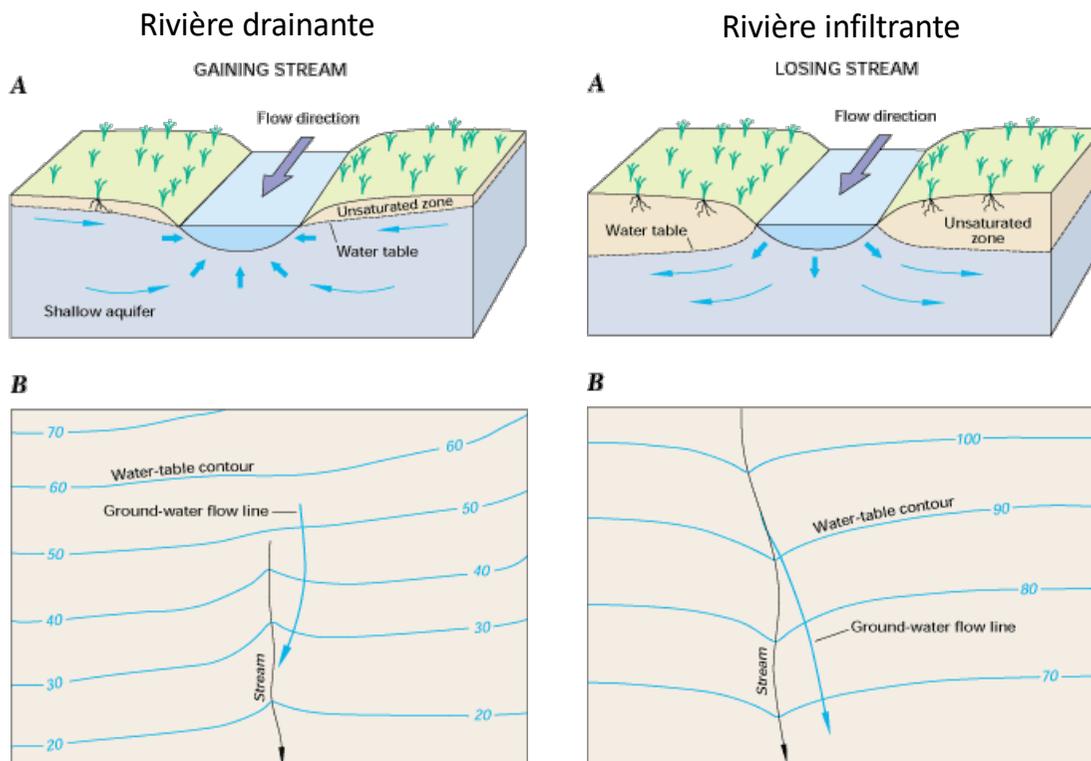
□ Interprétation

1/ Morphologie de la surface piézométrique : forme, groupement, orientation des courbes

⇒ Modalité des écoulements

→ zone d'alimentation et de drainage

■ Ex: détermination de la relation nappe/rivière



Carte piézométrique de la nappe du Drac et de la Gresse.

☞ Dans quel cas une pollution dans la rivière sera un pb pour les eaux souterraines?

## □ La carte piézométrique

### □ Interprétation

1/ Morphologie de la surface piézométrique : forme, groupement, orientation des courbes

⇒ **Modalité des écoulements**

→ zone d'alimentation et de drainage

■ Ex: influence d'un pompage

Sans pompage

Avec pompage



Réalimentation d'une nappe par un cours d'eau sous l'influence d'un pompage (SOLEN-EGS, 2001)

□ La carte piézométrique

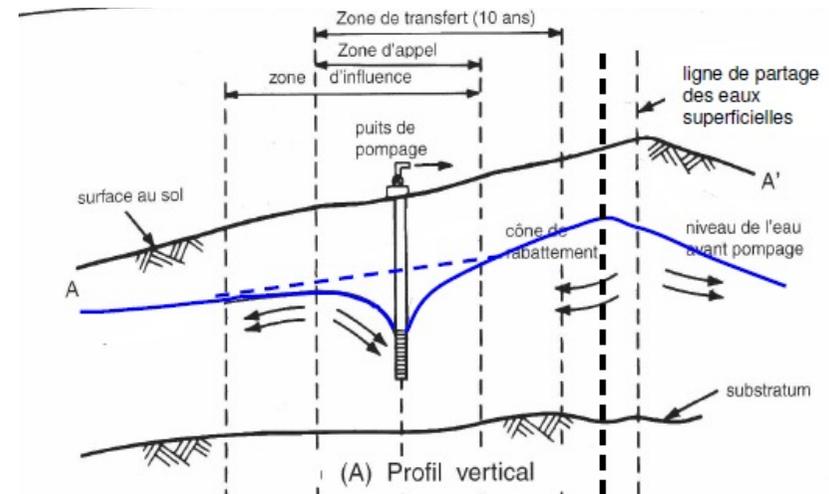
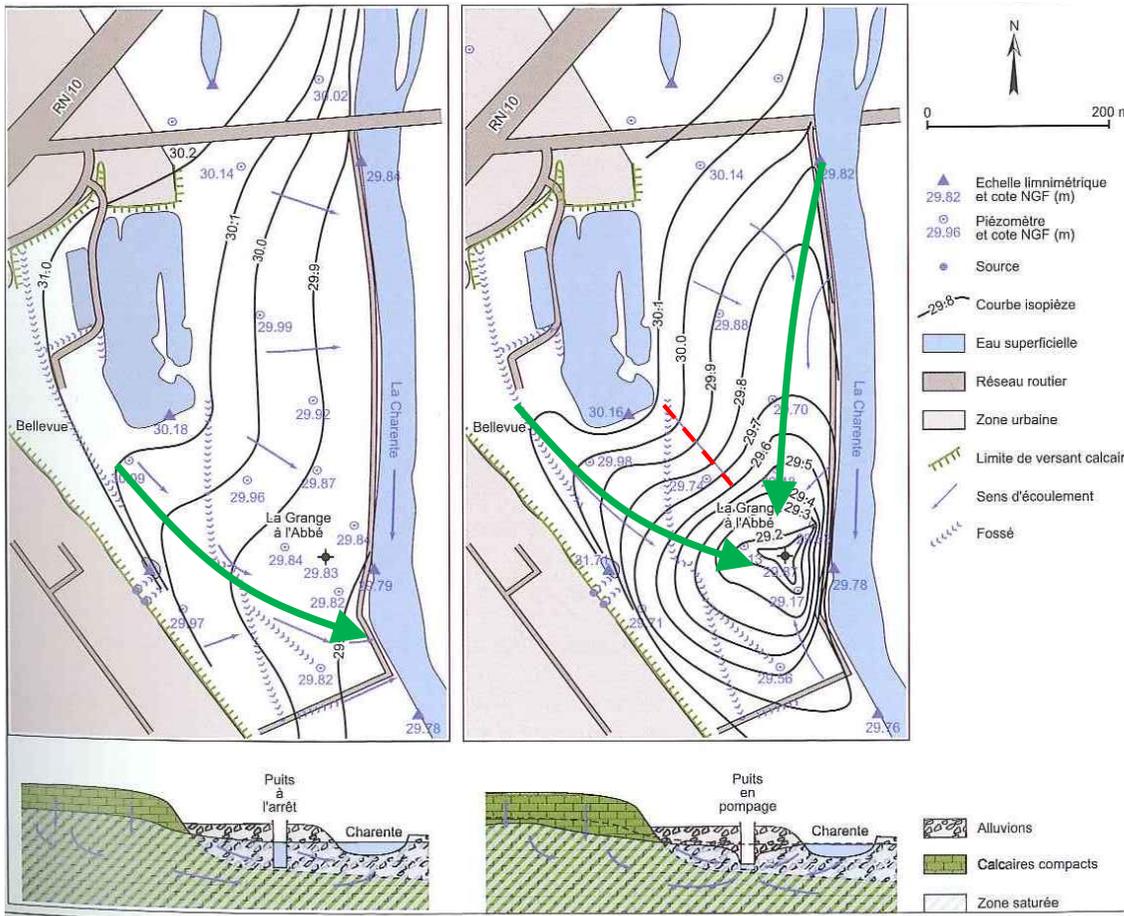
□ Interprétation

1/ Morphologie de la surface piézométrique : forme, groupement, orientation des courbes

⇒ Modalité des écoulements

→ zone d'alimentation et de drainage

■ Ex: influence d'un pompage



(SOLEN-EGS, 2001)

## □ La carte piézométrique

### □ Interprétation

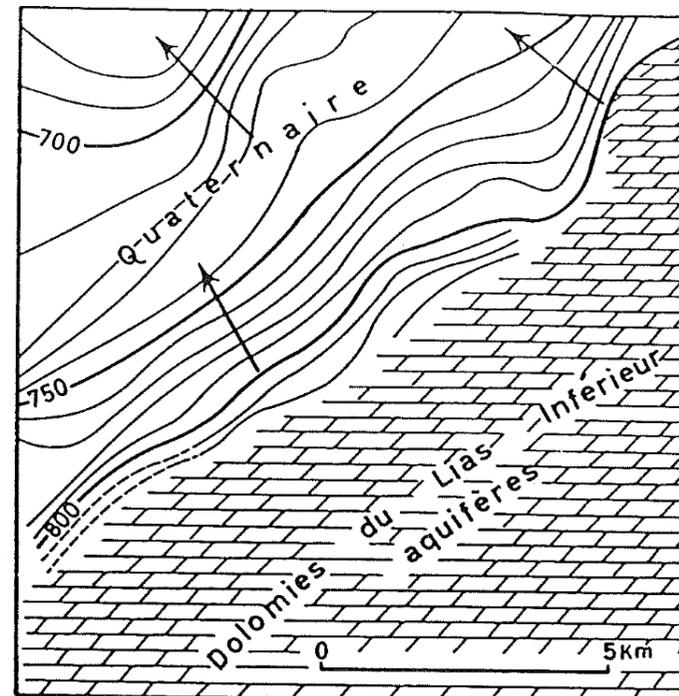
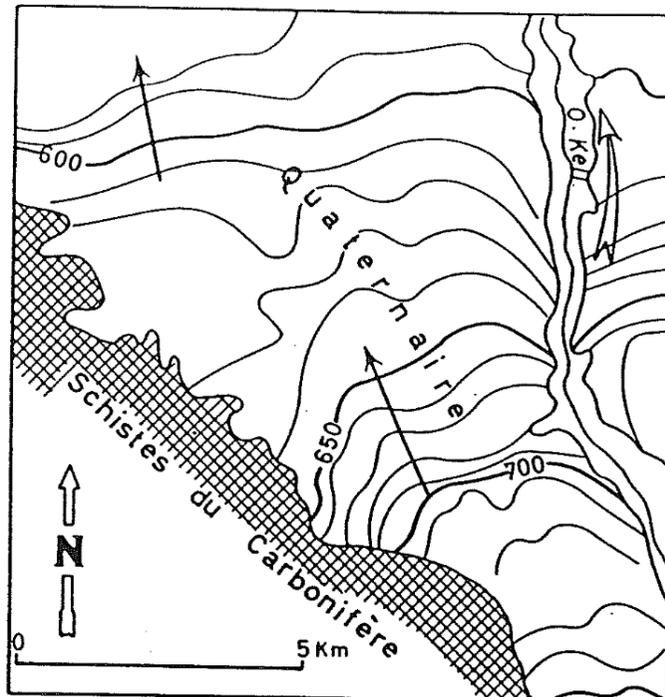
1/ Morphologie de la surface piézométrique : forme, groupement, orientation des courbes

⇒ **Modalité des écoulements**

→ zone d'alimentation et de drainage

- Ex: conditions aux limites du système

☞ Quelle différence remarquez-vous sur le tracé des izopièses au contact de la 2nd formation?



## □ La carte piézométrique

### □ Interprétation

1/ Morphologie de la surface piézométrique : forme, groupement, orientation des courbes

⇒ **Modalité des écoulements**

→ zone d'alimentation et de drainage

▪ Ex: conditions aux limites du système

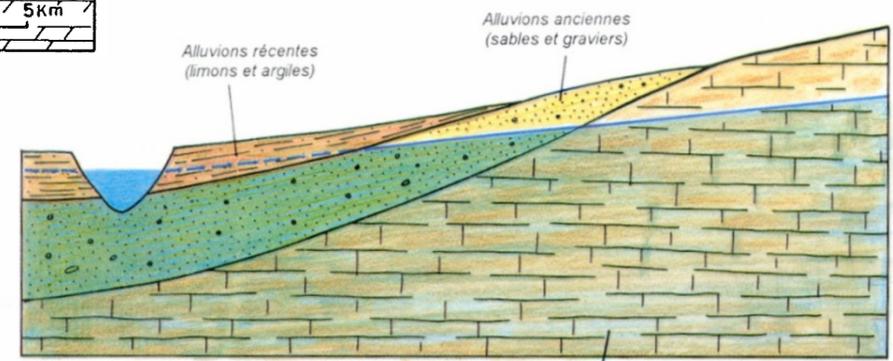
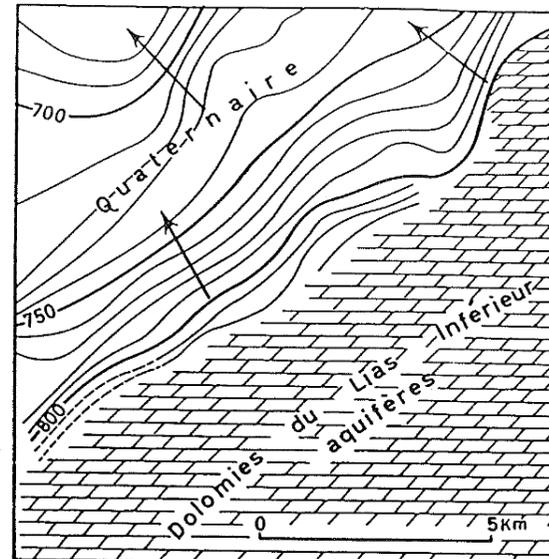
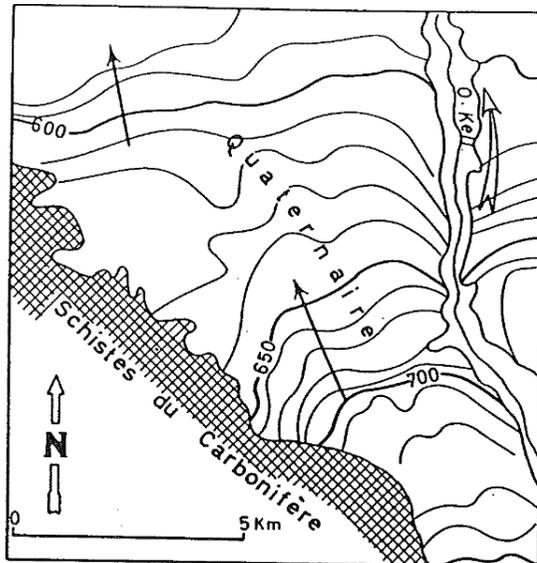


Illustration 20 - Exemple de communication entre la craie et les alluvions

## □ La carte piézométrique

### □ Interprétation

2/ Espacement des courbes :

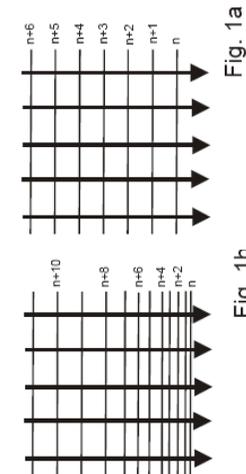
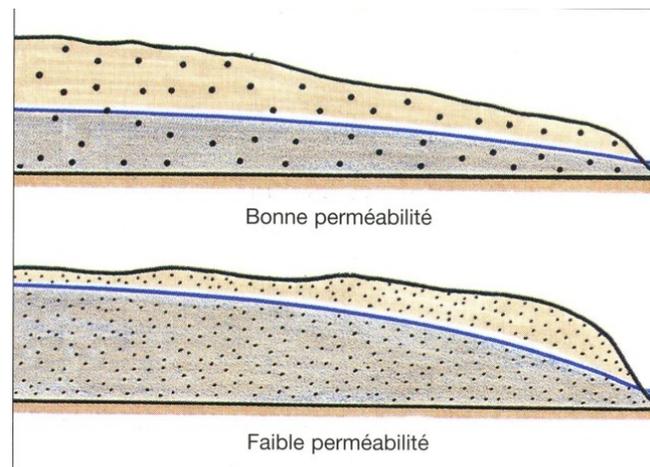
- ⇒ **Caractéristiques hydrodynamiques** (K,T, et leurs variations spatiales)
- Calcul du débit et de la vitesse d'écoulement
- Variation du gradient hydraulique



Conséquence de  $Q = K.A.i$  si  $Q = \text{constante}$

- Pour  $A = \text{constante}$
- Pour  $K = \text{constante}$

#### ▪ Variation de K



## □ La carte piézométrique

### □ Interprétation

2/ Espacement des courbes :

⇒ **Caractéristiques hydrodynamiques** (K,T, et leurs variations spatiales)

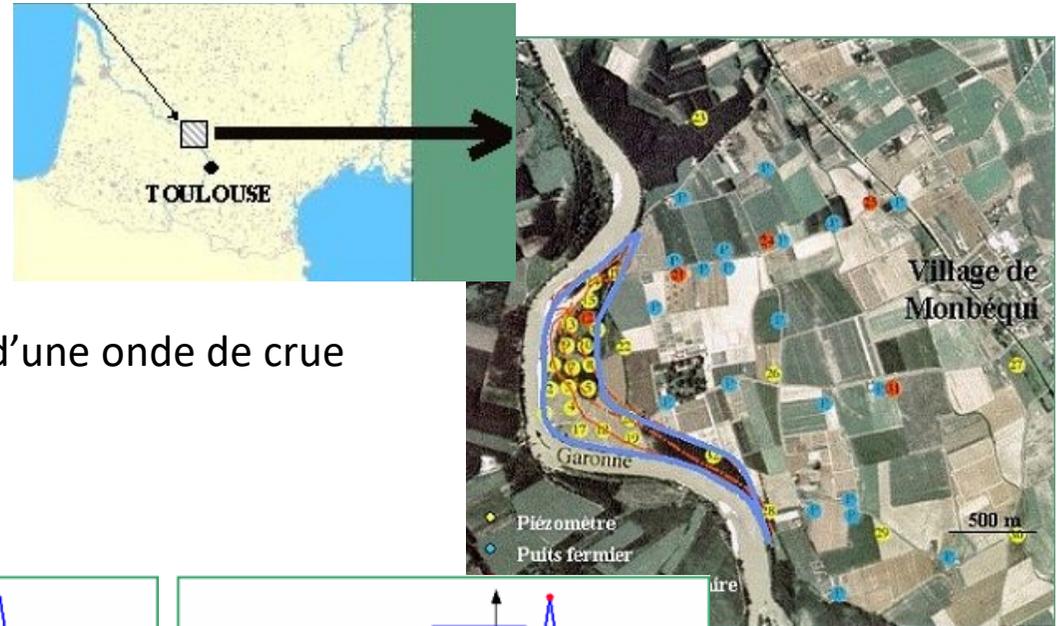
→ Calcul du débit et de la vitesse d'écoulement

→ Variation du gradient hydraulique

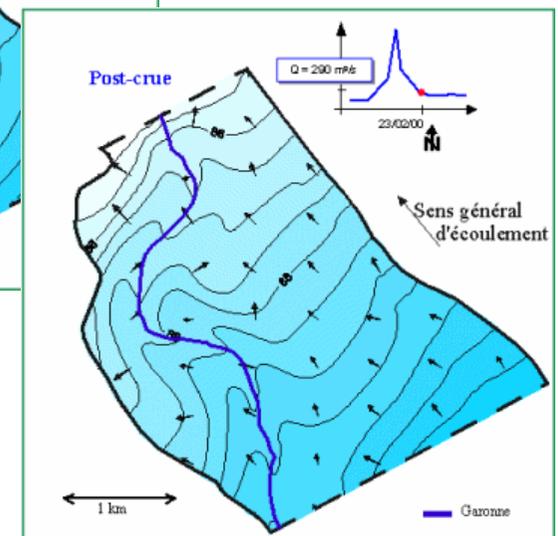
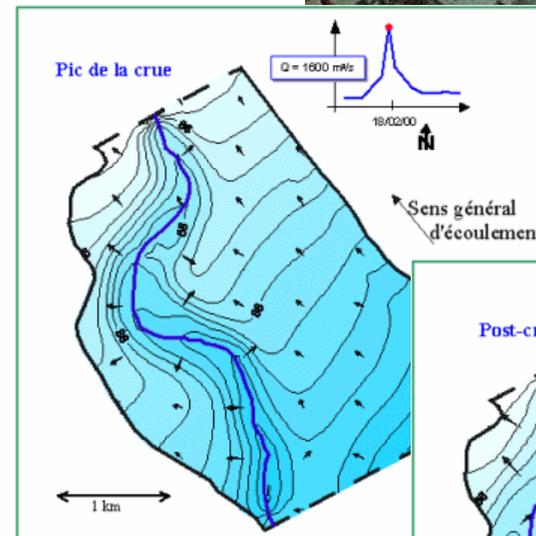
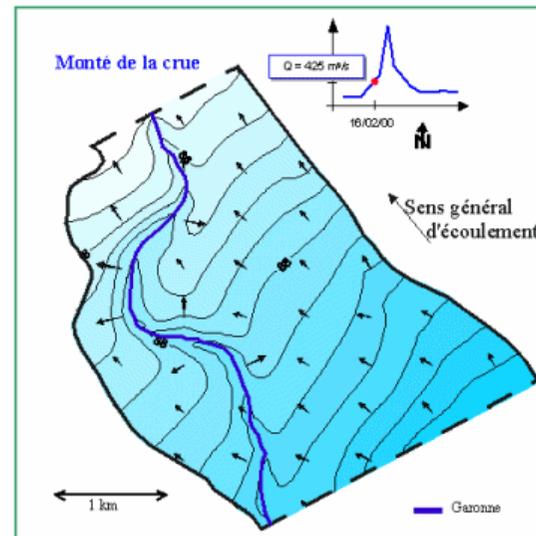
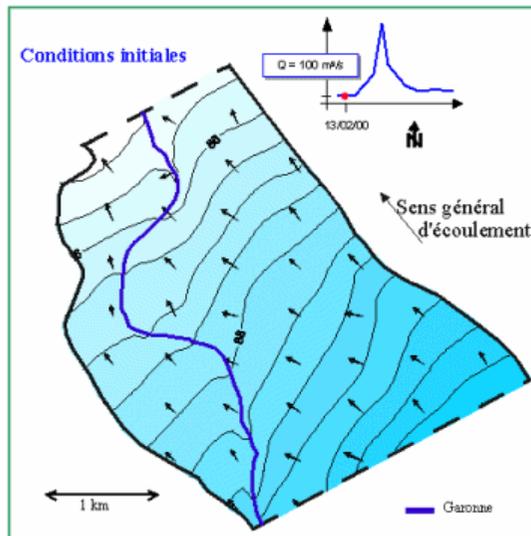
- Variation de K
- Variation de la section d'écoulement
- Variation du débit

## □ La carte piézométrique

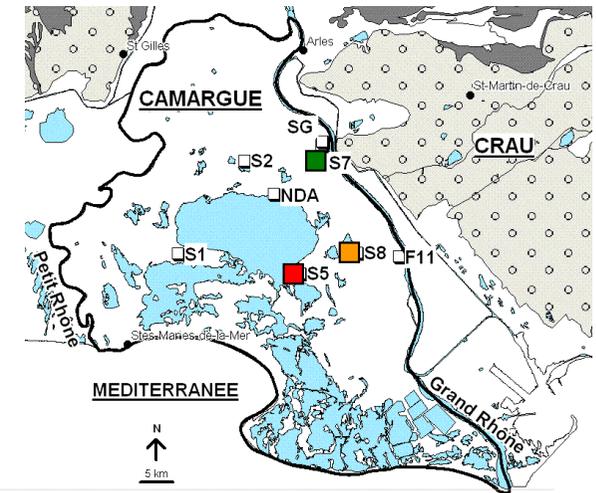
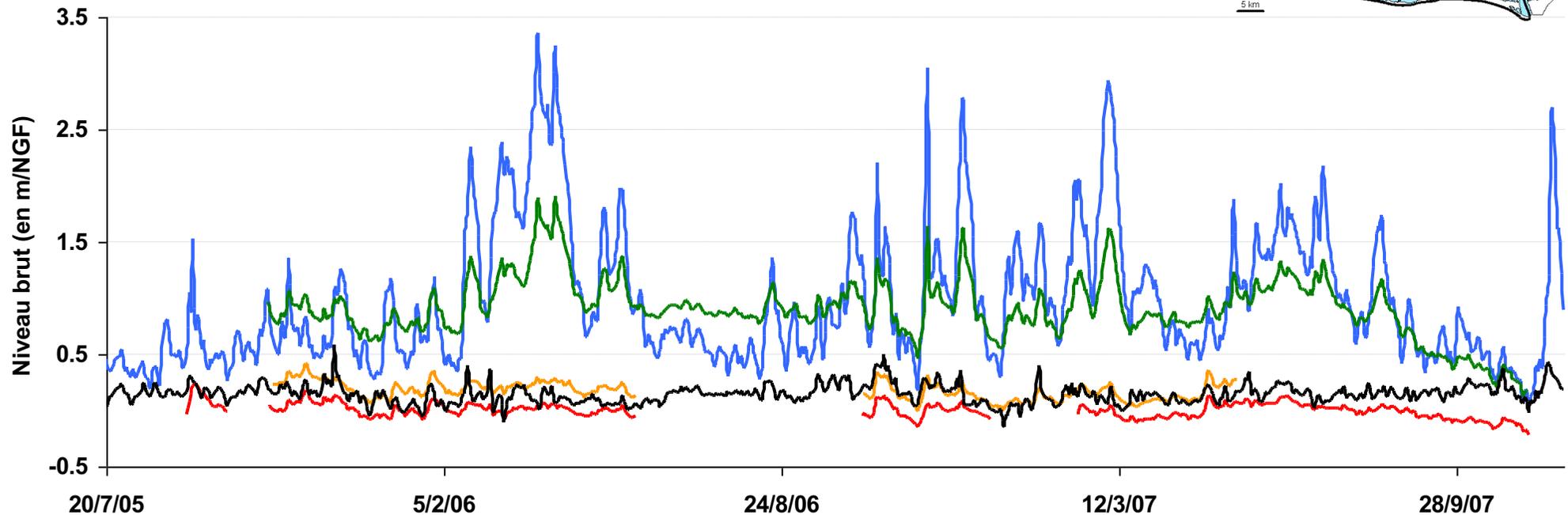
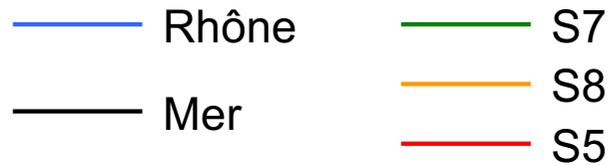
- Exemple d'un aquifère alluvial



Relation nappe/rivière et propagation d'une onde de crue

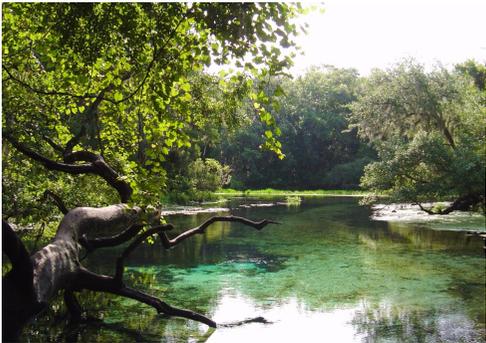


- ▶ Etude piézométrique dans l'espace : carte piézométrique
- ▶ Etude piézométrique dans le temps (long terme -mois/année):  
chronique piézométrique





Piezomètre dans le glissement de Super-Sauze, Haute-Provence



Sources d'Ichetucknee, Floride

Site expérimental de Kerrien, Bretagne



## Licence 2 Sciences de la Terre et de l'eau – S3

# HYDROGEOLOGIE GENERALE

## HLST 304

### II. Méthode d'étude du fonctionnement des aquifères

CM5. Cartographie hydrogéologique

**CM6. Forage et essais par pompage**

**1. Réalisation d'un forage et validation par essai de puits**

- 1.1. Les différents types d'ouvrage
- 1.2. Réalisation d'un forage
- 1.3. Les essais de puits

**2. Caractérisation de l'aquifère par essai de nappe**

- 2.1. Influence d'un pompage sur les écoulements des eaux souterraines
- 2.2. Les essais de nappe

CM7. Caractérisation hydrochimique de l'eau de l'aquifère

CM8. Protection des eaux souterraines

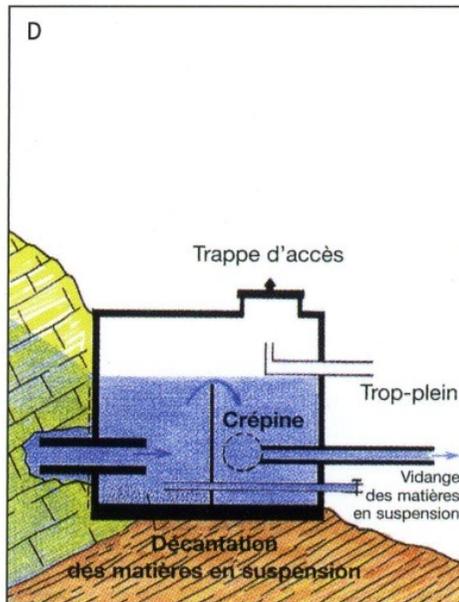
**A la fin de ce cours, vous devez être capable de...**

- Lister et décrire les différentes parties d'un forage
- Tracer la courbe caractéristique d'un ouvrage
- Tracer le rabattement spécifique d'un ouvrage
- Calculer les pertes de charges d'un ouvrage à partir d'un essai par palier et en tirer les conclusions sur la qualité de l'exploitation
- Faire un schéma de l'influence d'un pompage sur la nappe
- Calculer les paramètres hydrodynamiques d'un aquifère (T,S) à partir d'un essai par pompage

## □ Forage et captage d'eau

### ■ Captage

D : captage de source au pied d'un talus rocheux.



(BRGM, 2009)



## □ Forage et captage d'eau

### ▪ Réalisation du forage

Déclaration obligatoire à la DREAL des ouvrages souterrains au titre du Code Minier (ouvrage > 10m de profondeur)

Enregistrement dans la BSS

### Déclaration avant travaux: document d'incidence ouvrage

- Localisation du projet de forage
- Caractéristiques du projet de forage:
  - Profondeur
  - Géologie et hydrogéologie: coupe prévisionnelle ; type d'aquifère; niveau piézométrique; sens d'écoulement
  - Technique de foration; Tubage; cimentation; devenir des déblais, boues et eaux extraites
- Premières informations sur le projet de prélèvement: débits prévus (m<sup>3</sup>/j; m<sup>3</sup>/an); utilisation de l'eau; incidence prévisible sur le milieu

### Rapport de fin de travaux:

- coupe géologique;
- profondeurs, débits et qualité des arrivées d'eau successives;
- test de l'ouvrage (pompage par paliers);
- test de la nappe (pompage longue durée).

### Dossier de récolement

### Le Code BSS qu'est-ce-que c'est?

Code national de la Banque du Sous-Sol (BSS) attribué par le Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM) aux ouvrages souterrains notamment aux forages, sondages, captages d'eau...

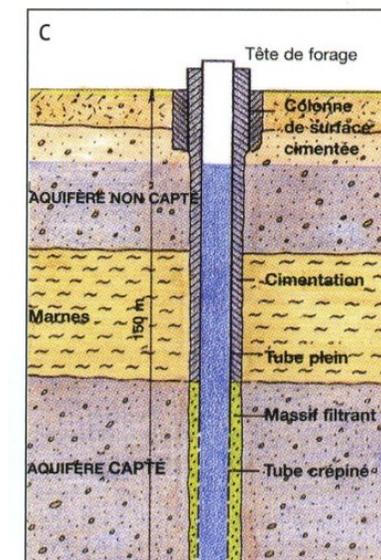
### Exemple



Les caractéristiques techniques associées au code BSS permettent :

- DE LOCALISER PRÉCISÉMENT CHAQUE CAPTAGE
- D'IDENTIFIER LA NAPPE CAPTÉE.

C : forage de type courant



(BRGM, 2009)

□ **Forage et captage d'eau**

- Réalisation du forage

[Les principales étapes d'un forage:](#)

[//www.youtube.com/watch?v=isELCZzu614](https://www.youtube.com/watch?v=isELCZzu614)

☞ Notez les différentes étapes de la foration

□ Forage et captage d'eau

▪ Réalisation du forage

- Méthodes de foration

Tricônes : rotary

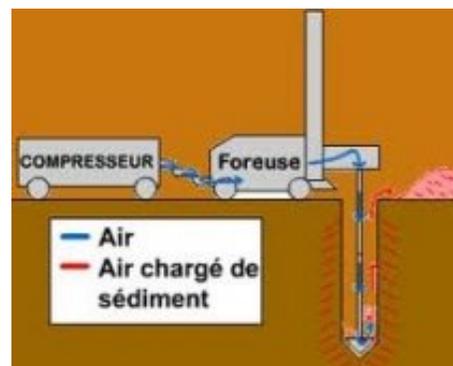


Réalisation du forage du Triadou



Air lift

Taillants : roto percussion



Cutting

□ Forage et captage d'eau

- Réalisation du forage

- Récupération d'informations à l'avancement

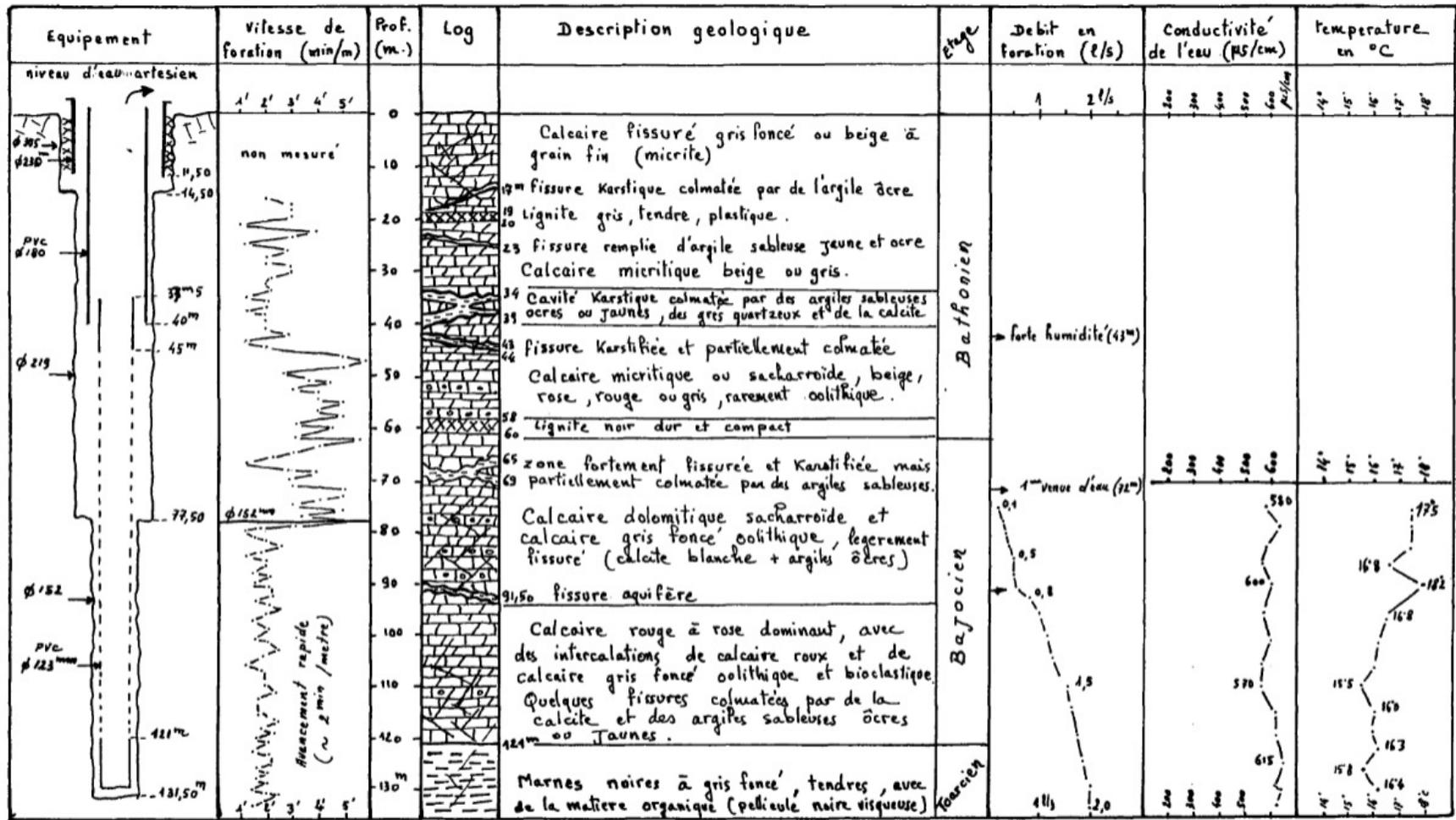


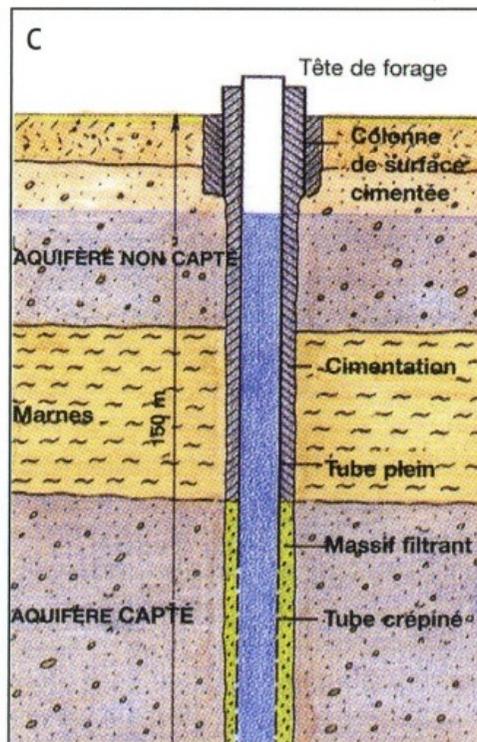
Fig. 4 : LOG COMPOSITE DU FORAGE F.6 DE FOISSAC (12) (au lieu dit "fil de laine")

### □ Forage et captage d'eau

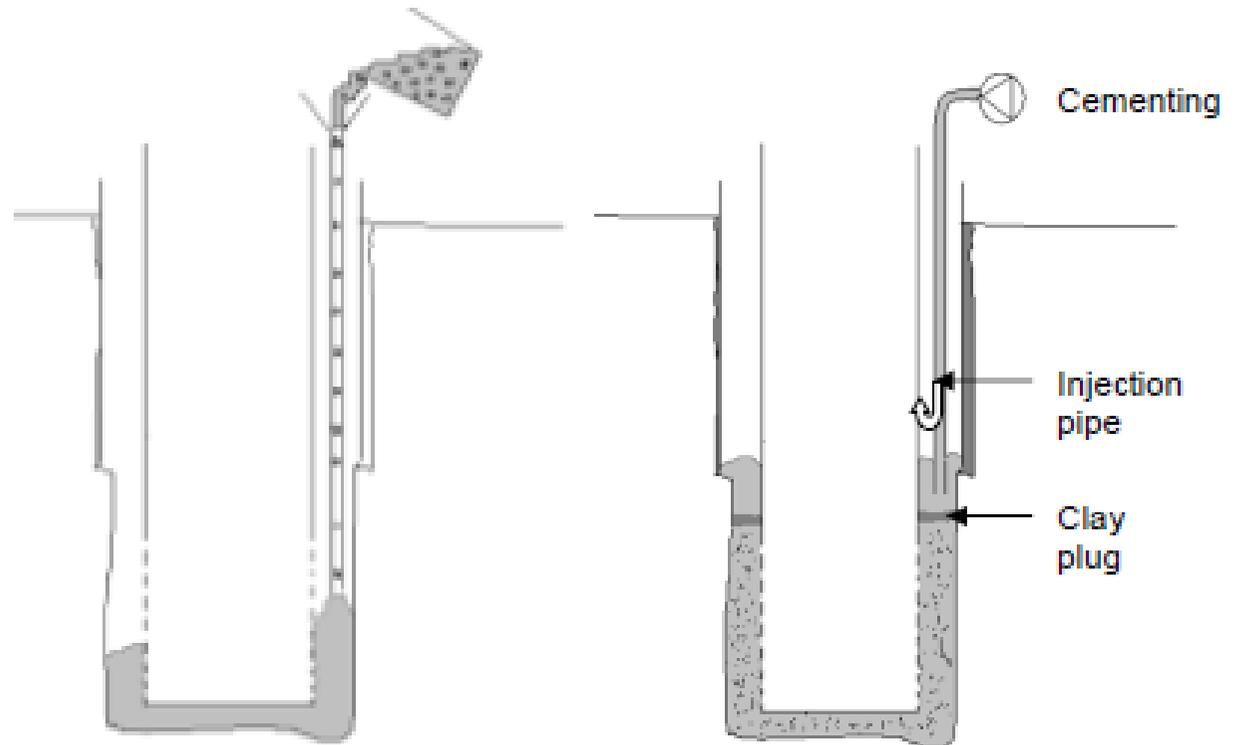
#### ▪ Réalisation du forage

- Méthodes de foration
- Récupération d'informations à l'avancement
- Tubage et cimentation

C : forage de type courant



(BRGM, 2009)

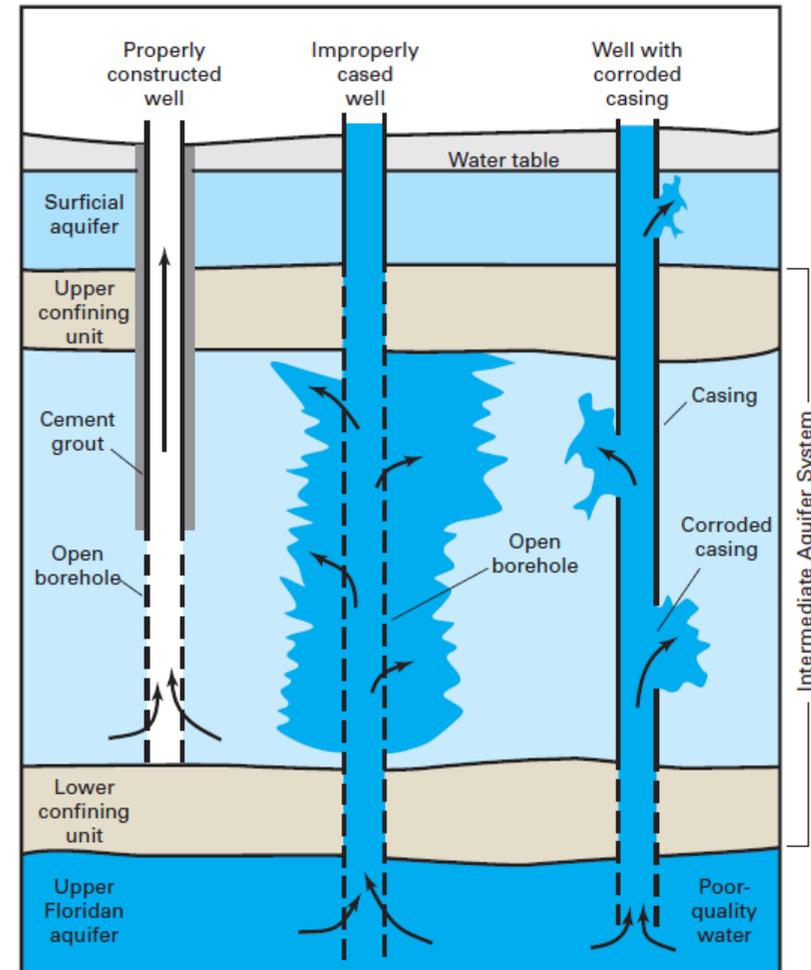


### □ Forage et captage d'eau

#### ▪ Réalisation du forage

- Méthodes de foration
- Récupération d'informations à l'avancement
- Tubage et cimentation

Exemple de risque de contamination naturelle d'un forage mal tubé

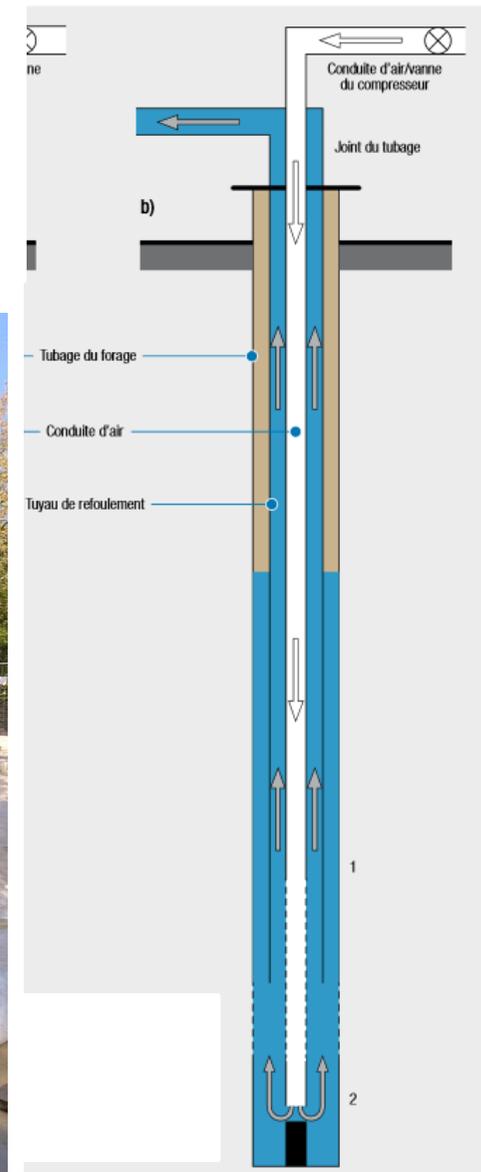


Modified from Metz and Brendle (1996)

### □ Forage et captage d'eau

#### ■ Réalisation du forage

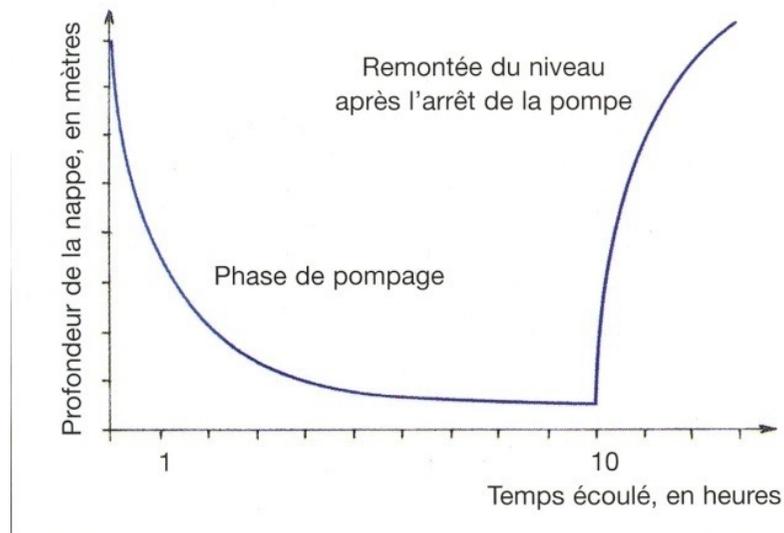
- Méthodes de foration
- Récupération d'informations à l'avancement
- Tubage et cimentation
- Développement
- Margelle et nivellement
- Déclaration du forage dans la BSS (logiciel GESFOR)



## □ Influence d'un pompage sur les écoulements des eaux souterraines

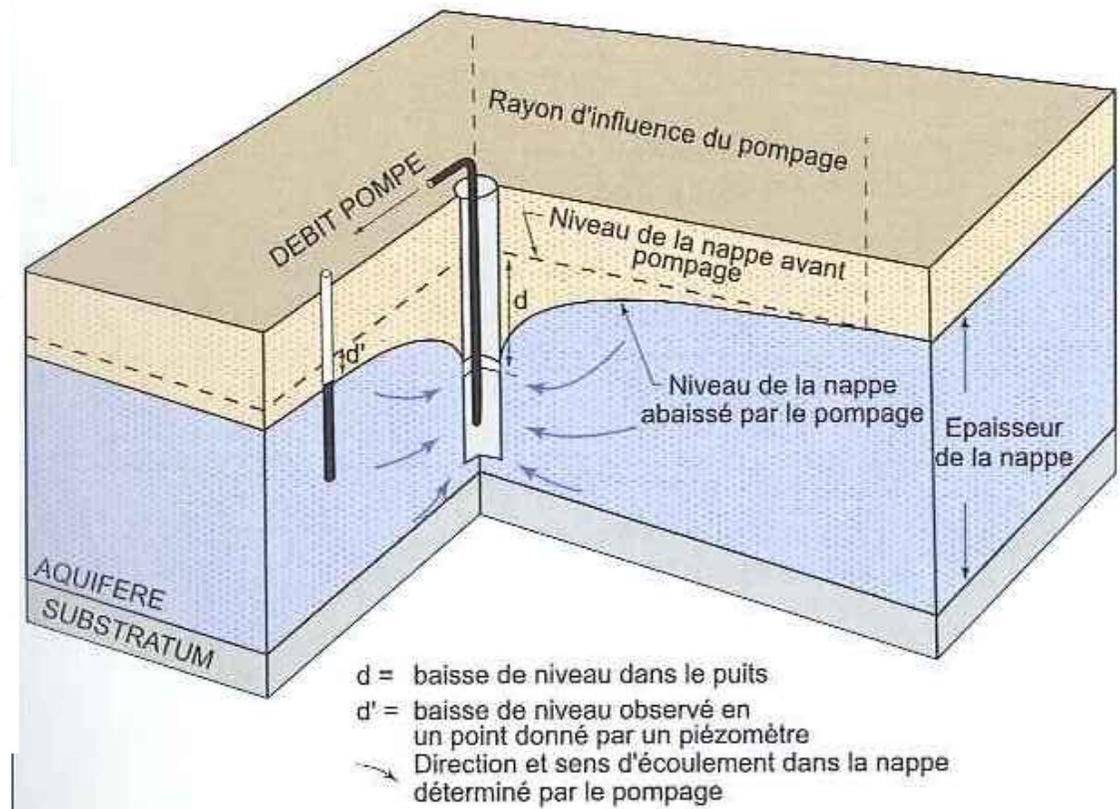
### ► Définitions

- Rabattement
- Cône de dépression
- Rayon d'influence



Abaissement du niveau d'une nappe soumise à un pompage à débit constant et remontée après son arrêt

(Collin, 2006)



$d$  = baisse de niveau dans le puits  
 $d'$  = baisse de niveau observé en un point donné par un piézomètre  
 → Direction et sens d'écoulement dans la nappe déterminé par le pompage

(BRGM, 2009)

□ **Les essais de pompage**

▶ Objectifs

- Vérification de la validité de l'ouvrage : essai de puits

⇒ **Essai par paliers**

- Détermination des paramètres hydrodynamiques de la nappe (T,S) : essai de nappe

⇒ **Essai par pompage de longue durée**

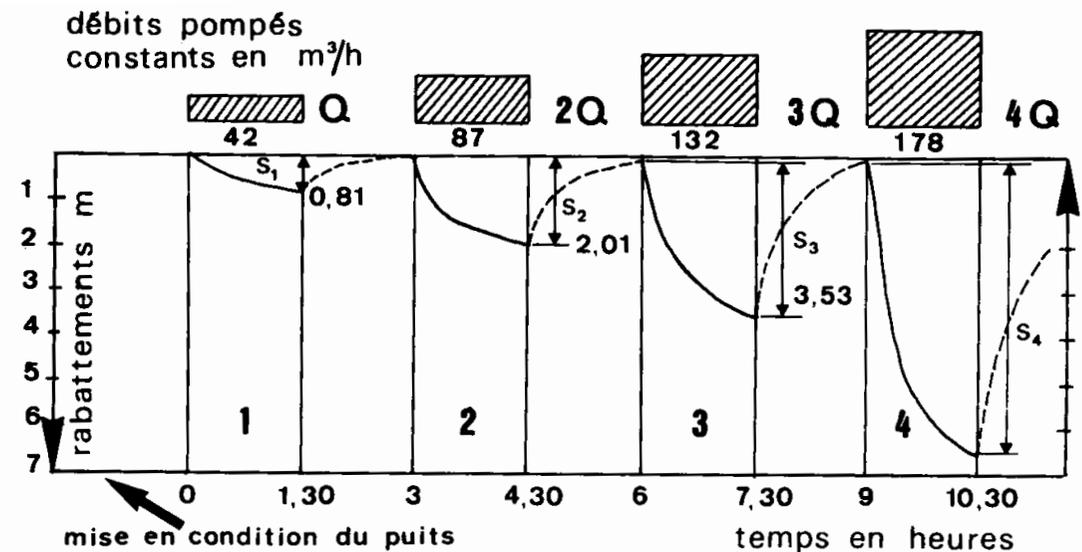
❑ **Test de l'ouvrage : les essais de puits par paliers**

- ▶ Objectifs : établir les caractéristiques du complexe aquifère-ouvrage
  - Débit critique et débit max d'exploitation
  - Pertes de charge (ouvrage, environnement immédiat)
  - Vérifier l'état d'un ouvrage (colmatage)

▶ Conditions d'applications

▶ Mise en œuvre

Palier 1	$Q_1 = \frac{Q_{max}}{4}$	t1 = 1h30
Palier 2	$Q_2 = \frac{Q_{max}}{2}$	t2 = 1h30
Palier 3	$Q_3 = \frac{3Q_{max}}{4}$	t3 = 1h30
Palier 4	$Q_4 = Q_{max}$	t4 = 1h30



Durée de pompage de chaque palier :		Durée de chaque arrêt entre les paliers :	
Débit (Q) (m <sup>3</sup> /h)	N1 : Niveau avant pompage	N2 : Niveau après pompage	Rabattement (s) (m)
			$s = N2 - N1$

- Test de l'ouvrage : les essais de puits par paliers
- ▶ Interprétations
  - Courbe caractéristique de l'ouvrage

$$s(t) = f(Q)$$

$$s(t) = BQ + CQ^2$$

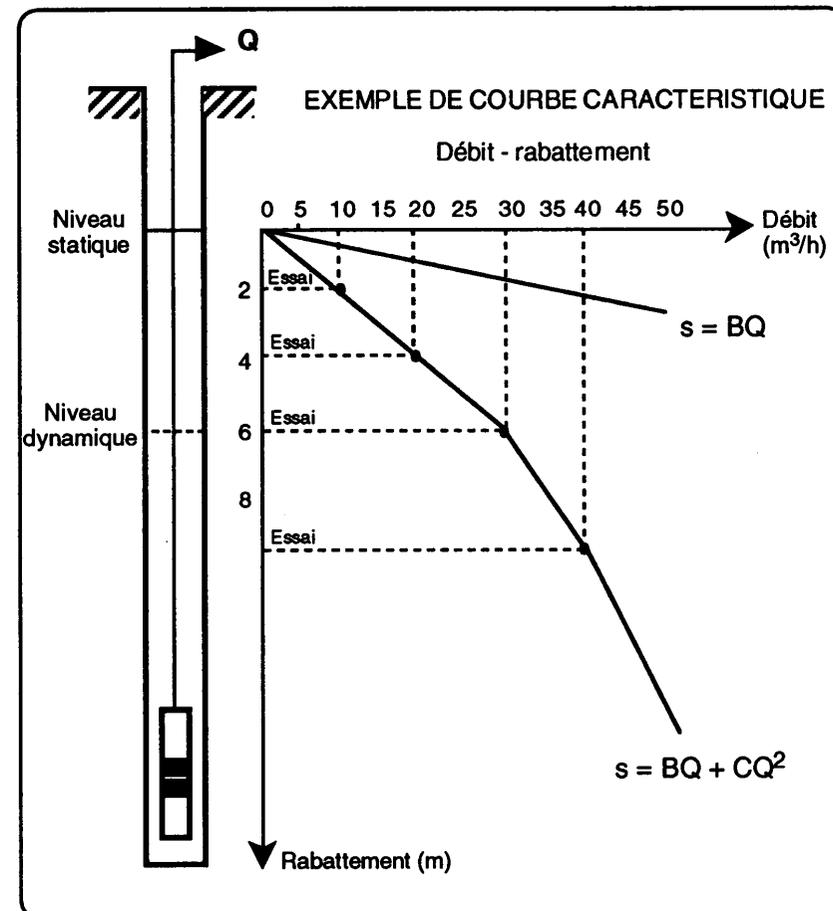


Figure 4-4  
Exemple de courbes caractéristiques.

- **Test de l'ouvrage : les essais de puits par paliers**
- ▶ **Interprétations**
  - **Courbe caractéristique de l'ouvrage**



Figure 11 : Courbe caractéristique des essais par paliers sur C1 en mai 2022, en bleu et à son origine en 2001 en jaune



- Test de l'ouvrage : les essais de puits par paliers
- ▶ Interprétations
  - Courbe caractéristique de l'ouvrage

TABLEAU I — Résultats des essais globaux. Calcul des débits spécifiques.

Essais globaux	Rabattements (m)	Débits (m <sup>3</sup> /h)	Débits spécifiques (m <sup>3</sup> /h m)
1 <sup>er</sup> palier.....	0,37	30	81
2 <sup>e</sup> palier.....	1,25	85	68
3 <sup>e</sup> palier.....	1,75	110	62
4 <sup>e</sup> palier.....	2,62	140	53

$$s(t) = BQ + CQ^2$$

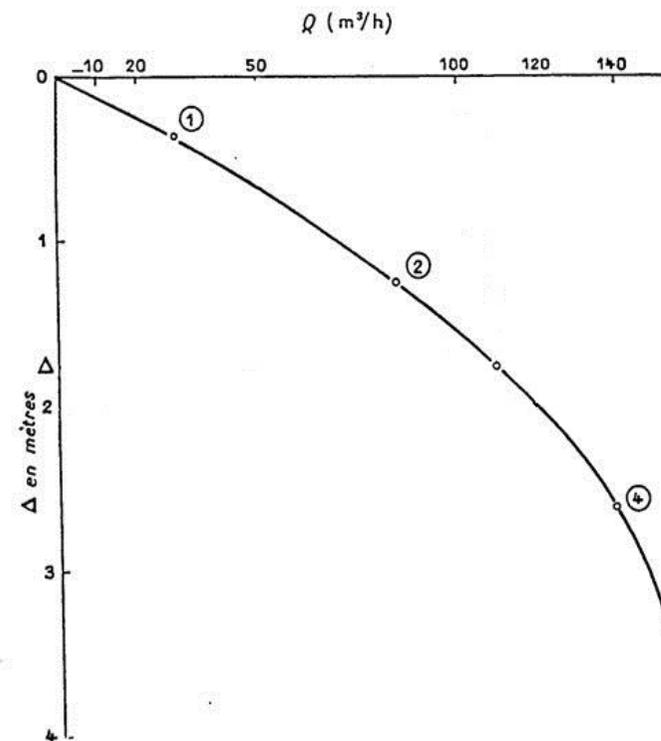
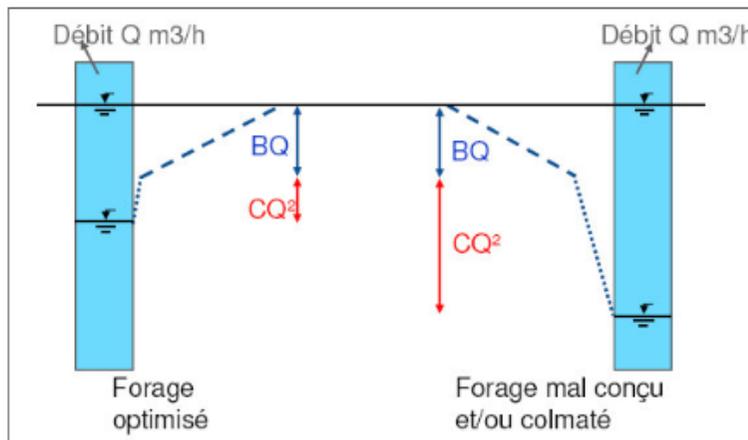


FIG. I.2. — Courbe caractéristique en nappe libre. (1) palier de pompage.

□ Test de l'ouvrage : les essais de puits par paliers

► Interprétations

- Courbe caractéristique de l'ouvrage

$$s(t) = BQ + CQ^2$$

- Débit critique  $Q_c$

Courbe convexe:  $Q_c$  dépassé.

Détermination graphique: intersection des tangentes de part et d'autre du point d'inflexion

- Débit d'exploitation

$$Q_{exp} = Q_c - 20\% Q_c$$

TABLEAU I. — Résultats des essais globaux. Calcul des débits spécifiques.

Essais globaux	Rabattements (m)	Débits (m <sup>3</sup> /h)	Débits spécifiques (m <sup>3</sup> /h m)
1 <sup>er</sup> palier.....	0,37	30	81
2 <sup>e</sup> palier.....	1,25	85	68
3 <sup>e</sup> palier.....	1,75	110	62
4 <sup>e</sup> palier.....	2,62	140	53

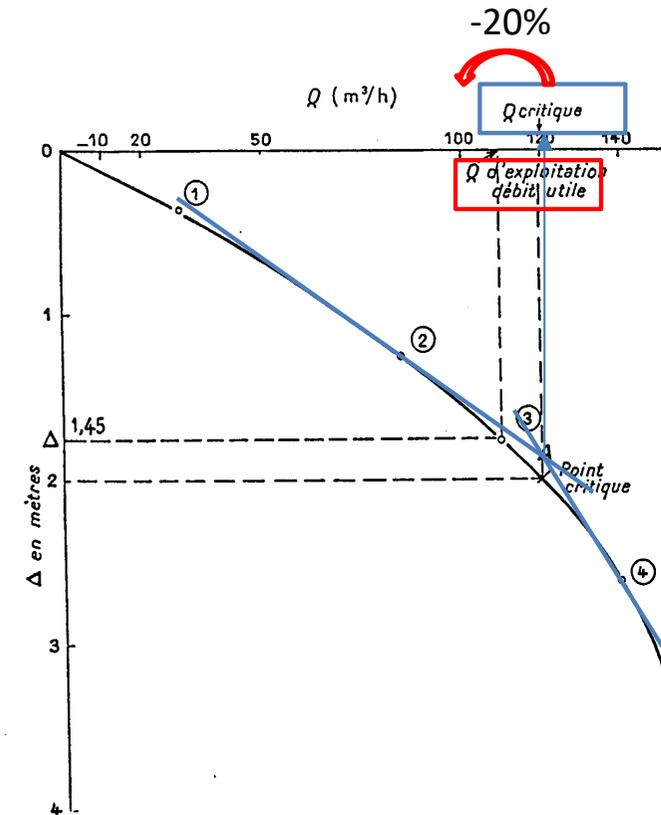


FIG. I.2. — Courbe caractéristique en nappe libre. (1) palier de pompage.

□ **Test de l'ouvrage : les essais de puits par paliers**

► **Interprétations**

- Pertes de charges dans l'ouvrage  
rabattement spécifique  $m/(m^3/h)$

$$\frac{s}{Q} = f(Q)$$



$$s/Q = B + CQ$$

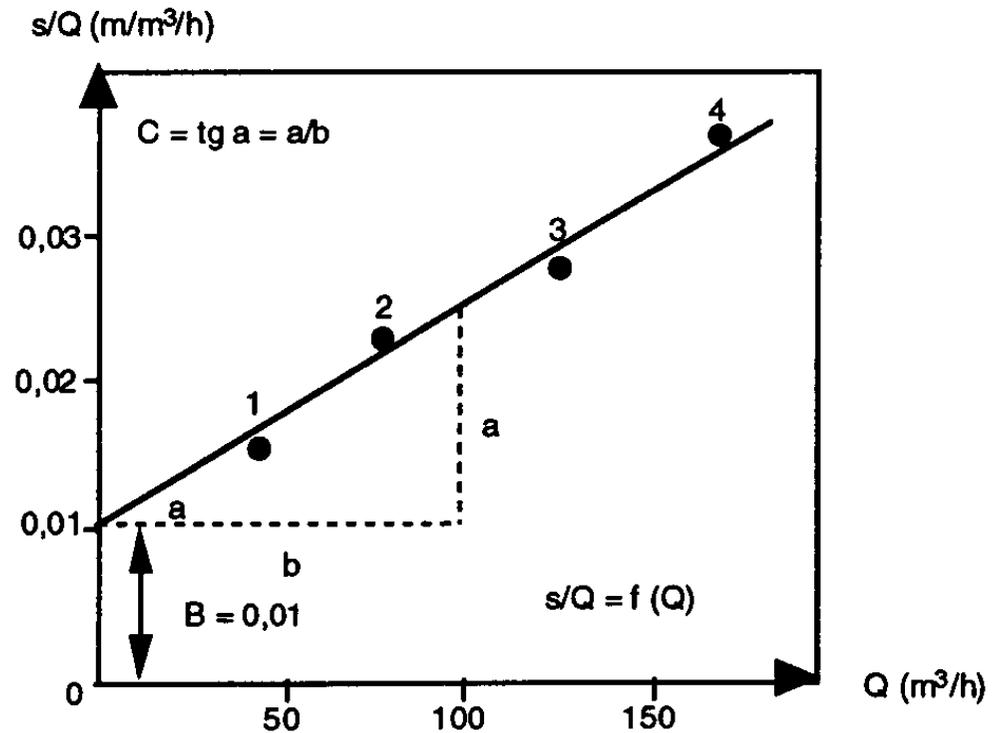


Figure 4-8

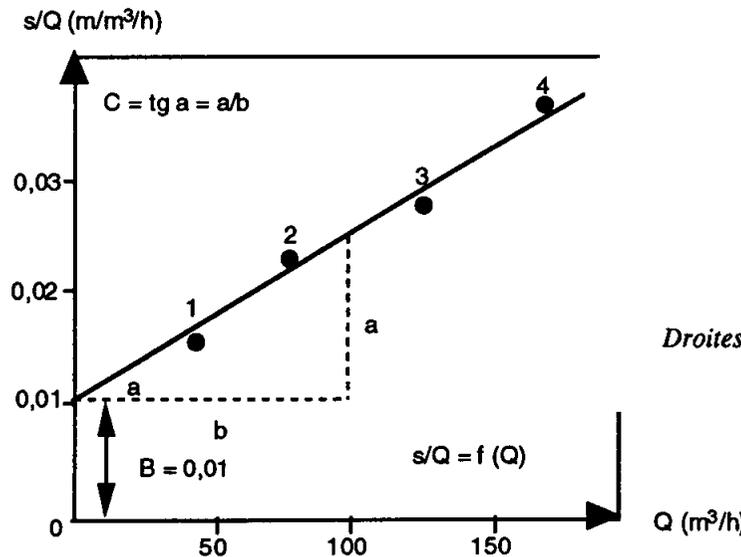
*Droite débit/rabattement spécifique : calcul des pertes de charges, (d'après J. FORKASIEWICZ, 1978).*

$C < 675 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$	Bon puits, développement correct
$675 < C < 1350 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$	Puits médiocre
$C > 1350 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$	Puits colmaté ou détérioré
$C > 5400 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$	Puits irrécupérable

□ **Test de l'ouvrage : les essais de puits par paliers**

► **Interprétations**

- Pertes de charges dans l'ouvrage  
rabattement spécifique  $m/(m^3/h)$



$$s/Q = B + CQ$$

Figure 4-8

Droite débit/rabattement spécifique : calcul des pertes de charges, (d'après J. FORKASIEWICZ, 1978).

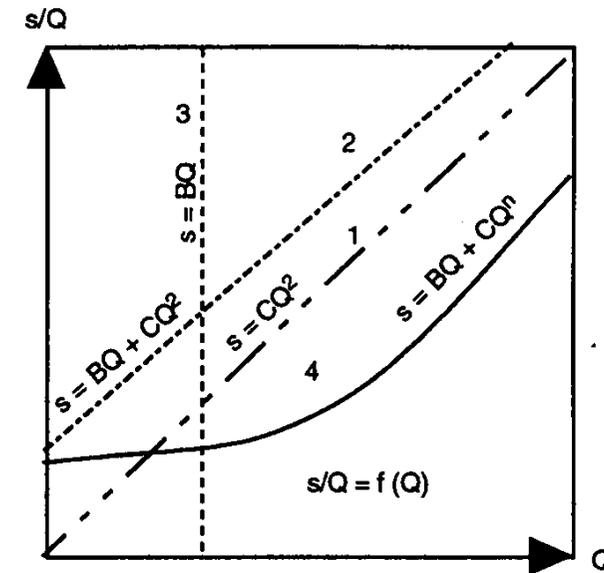


Figure 4-7

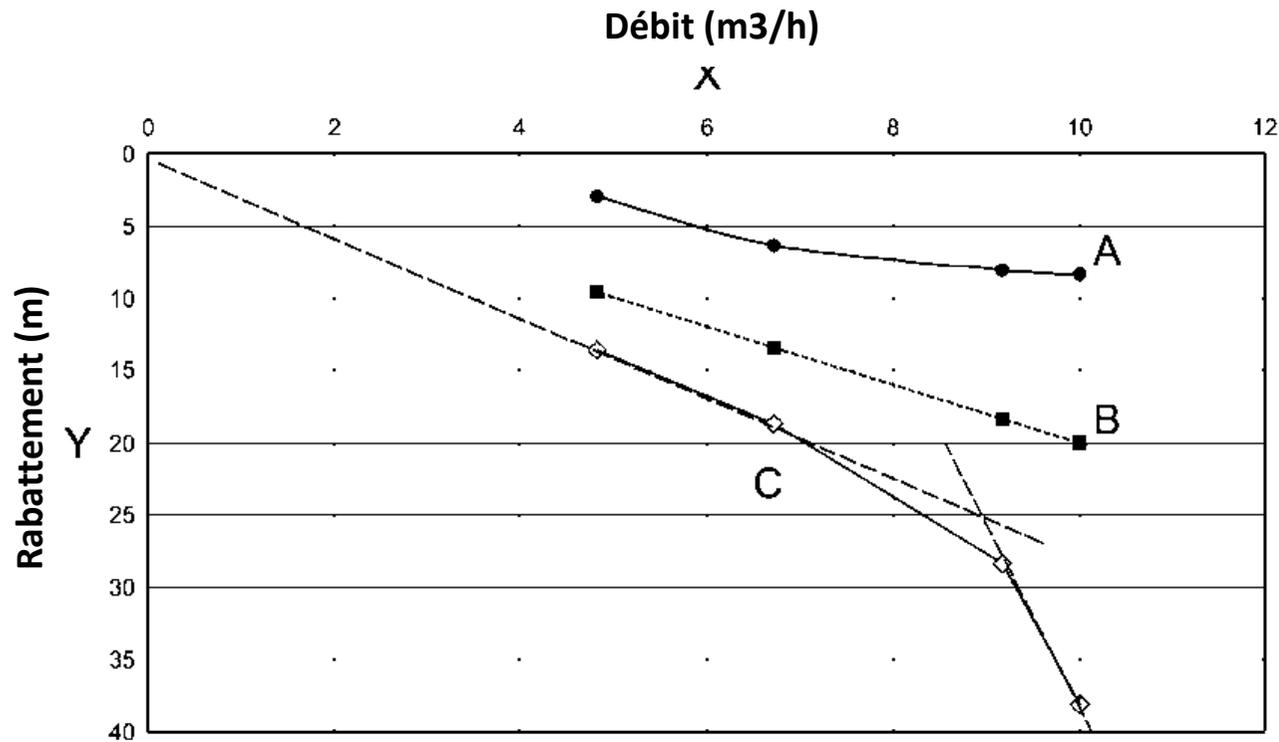
Droites débits/rabattements spécifiques (d'après J. FORKASIEWICZ, 1978).

$C < 675 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$	Bon puits, développement correct
$675 < C < 1350 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$	Puits médiocre
$C > 1350 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$	Puits colmaté ou détérioré
$C > 5400 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$	Puits irrécupérable

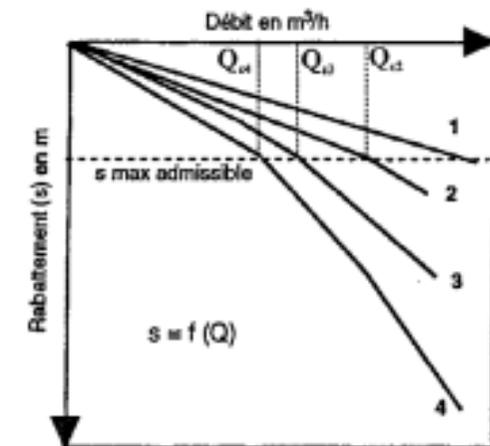
## □ Test de l'ouvrage : les essais de puits par paliers

### ► Interprétations

Exemple de courbes caractéristiques d'essai par paliers



- puits idéal 1 (droite)
- puits réel après acidification 2 (amélioration)
- puits réel état initial 3
- puits réel après vieillissement 4 (colmatage)



☞ Que vaut  $Q_{\text{expl}}$  dans ces 3 cas (A, B, C)?

A:  $Q_{\text{expl}}$  non calculable. Ouvrage en cours de développement

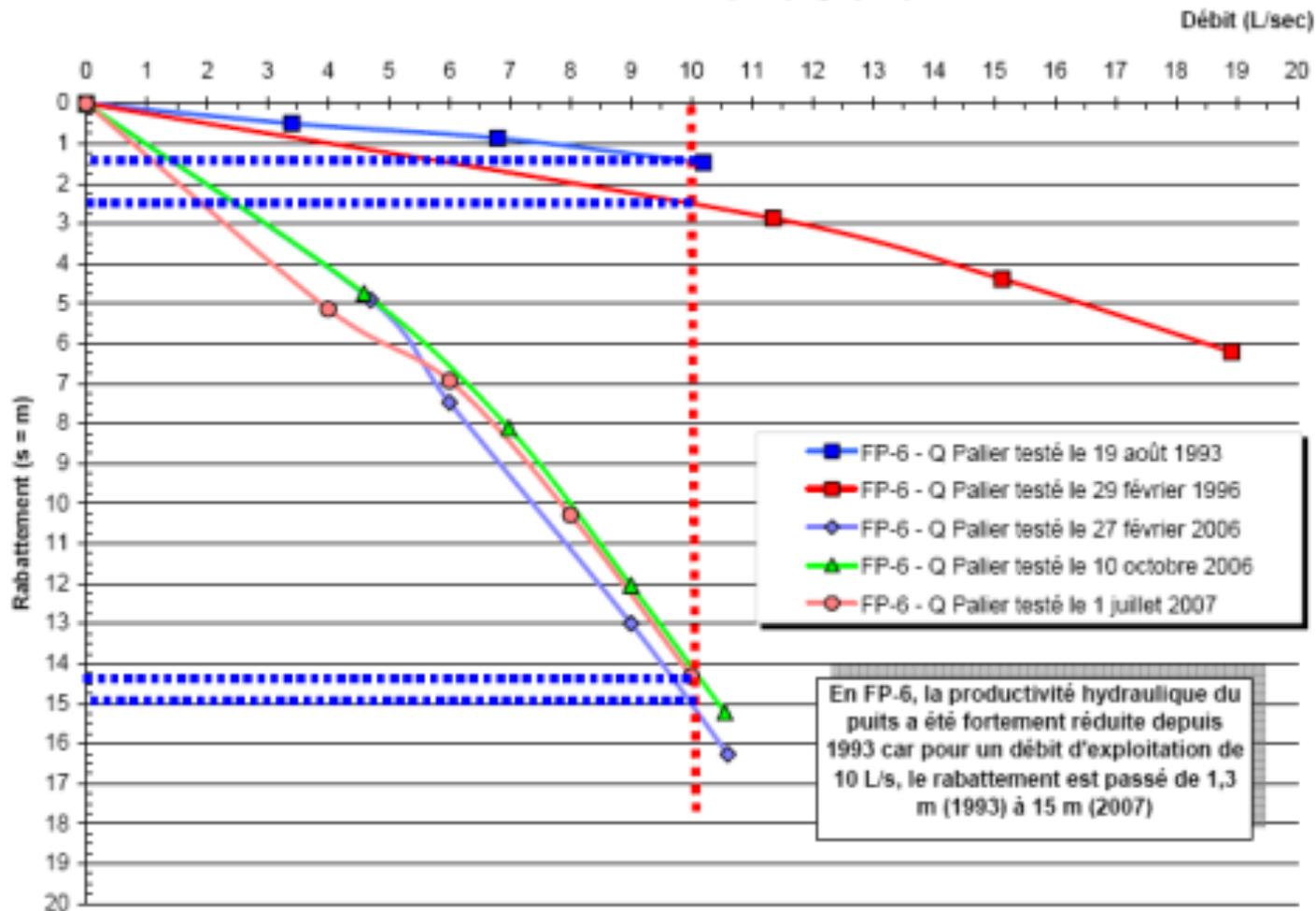
B:  $Q_{\text{expl}} > 10 \text{ m}^3/\text{h}$ .  $Q$  critique non dépassé

C:  $Q$  critique =  $9 \text{ m}^3/\text{h}$  →  $Q_{\text{expl}} = 7 \text{ m}^3/\text{h}$ . Courbe convexe:  $Q$  critique dépassé

### □ Test de l'ouvrage : les essais de puits par paliers

#### ► Interprétations

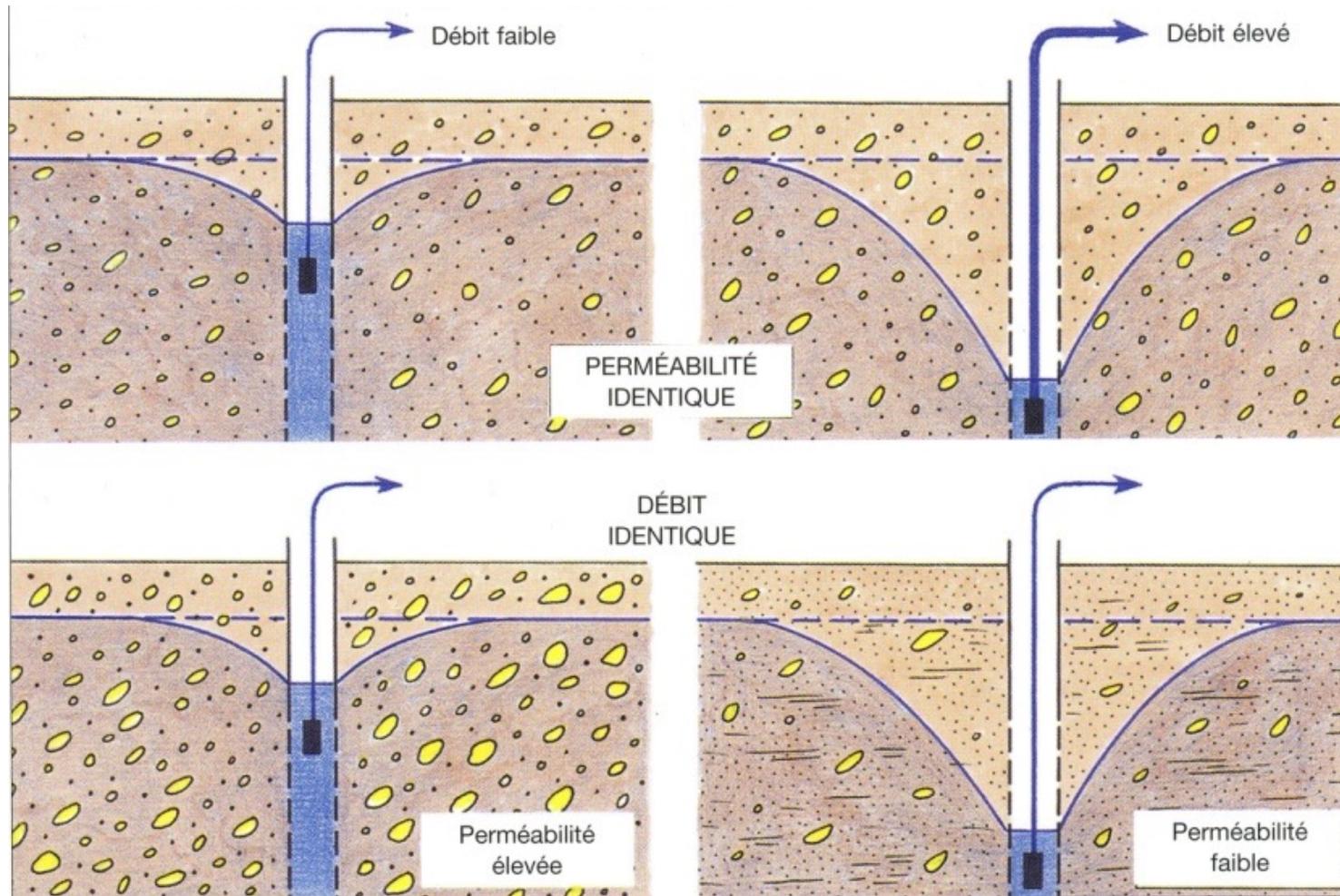
Exemple de courbes caractéristiques d'essai par paliers



## 2. Caractérisation de l'aquifère par essai de nappe

### □ Influence d'un pompage sur les écoulements des eaux souterraines

Effet du débit pompé et de la nature du terrain sur le niveau piézométrique de la nappe



(Collin, 2006)

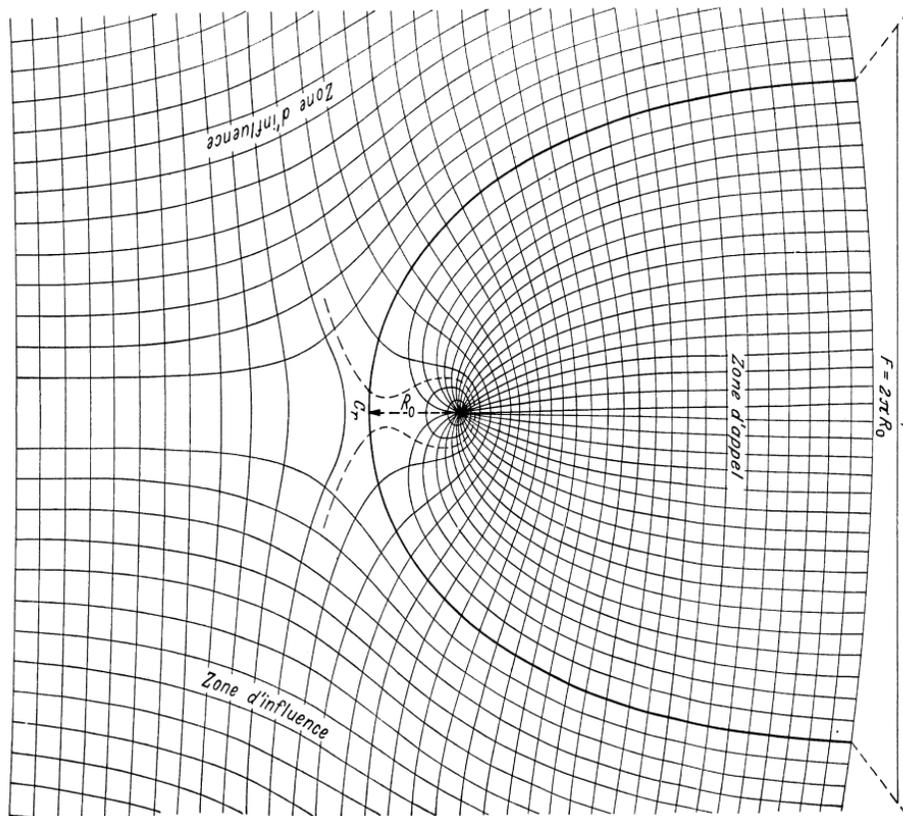
L'effet d'un pompage est fonction des caractéristiques géologiques de la nappe  
⇒ Lien avec les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère

□ Influence d'un pompage sur les écoulements des eaux souterraines

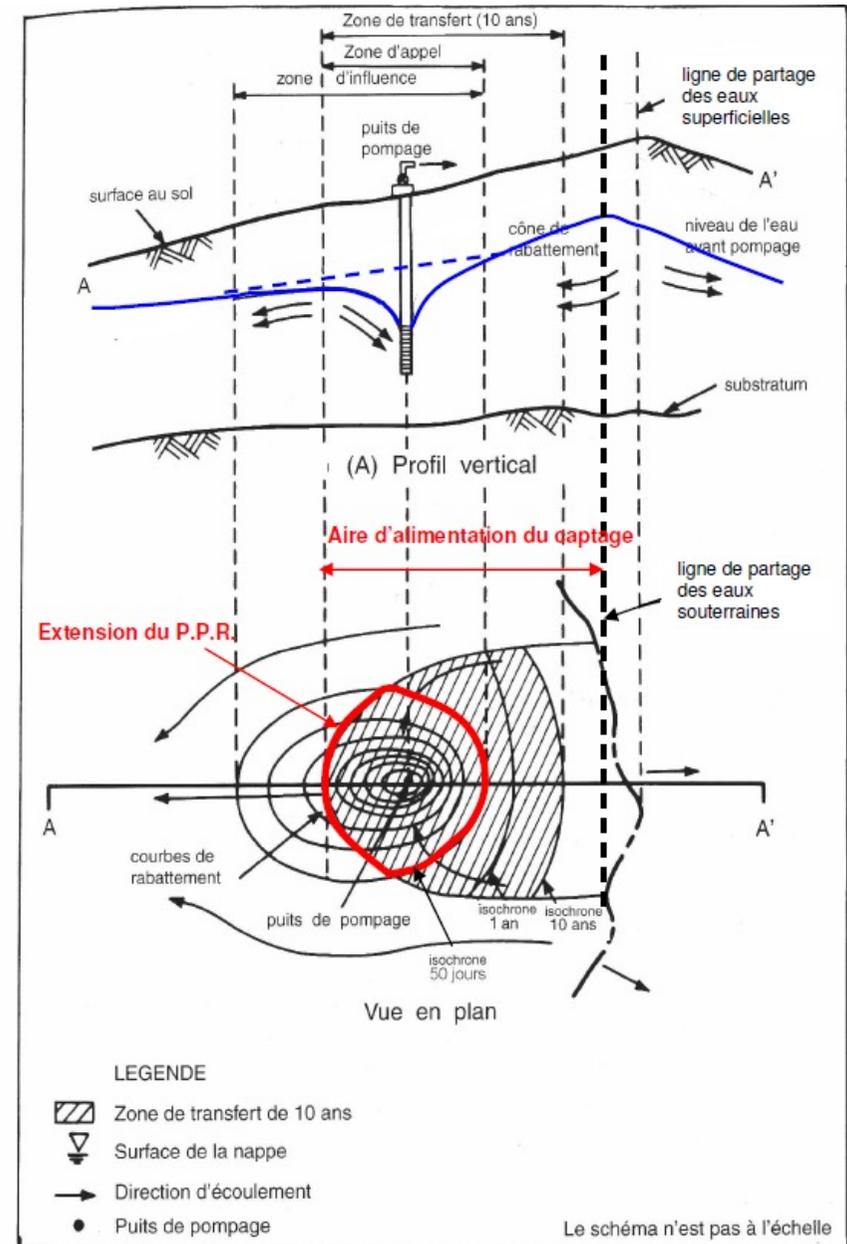
► Définitions

- Zone d'appel/zone d'influence
- Régime permanent/transitoire

Figure 1. Surface piézométrique d'une nappe à écoulement, autour d'un puits ou d'un forage; lignes d'égal potentiel et lignes de courant



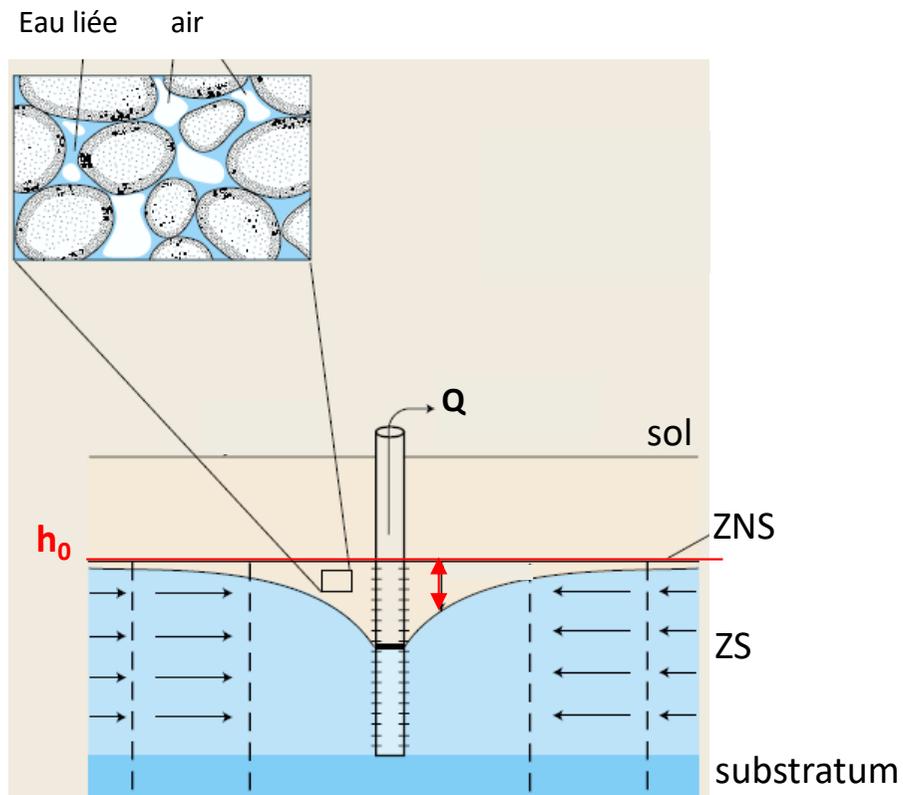
Zone d'appel, zone d'influence en nappe alluviale homogène (Manuel et méthodes, n° 33, BRGM, 1999)



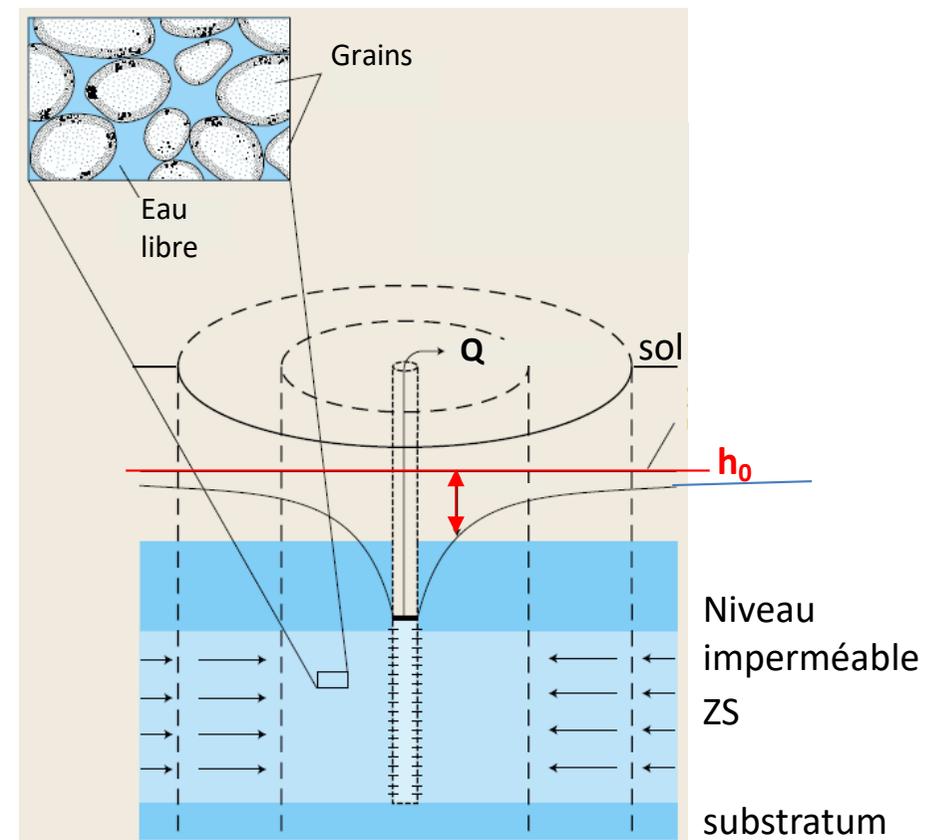
□ Influence d'un pompage sur les écoulements des eaux souterraines

► Influence du type de nappe

Nappe libre



Nappe captive

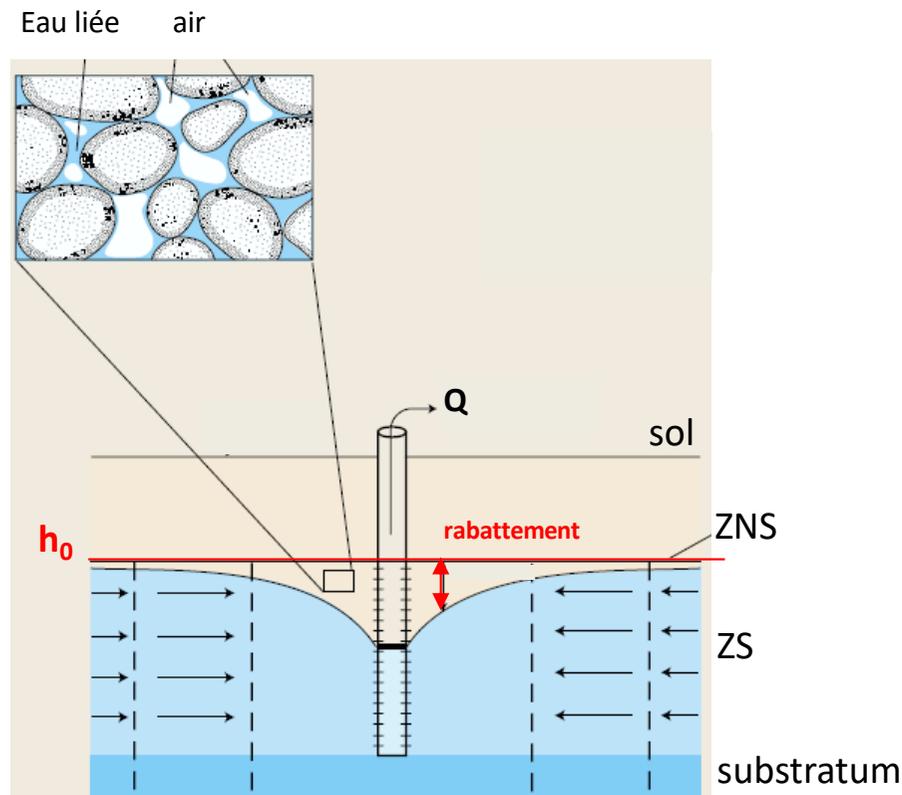


☞ Différences?

□ Influence d'un pompage sur les écoulements des eaux souterraines

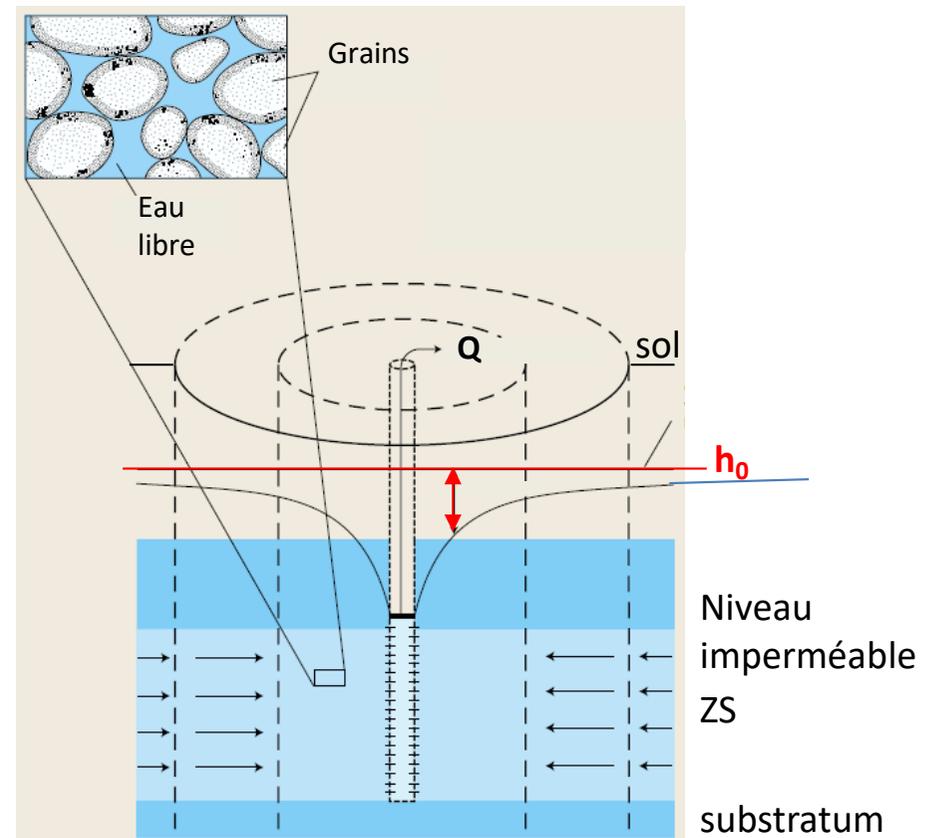
► Influence du type de nappe

Nappe libre



Désaturation dans le cône de dépression:  
l'épaisseur de la nappe diminue

Nappe captive



L'aquifère reste saturé:  
l'épaisseur de la nappe reste inchangée

□ **Les essais de nappe (pompage de longue durée)**

▶ Objectifs

- Détermination des paramètres hydrodynamiques: **T et S**
- Recherche d'information sur les limites de l'aquifère: présence d'une limite d'alimentation/étanche, phénomène de drainance
- Evaluation de la ressource en eau souterraine exploitable

Les essais de nappe (pompage de longue durée)

Méthodologie

- Descente/Remontée
- Régime permanent/transitoire

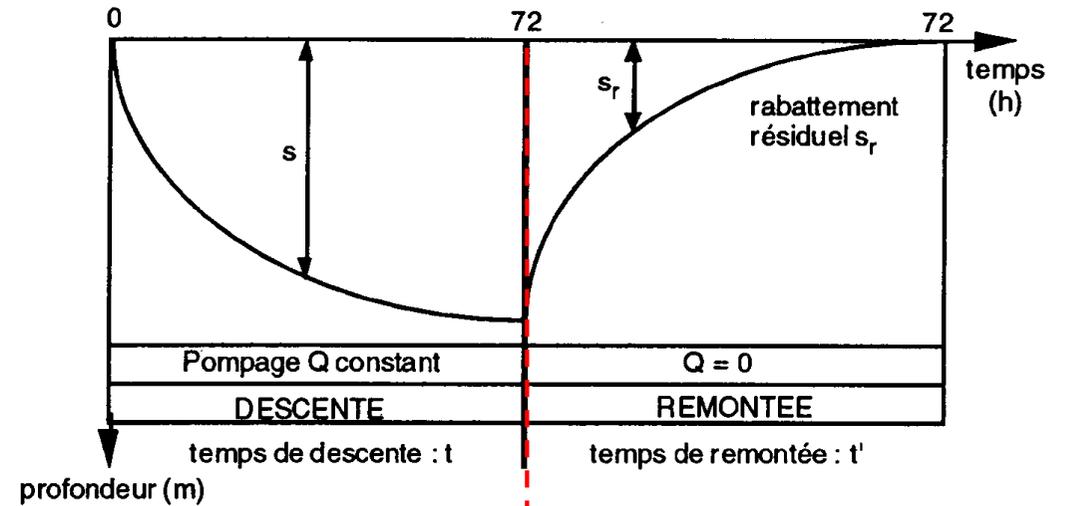
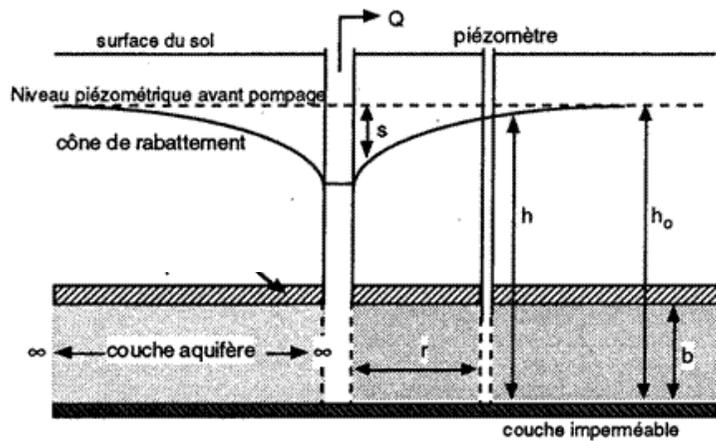
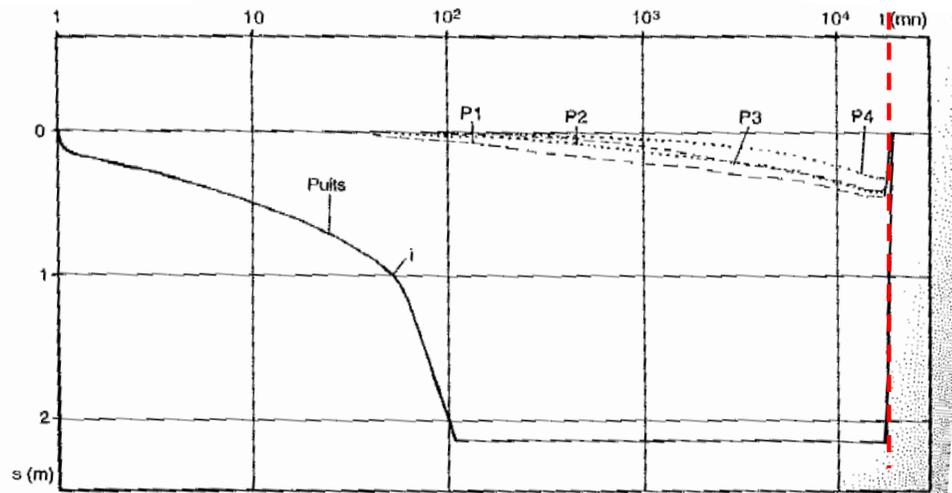
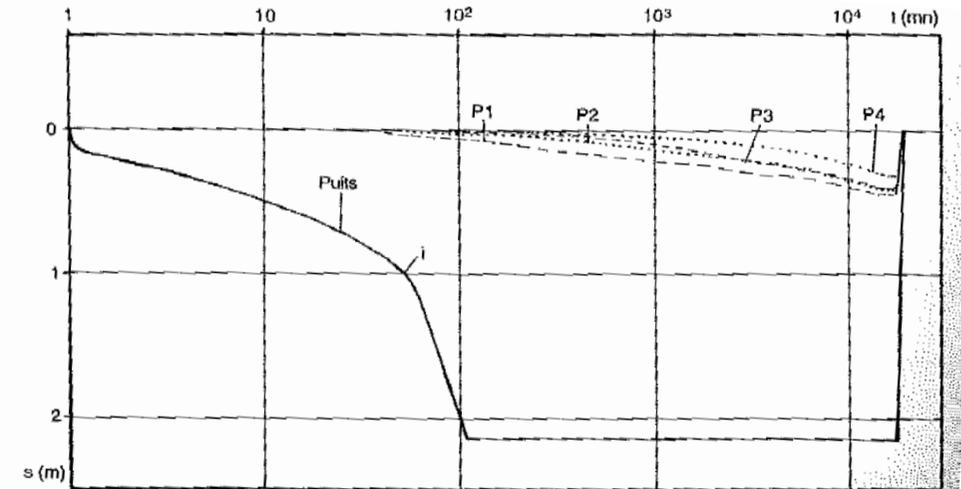
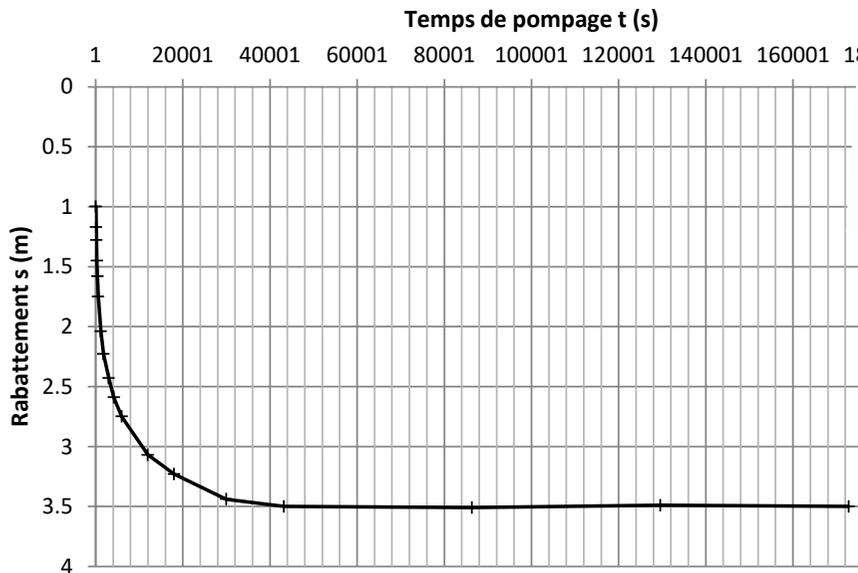


Figure 4-9  
Pompage d'essai longue durée.

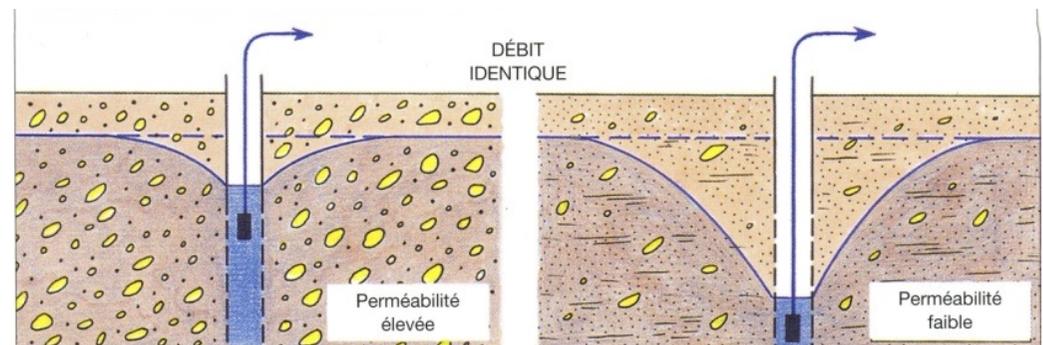


□ Les essais de nappe (pompage de longue durée)

▶ Méthodologie



⇒ On cherche à exprimer s en fonction des caractéristiques de l'aquifère T (K) et S



□ **Les essais de nappe (pompage de longue durée)**

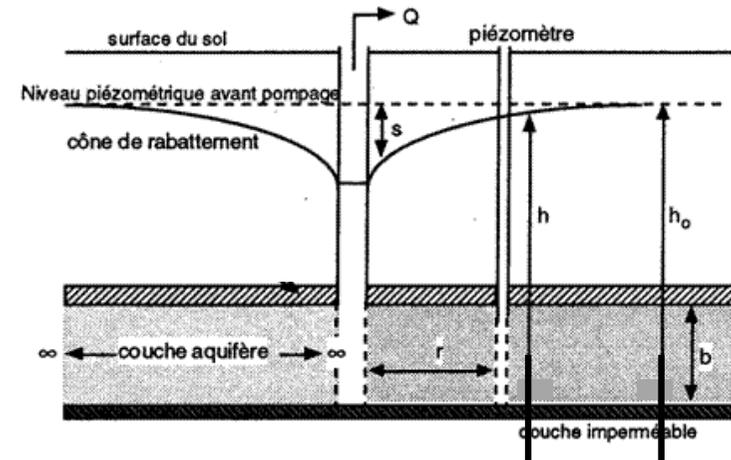
▶ **Pompage d'essai en régime transitoire**

- Solution de Laplace, donnée par l'équation de Theis (1935)

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} \omega(u)$$

avec: 
$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$\omega(u) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \approx -0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} \dots$$



- Q : débit de pompage [ $L^3T^{-1}$ ];  
 s : rabattement [L] ;  
 T : transmissivité [ $L^2T^{-1}$ ];  
 t : temps depuis le début de pompage [T] ;  
 r : distance centre du forage – mesure de la charge [L] ;  
 S : Coefficient d'emmagasinement [-].

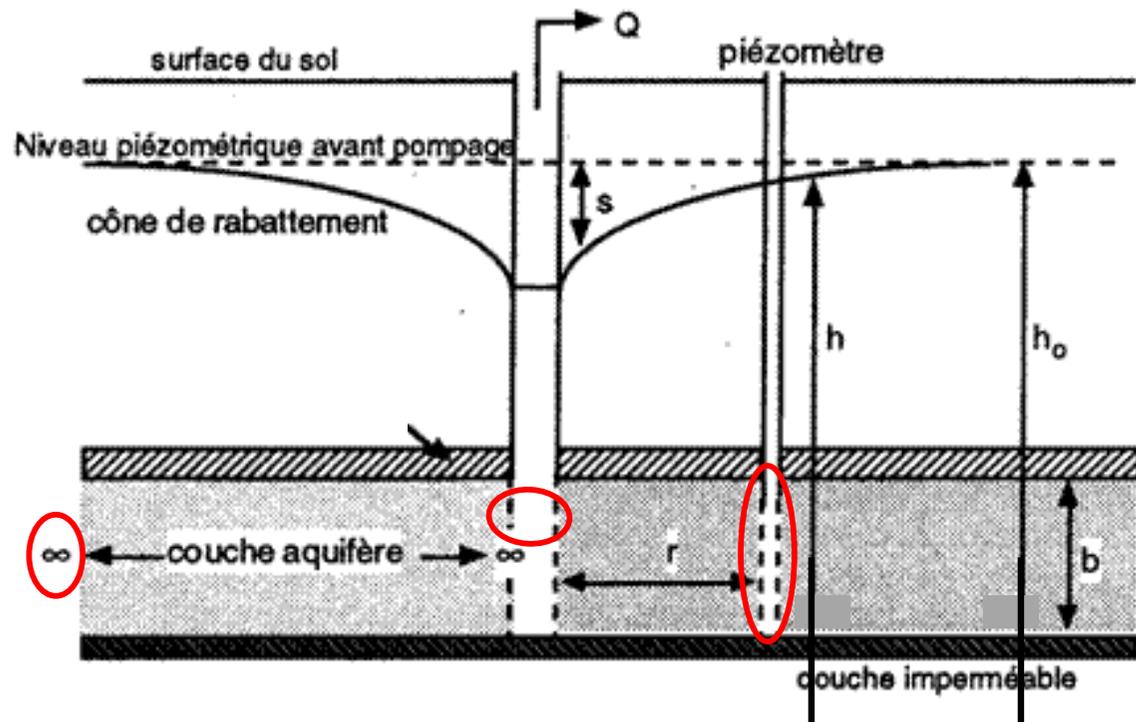
**Utilisation d'un abaque**



□ Les essais de nappe (pompage de longue durée)

► Pompage d'essai en régime **transitoire**

- Solution de Laplace, donnée par l'équation de Theis (1935)
- Conditions d'application



$Q$  : débit de pompage [ $L^3T^{-1}$ ];

$s$  : rabattement [ $L$ ];

$T$  : transmissivité [ $L^2T^{-1}$ ];

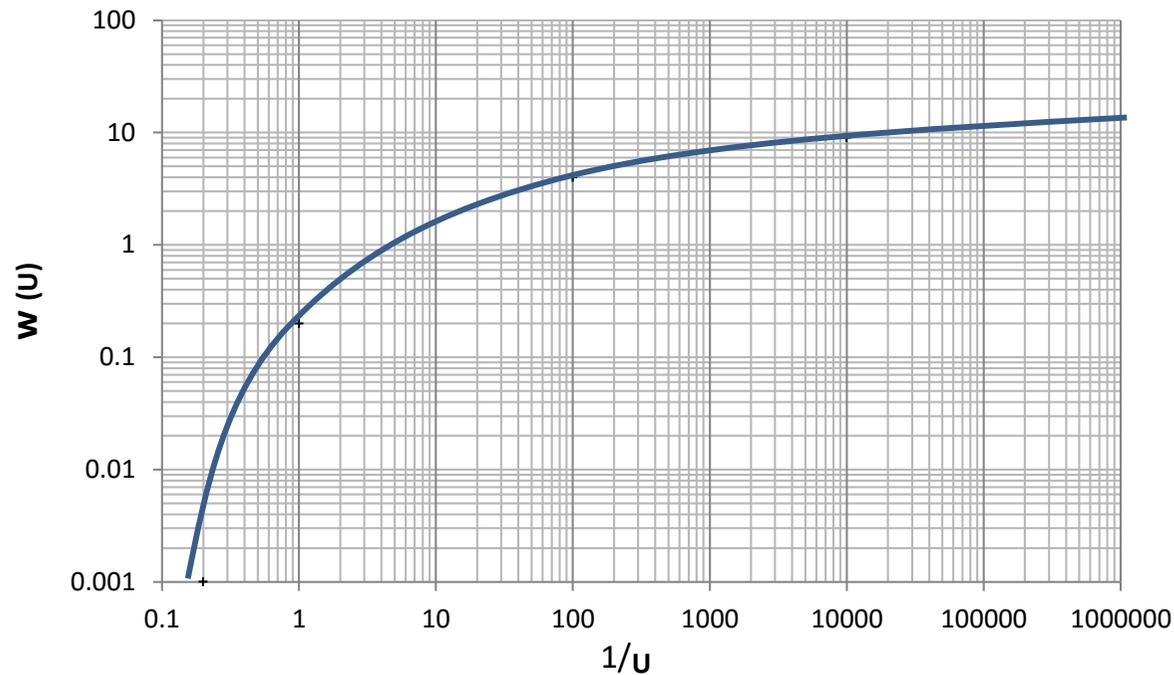
$t$  : temps depuis le début de pompage [ $T$ ];

$r$  : distance centre du forage – mesure de la charge [ $L$ ];

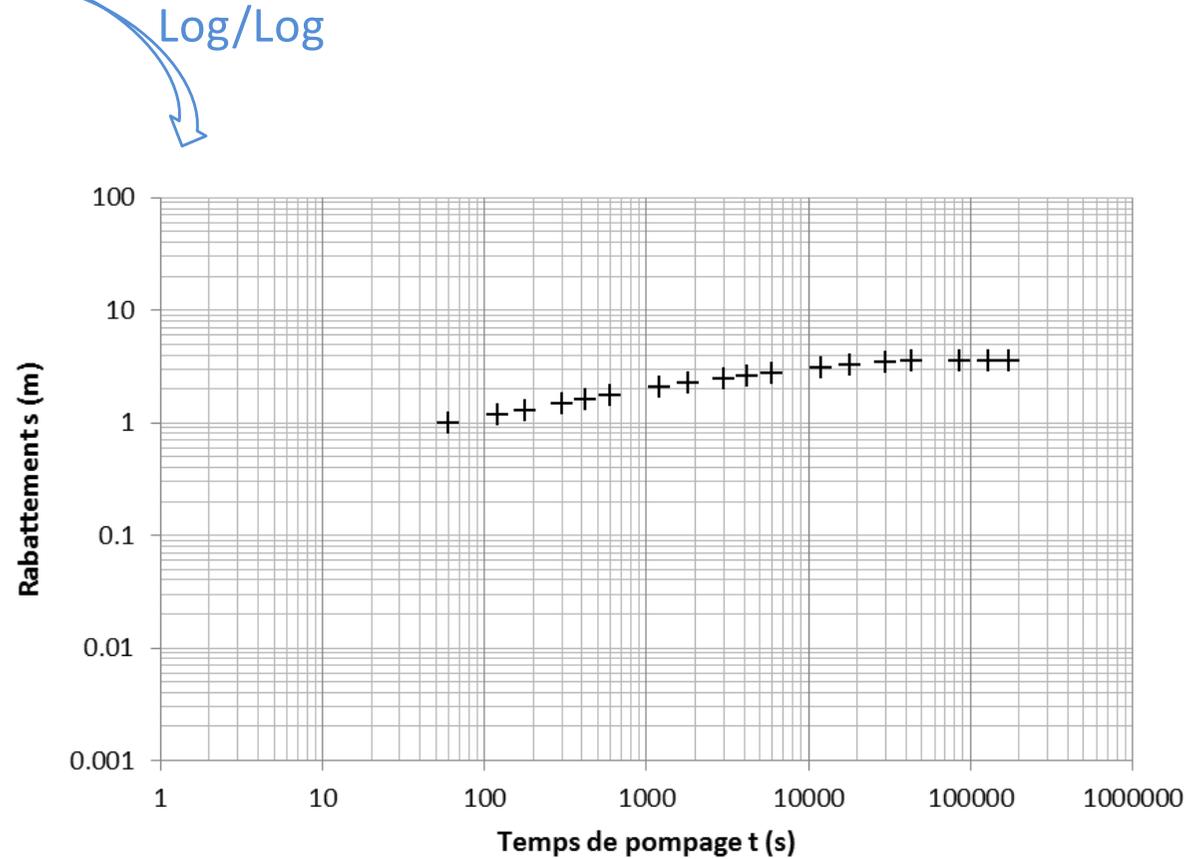
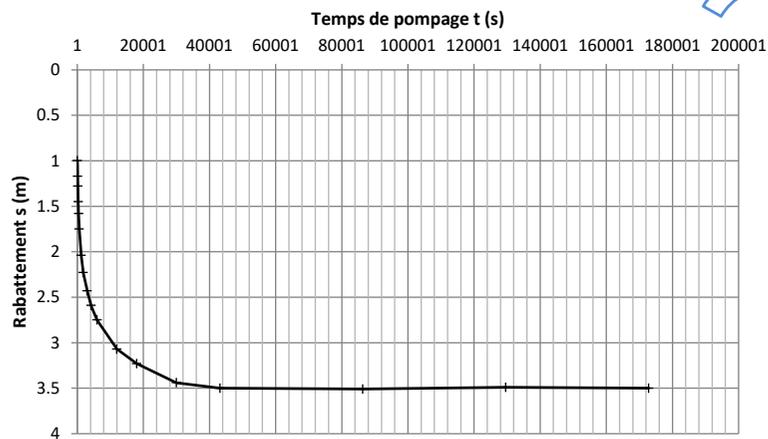
$S$  : Coefficient d'emmagasinement [-].

- Les essais de nappe (pompage de longue durée)
- ▶ Pompage d'essai en régime **transitoire**
  - Méthode d'interprétation graphique de Theis

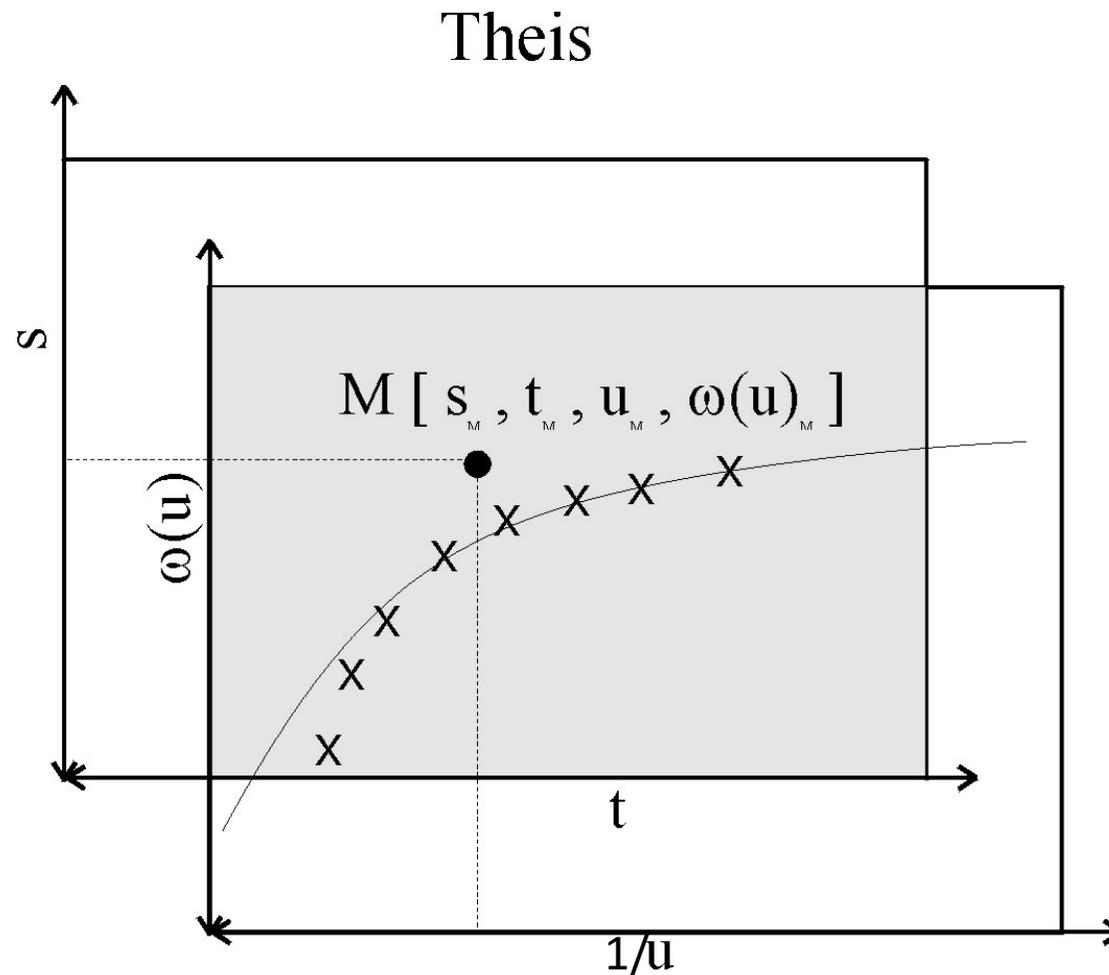
$$\omega(u) = -0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} \dots\dots$$



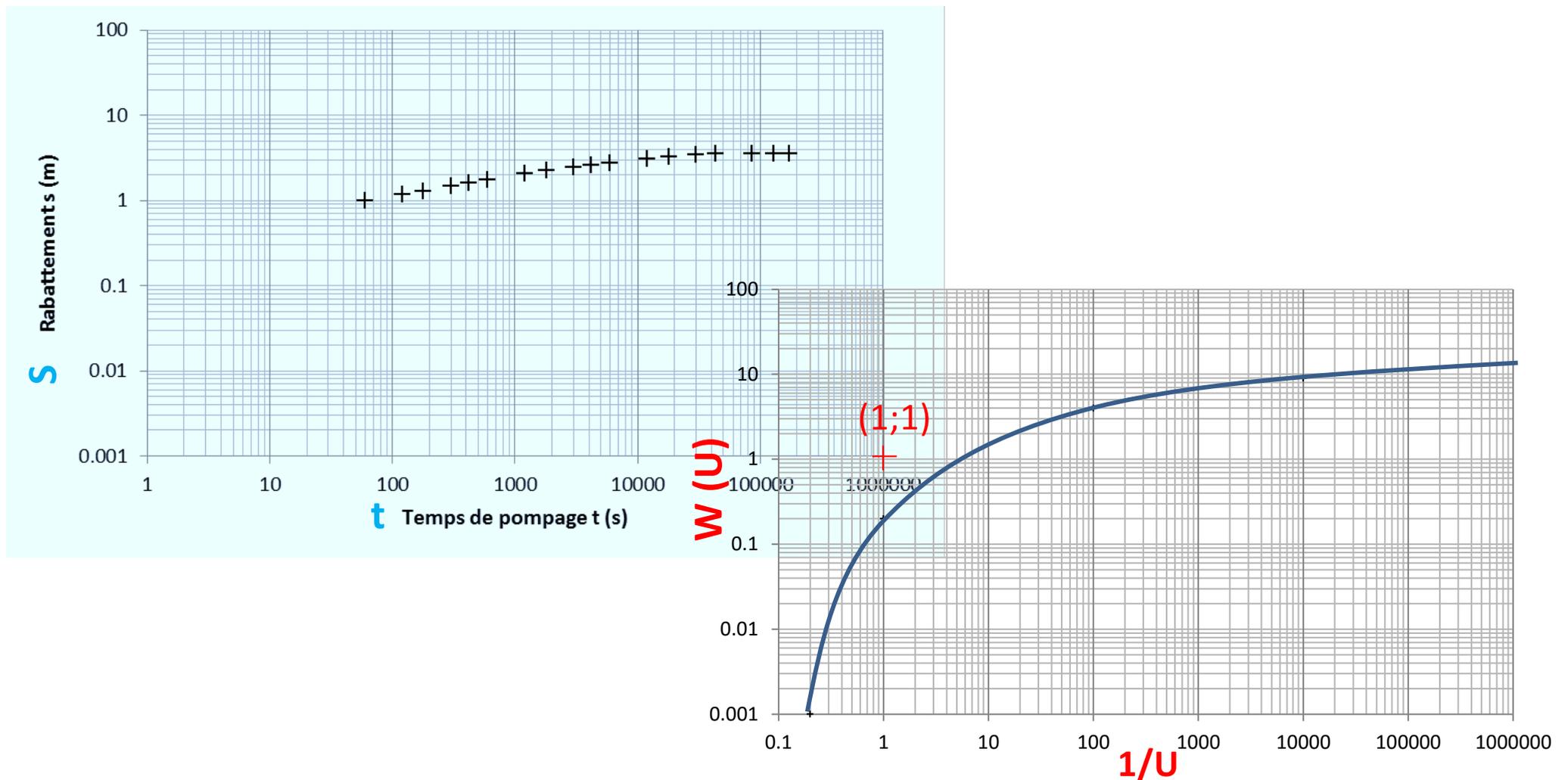
- Les essais de nappe (pompage de longue durée)
- ▶ Pompage d'essai en régime **transitoire**
  - Méthode d'interprétation graphique de Theis



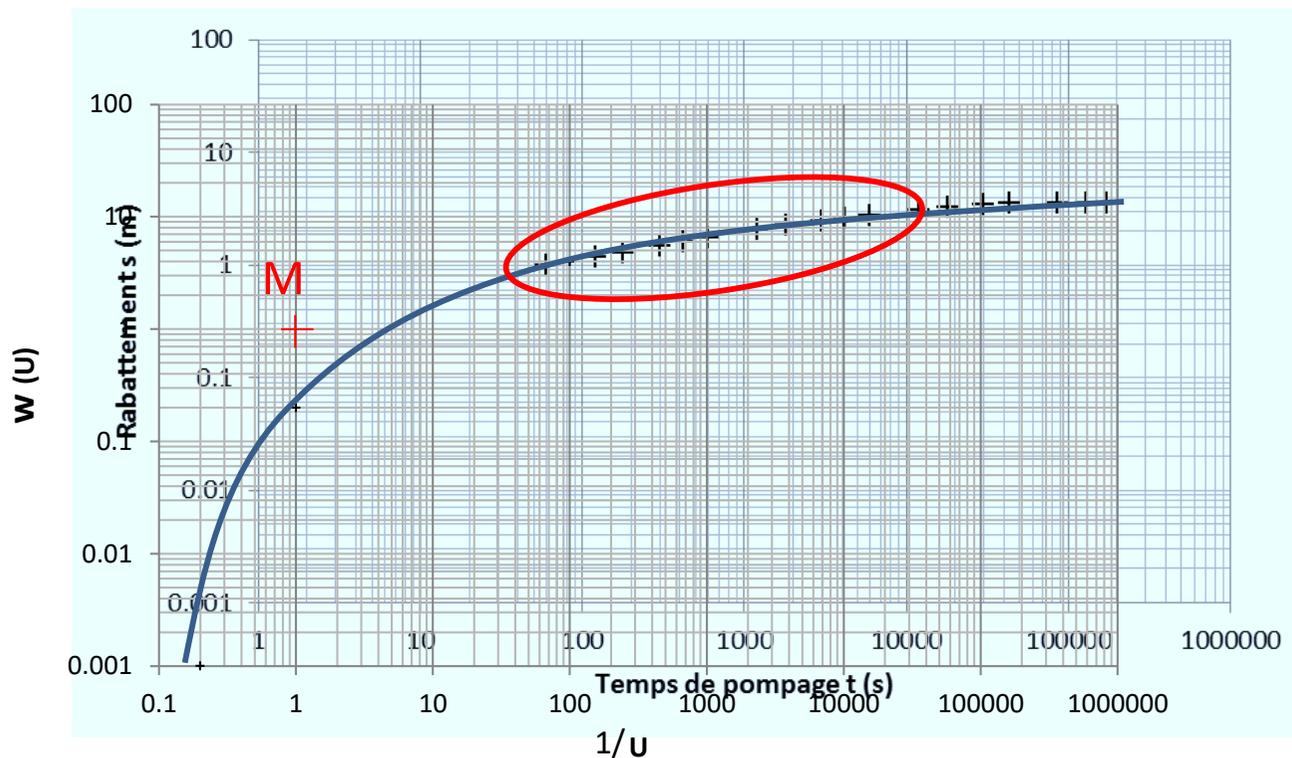
- Les essais de nappe (pompage de longue durée)
- ▶ Pompage d'essai en régime **transitoire**
  - Méthode d'interprétation graphique (papier log/log)



- Les essais de nappe (pompage de longue durée)
- ▶ Pompage d'essai en régime **transitoire**
  - Méthode d'interprétation graphique de Theis (papier log/log)



- Les essais de nappe (pompage de longue durée)
- ▶ Pompage d'essai en régime **transitoire**
  - Méthode d'interprétation graphique de Theis (papier log/log)



$$M(s_M; t_M; u_M; W(u)_M)$$

$$T = \frac{Q}{4\pi S} \omega(u)$$

$$S = \frac{4Ttu}{r^2}$$

Coordonnée du point M :

Repère $W(u); 1/u$	Repère rabattement/temps
<b><math>W(u)=1</math> et <math>1/u=1</math></b>	s et t à lire sur le graphe

□ **Les essais de nappe (pompage de longue durée)**

▶ **Pompage d'essai en régime transitoire**

- Solution de Laplace, donnée par l'équation de Theis (1935)

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \omega(u) = \frac{Q}{4\pi T} \left[ -0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} \dots \right]$$
$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

Q : débit de pompage [ $L^3T^{-1}$ ];

s : rabattement [L] ;

T : transmissivité [ $L^2T^{-1}$ ];

t : temps depuis le début de pompage [T] ;

r : distance centre du forage – mesure de la charge [L] ;

S : Coefficient d'emmagasinement [-].

□ **Les essais de nappe (pompage de longue durée)**

▶ Pompage d'essai en régime **transitoire**

- Solution de Laplace, donnée par l'équation de Theis (1935)

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \omega(u) = \frac{Q}{4\pi T} \left[ -0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} \dots \right]$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

- Equation de Jacob (approximation de la solution de Theis)

si  $u < 0.05$

$$s = \frac{0,183}{T} Q \log \frac{2,25Tt}{r^2 S}$$

Très utilisée !!

Q : débit de pompage [ $L^3T^{-1}$ ];

s : rabattement [L] ;

T : transmissivité [ $L^2T^{-1}$ ];

t : temps depuis le début de pompage [T] ;

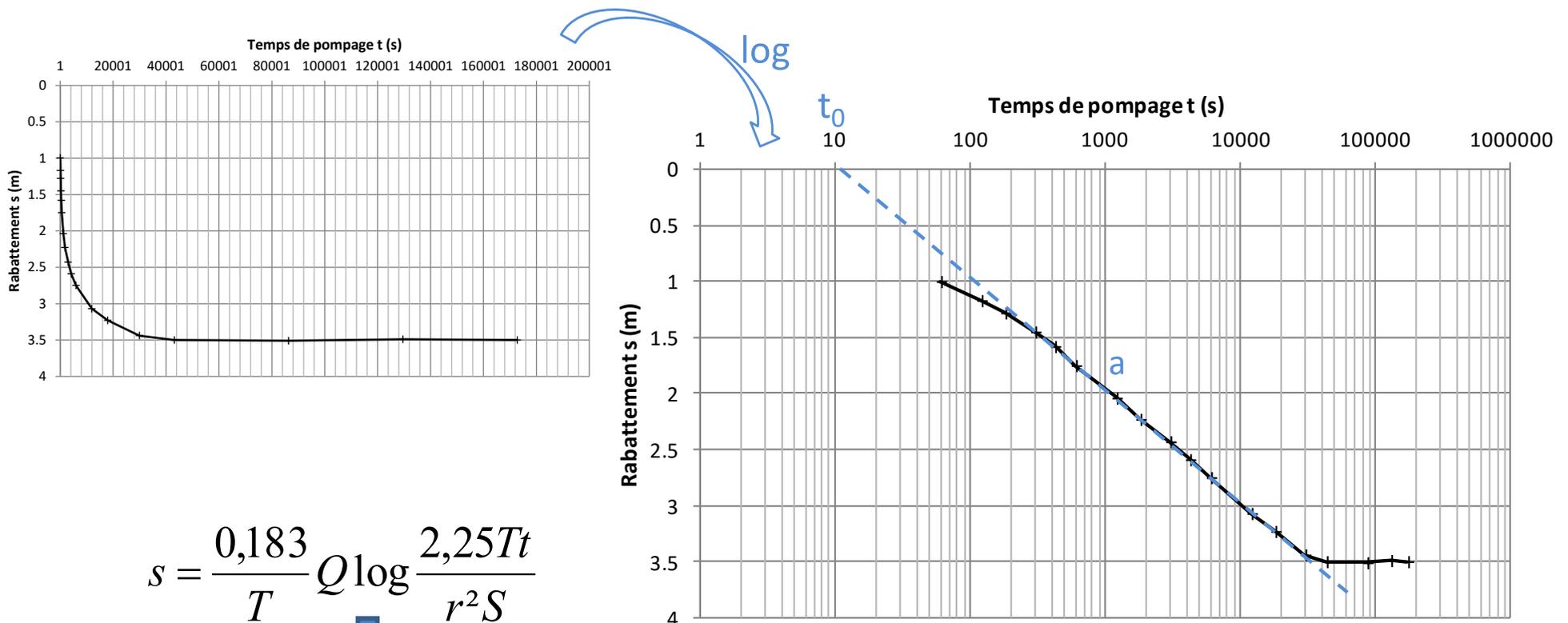
r : distance centre du forage – mesure de la charge [L] ;

S : Coefficient d'emmagasinement [-].

Les essais de nappe (pompage de longue durée)

Pompage d'essai en régime transitoire

- Equation de Jacob (approximation de la solution de Theis) (papier log normal)



$$s = \frac{0,183}{T} Q \log \frac{2,25Tt}{r^2 S}$$

$$s = \frac{0,183}{T} Q \log t + \frac{0,183}{T} Q \log \frac{2,25T}{r^2 S}$$

=a

$$s = a \log t + b$$

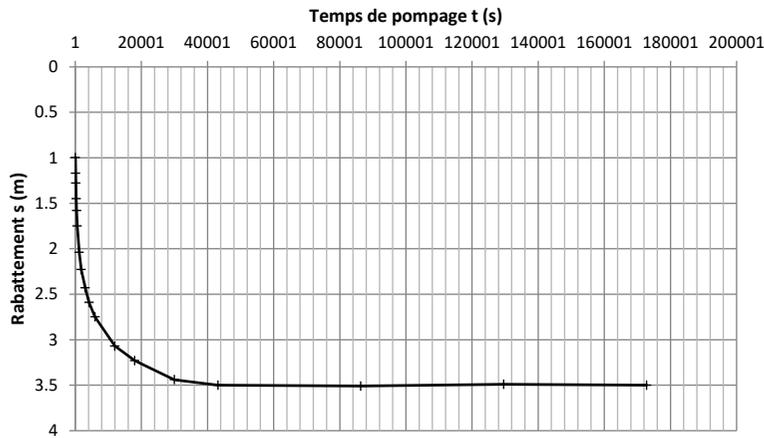
$\downarrow$                        $\downarrow$   
 T                              S

Les essais de nappe (pompage de longue durée)

Pompage d'essai en régime transitoire

- Equation de Jacob (approximation de la solution de Theis)

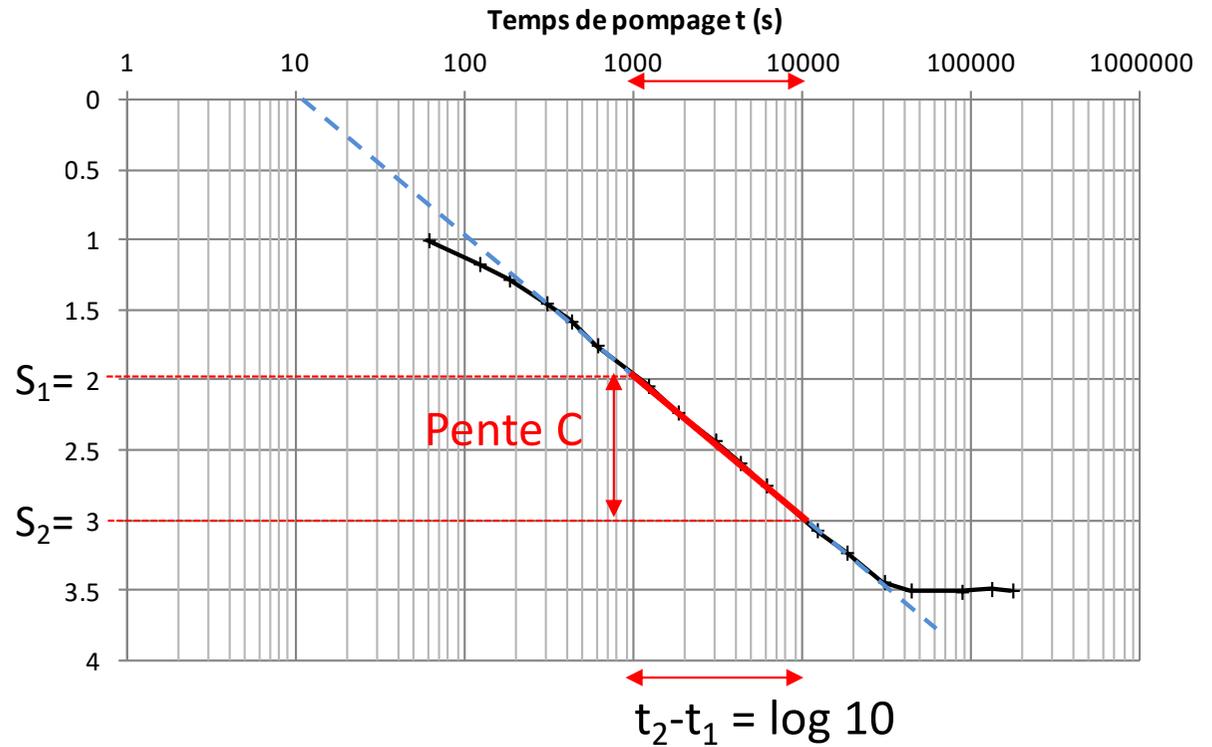
$$s = \frac{0,183}{T} Q \log \frac{2,25Tt}{r^2 S}$$



a. Détermination de T

$$T = \frac{0,183}{s_2 - s_1} Q$$

$$T = 0,183 \cdot Q / C$$

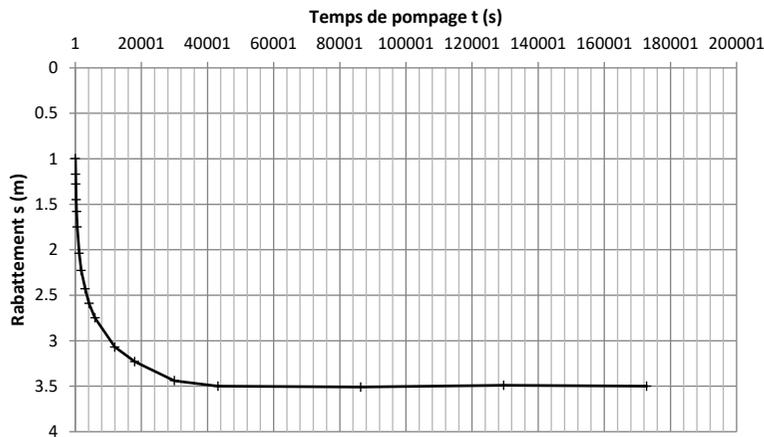


□ Les essais de nappe (pompage de longue durée)

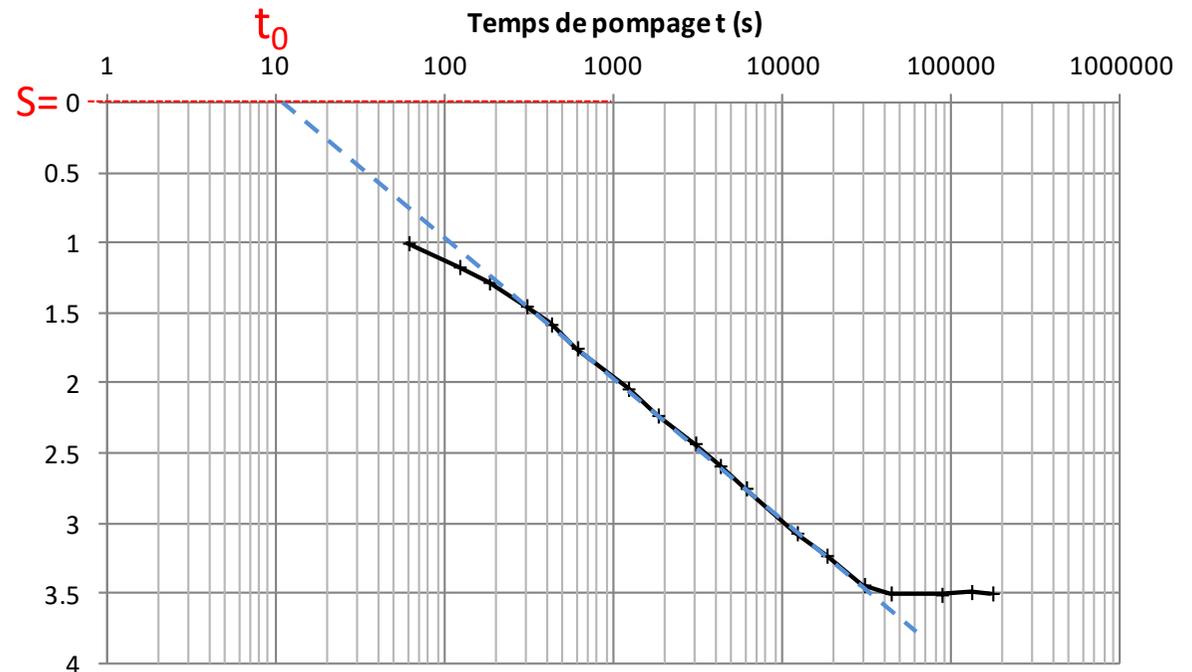
▶ Pompage d'essai en régime **transitoire**

- Equation de Jacob (approximation de la solution de Theis)

$$s = \frac{0,183}{T} Q \log \frac{2,25 T t}{r^2 S}$$



b. Détermination de  $S$   
À  $t_0$ ,  $s=0$

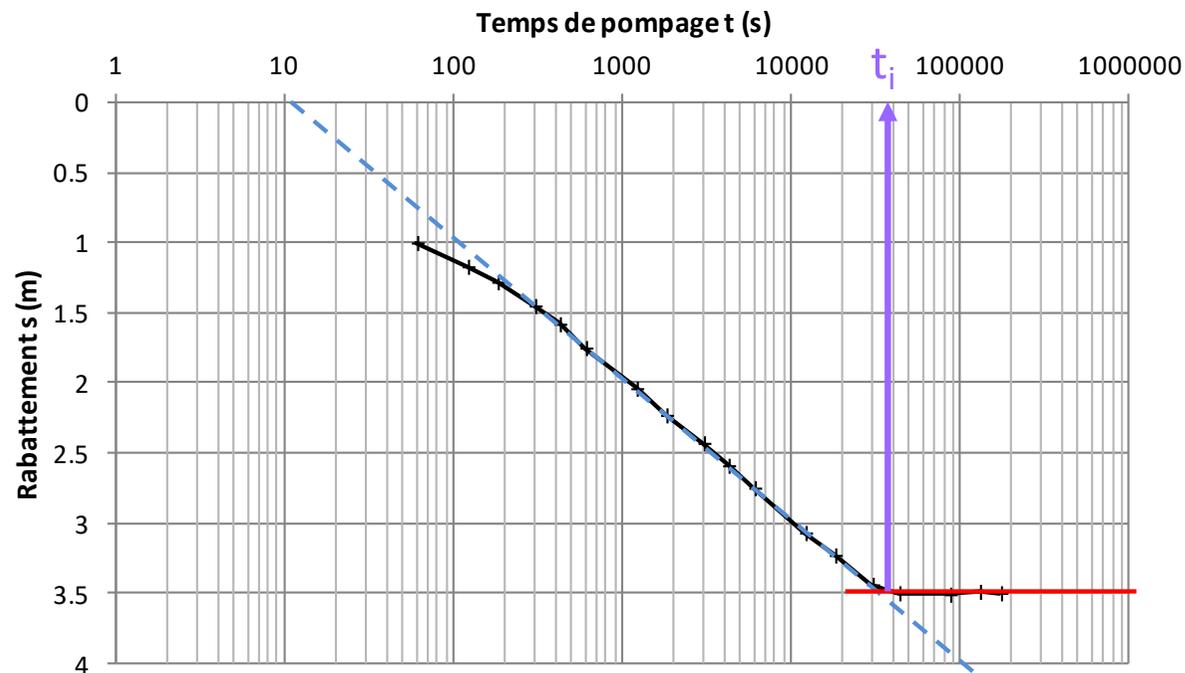


$$S = (2,25 T t_0) / r^2$$

□ Les essais de nappe (pompage de longue durée)

▶ Pompage d'essai en régime **transitoire**

- Détermination des conditions aux limites de l'aquifère : **limite d'alimentation**

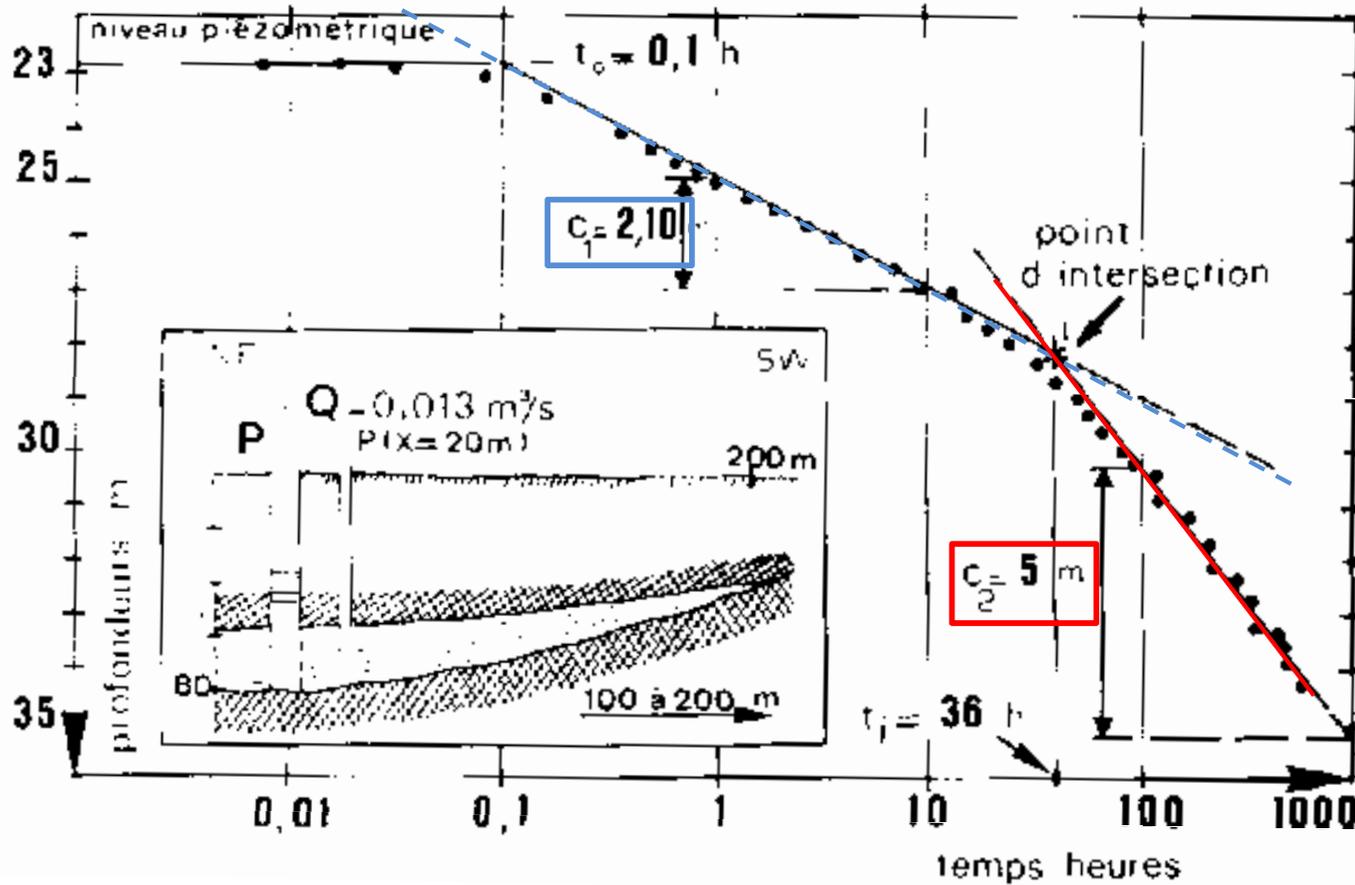


$$\rightarrow \text{Distance de la limite : } R_i = \sqrt{\frac{2,25 T t_i}{S}}$$

□ Les essais de nappe (pompage de longue durée)

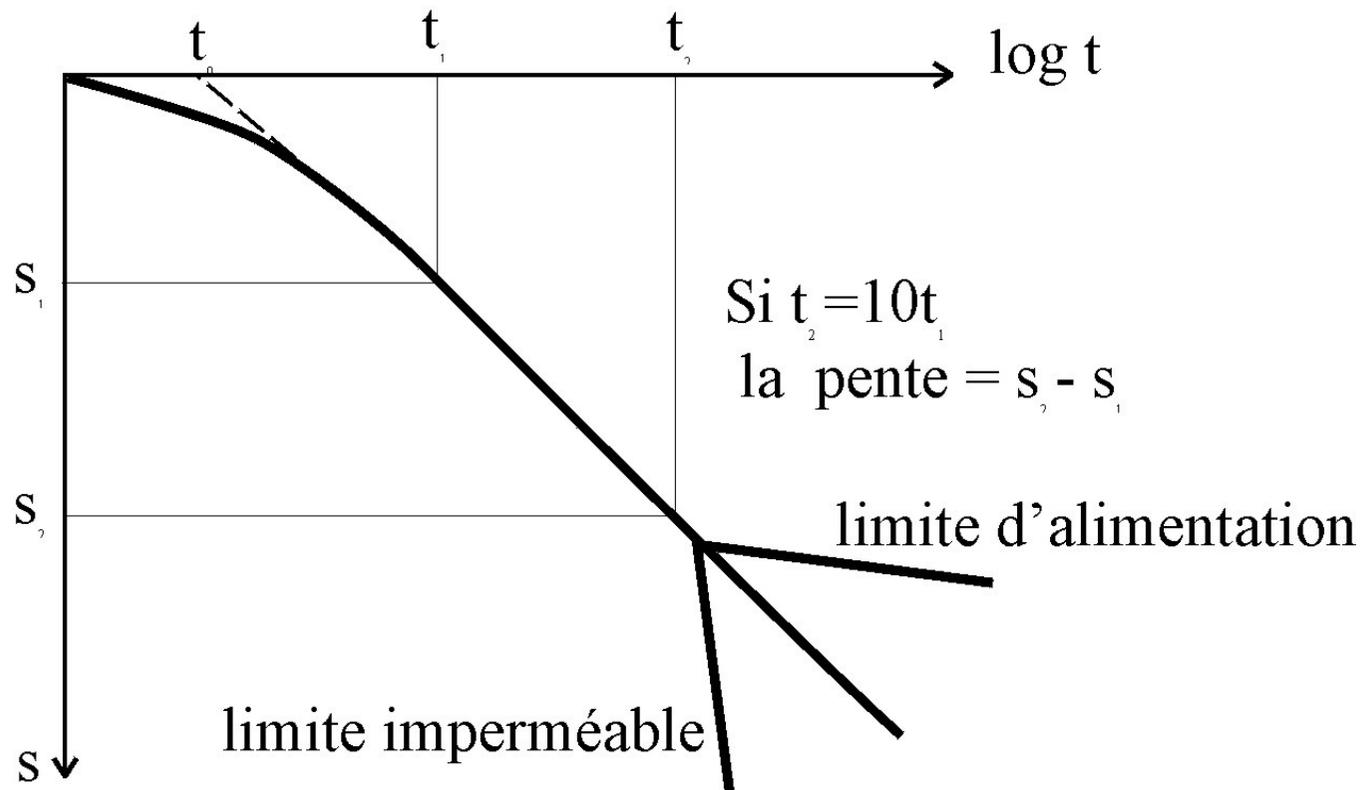
► Pompage d'essai en régime **transitoire**

- Détermination des conditions aux limites de l'aquifère : **limite étanche**



- Les essais de nappe (pompage de longue durée)
- ▶ Pompage d'essai en régime **transitoire**
  - Détermination des conditions aux limites de l'aquifère

## Jacob





Piezomètre dans le glissement de Super-Sauze, Haute-Provence



Sources d'Ichetucknee, Floride

Site expérimental de Kerrien, Bretagne



## Licence 2 Sciences de la Terre et de l'eau – S3

# HYDROGEOLOGIE GENERALE

## HLST 304

### II. Méthode d'étude du fonctionnement des aquifères

CM5. Cartographie hydrogéologique

CM6. Forage et essais par pompage

#### CM7. Caractérisation hydrochimique de l'eau de l'aquifères

*Et l'eau de ce captage, est-ce que je peux la boire ?*

1. Composition chimique des eaux souterraines
2. Acquisition du chimisme des eaux souterraines
  - 2.1. Apports atmosphériques
  - 2.2. Mise en solution de minéraux; réactions acide-base; réactions d'oxydo-réduction
3. Facteurs influençant la composition chimique de l'eau
  - 3.1. Nature des roches traversées -Notion de faciès chimique
  - 3.2. Temps de contact de l'eau avec les minéraux

CM8. Protection des eaux souterraines

**A la fin de ce cours, vous devez être capable de....**

- Citer les différents faciès chimiques des eaux
- Donner des ordres de grandeur de conductivité électrique et d'éléments caractéristiques par type de roche
- Faire le lien entre un type de roche et le faciès chimique d'une eau
- Décrire le processus d'acquisition du chimisme d'une eau

□ Que contiennent les eaux souterraines?

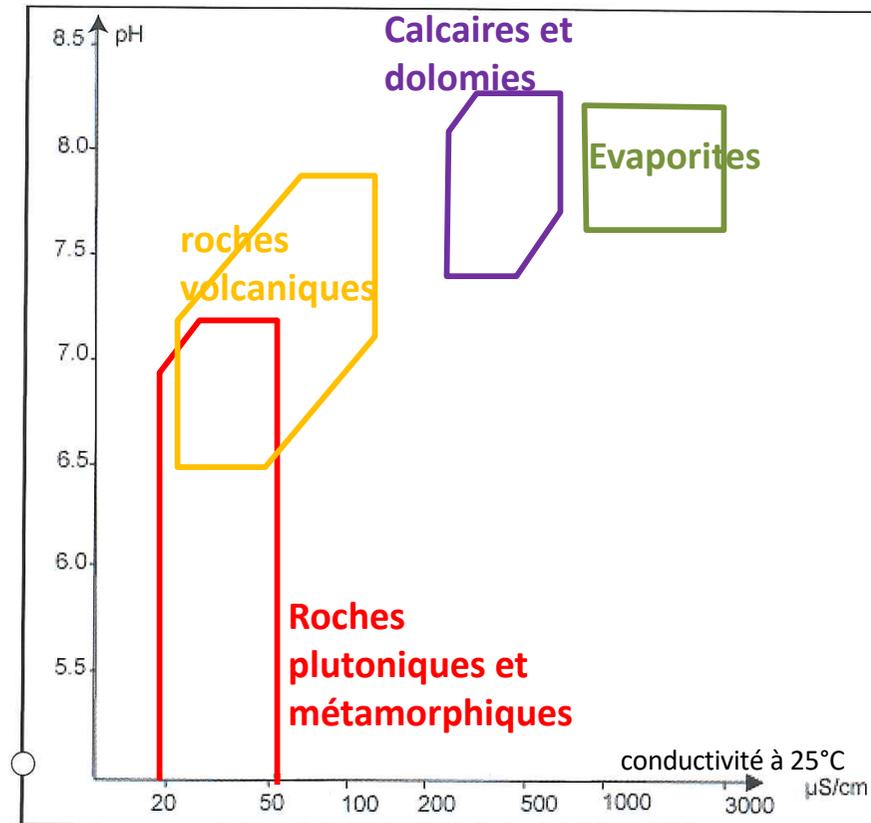


Figure 3 : Variations du pH et de la conductivité dans les eaux de drainage de différents types de roches (conductivité en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 25 °C) (Meybeck, 1984).

► Minéralisation des eaux en fonction du type de roche encaissant

□ **Que contiennent les eaux souterraines?**

Elément	Symbole	Roches ignées	Roches sédimentaires		
			Grès	Argiles	Carbonates
Silicium	Si	285 000	359 000	260 000	34
Calcium	Ca	36 200	22 400	22 500	272 000
Sodium	Na	28 100	3 870	4 850	393
Potassium	K	25 700	13 200	24 900	2 390
Magnésium	Mg	17 600	8 100	16 400	45 300
Carbone	C	320	13 800	15 300	113 500
Chlore	Cl	305	15	170	305
Soufre	S	410	945	1 850	4 550

**Tableau 3 :** Abondances moyennes à l'échelle mondiale en éléments majeurs dans les principaux types de roche (en mg/kg), (d'après Horn et Adams (1966) dans Hem (1985)).

► Minéralisation des eaux en fonction du type de roche encaissant

⇒ **La nature géologique des aquifères détermine la composition chimique des eaux souterraines**

### □ **Caractéristiques des eaux souterraines**

#### ▶ Paramètres physico-chimiques/ paramètres de terrain :

T°, Conductivité, pH, O<sub>2</sub>, Eh

#### ▶ Eléments chimiques : inorganiques/organiques

**+ Bactéries**

1mg/L : 1kg de sucre  
dans une piscine  
olympique

1µg/L : 1 carré de  
sucre dans une  
piscine olympique

#### **Majeurs (10<sup>+4</sup> à 10 mg/l)**

- cations: Calcium /Magnésium / Sodium / Potassium
- anions : Chlorures / Sulfates / Bicarbonates/ Nitrates
- Silice

#### **Mineurs/Traces (µg/l)**

- cations: Fe, Mn, Al, Cu, As, Hg....
- anions: NO<sub>2</sub>, PO<sub>4</sub>...
- HAP
- Pesticides

**Gaz**

- Unités g/l - mol/l - eq/l
- TDS (Total dissolved solid)/ Conductivité électrique
- Alcalinité- TAC (Titre alcalimétrique complet)

$$\text{TAC (1}^\circ\text{f)} = [\text{OH}^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-]^2$$

représente la concentration en ions carbonates, bicarbonates

1 °f = 3,4 mg/l d'ion hydroxyde HO<sup>-</sup> = 6,0 mg/l d'ion carbonate CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> = 12,2 mg/L d'ion [hydrogénocarbonate HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>](#).

□ **Caractéristiques des eaux souterraines**

▶ Paramètres physico-chimiques/ paramètres de terrain :

T°, Conductivité, pH, O<sub>2</sub>, Eh

▶ Eléments chimiques : inorganiques/organiques

**Majeurs (10<sup>+4</sup> à 10 mg/l)**

- cations: Calcium /Magnésium / Sodium / Potassium
- anions : Chlorures / Sulfates / Bicarbonates/ Nitrates
- Silice

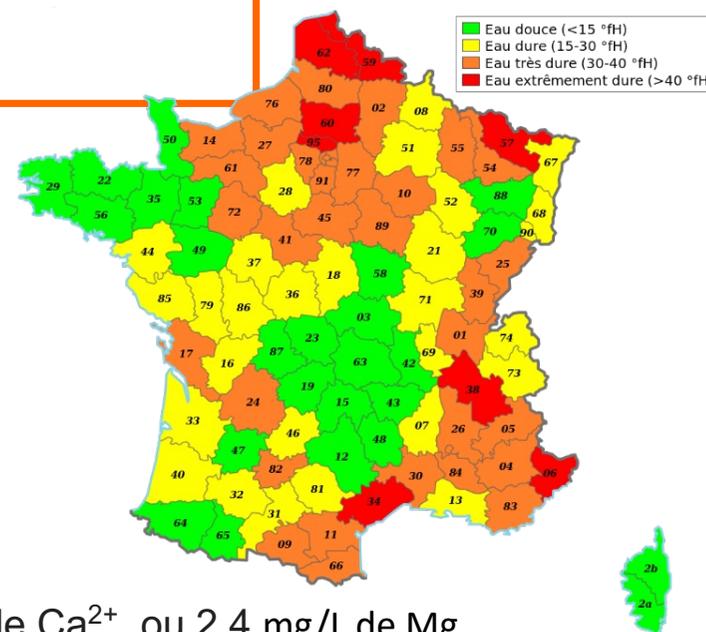
**Mineurs/Traces (µg/l)**

- cations: Fe, Mn, Al, Cu, As, Hg....
- anions: NO<sub>2</sub>, PO<sub>4</sub>...
- HAP
- Pesticides

**+ Bactéries**

**Gaz**

- Unités g/l - mol/l - eq/l
- TDS (Total dissolved solid)/ Conductivité électrique
- Alcalinité- TAC (Titre alcalimétrique complet)
- Titre hydrotimétrique – Dureté [Ca+Mg]



TH (°f)	0 à 7	7 à 15	15 à 30	30 à 40	+ 40
Eau	très douce	douce	plutôt dure	dure	très dure

1°f = 4 mg/L de Ca<sup>2+</sup>, ou 2,4 mg/L de Mg

Caractéristiques des eaux souterraines

Normes de potabilité



Bouteille d'eau de turbidité faible à élevée (unicef.org)

Paramètres	Unités	Limites de qualité
<b>Paramètres organoleptiques</b>		
Couleur	mg/l échelle Pt/Co	15
Turbidité	NFU	1
Odeur	Taux dilution	2 à 12° et 3 à 25°
Saveur	Taux dilution	2 à 12° et 3 à 25°
<b>Paramètres physico-chimiques</b>		
Température	°C	25
pH		6.5 à 9
Conductivité	µS/cm à 20°C	180 à 1000
Chlorure	mg/l	250
Sulfate	mg/l	250
Silice		
Calcium		
Magnésium	mg/l	50
Sodium	mg/l	200
Potassium	mg/l	12
Aluminium total	mg/l	0.2
TAC	°F	50
Résidu sec	mg/l	1500
Oxygène dissous		
Gaz carbonique		
<b>Substances indésirables</b>		
Nitrates	mg/l	50
Nitrites	mg/l	0.1
Ammonium	mg/l	0.1
Azote Kjeldahl	mg/l	1
Oxydabilité au	mg/l	5
COT	mg/l	2
H <sub>2</sub> S		Non détectable à l'odeur
Hydrocarbures	µg/l	10
Phénols	µg/l	0.5
Bore	mg/l	1
Détergents	µg/l	200
Organochlorés	µg/l	Pour le total des substances mesurées : 0.5
Fer total	µg/l	200
Manganèse	µg/l	50
Cuivre	mg/l	1
Zinc	mg/l	5
Phosphore	mg/l	5
Fluorures	mg/l	1.5
Cobalt		
MES		
Chlore résiduel		
Baryum	mg/l	0.7
Argent	µg/l	10

Paramètres	Unités	Limites de qualité
<b>Substances toxiques</b>		
Arsenic	µg/l	10
Beryllium		
Cadmium	µg/l	5
Cyanures totaux	µg/l	50
Chrome total	µg/l	50
Mercuré total	µg/l	1
Nickel	µg/l	20
Plomb	µg/l	10
Antimoine	µg/l	5
Sélénium	µg/l	10
Vanadium		
HAP	µg/l	0.2
<b>Paramètres microbiologiques</b>		
Coliformes	N/100 ml	0 pour 95% des
Coliformes	N/100 ml	0
Streptocoques	N/100 ml	0
Clostridium	N/100 ml	55
Staphylocoques	N/100 ml	0
Salmonelles	N/5 l	0
Entérovirus	N/10 l	0
<b>Pesticides</b>		
Total	µg/l	0.5
Normes	µg/l	0.1

### □ **Caractéristiques des eaux souterraines**

#### ▶ Les différents types d'eau souterraines embouteillées (plates ou gazeuses)

##### ■ **Eaux minérales (naturelles)**

- Souterraine + protection naturelle
- Composition physico-chimique stable ( $\Delta \pm 10\%$ )
- Absence de traitement chimique
- Pas d'obligation de respecter la norme de potabilité...

##### ■ **Eaux de source**

- Souterraine + protection naturelle
- Absence de traitement chimique
- Naturellement potable
- Embouteillage et commercialisation après arrêté préfectoral

##### ■ **Eaux de table**

- peut subir un traitement physique et/ou chimique (déferrisation, chloration, UV...) pour la rendre potable.



**Aucun traitement physico-chimique autorisé (sauf filtration, décantation, oxygénation)**



**Similaire à l'eau du robinet**



Caractéristiques des eaux souterraines

Les différents types d'eau souterraines embouteillées

	Résidu sec mg/l	pH	Ca <sup>2+</sup> mg/l	Mg <sup>2+</sup> mg/l	K <sup>+</sup> mg/l	Na <sup>+</sup> mg/l	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	Cl <sup>-</sup> mg/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	F <sup>-</sup> mg/l
Volvic	109	7.0	10.4	6.0	5.4	8.0	65.3	8.4	6.3	6.9	0.0
Vichy Célestins	3325	6.8	103.0	10.0	66.0	1172.0	2989.0	235.0	0.0	1385.0	6.0
Evian	309	7.2	78.0	24.0	1.0	5.0	357.0	4.5	0.0	10.0	
Contrex	2032		467.0	84.0	3.0	7.0	377.0	7.0	0.0	1192.0	
Vittel	841		202.0	36.0		3.8	402.0	0.0	0.0	306.0	0.3
Mont Dore	48	7.0	3.6	1.3	0.7	2.5		1.2	0.2	1.0	
Wattwiller	1092		288.0	20.1		3.0	142.0	3.9	0.0	678.0	

Paramètres	Unités	Limites de qualité
<b>Paramètres organoleptiques</b>		
Couleur	mg/l échelle Pt/Co	15
Turbidité	NFU	1
Odeur	Taux dilution	2 à 12° et 3 à 25°
Saveur	Taux dilution	2 à 12° et 3 à 25°
<b>Paramètres physico-chimiques</b>		
Température	°C	25
pH		6.5 à 9
Conductivité	µS/cm à 20°C	180 à 1000
Chlorure	mg/l	250
Sulfate	mg/l	250
Silice		
Calcium		
Magnésium	mg/l	50
Sodium	mg/l	200
Potassium	mg/l	12
Aluminium total	mg/l	0.2
TAC	°F	50
Résidu sec	mg/l	1500
Oxygène dissous		
Gaz carbonique		
<b>Substances indésirables</b>		
Nitrates	mg/l	50
Nitrites	mg/l	0.1
Ammonium	mg/l	0.1
Azote Kjeldahl	mg/l	1
Oxydabilité au	mg/l	5
COT	mg/l	2
H <sub>2</sub> S		Non détectable à l'odeur
Hydrocarbures	µg/l	10
Phénols	µg/l	0.5
Bore	mg/l	1
Détergents	µg/l	200
Organochlorés	µg/l	Pour le total des substances mesurées : 0.5
Fer total	µg/l	200
Manganèse	µg/l	50
Cuivre	mg/l	1
Zinc	mg/l	5
Phosphore	mg/l	5
Fluorures	mg/l	1.5
Cobalt		
MES		
Chlore résiduel		
Baryum	mg/l	0.7
Argent	µg/l	10

Paramètres	Unités	Limites de qualité
<b>Substances toxiques</b>		
Arsenic	µg/l	10
Béryllium		
Cadmium	µg/l	5
Cyanures totaux	µg/l	50
Chrome total	µg/l	50
Mercuré total	µg/l	1
Nickel	µg/l	20
Plomb	µg/l	10
Antimoine	µg/l	5
Sélénium	µg/l	10
Vanadium		
HAP	µg/l	0.2
<b>Paramètres microbiologiques</b>		
Coliformes	N/100 ml	0 pour 95% des
Coliformes	N/100 ml	0
Streptocoques	N/100 ml	0
Clostridium	N/100 ml	55
Staphylocoques	N/100 ml	0
Salmonelles	N/5 1	0
Entérovirus	N/10 1	0
<b>Pesticides</b>		
Total	µg/l	0.5
Normes	µg/l	0.1

□ **Acquisition du chimisme des eaux souterraines**

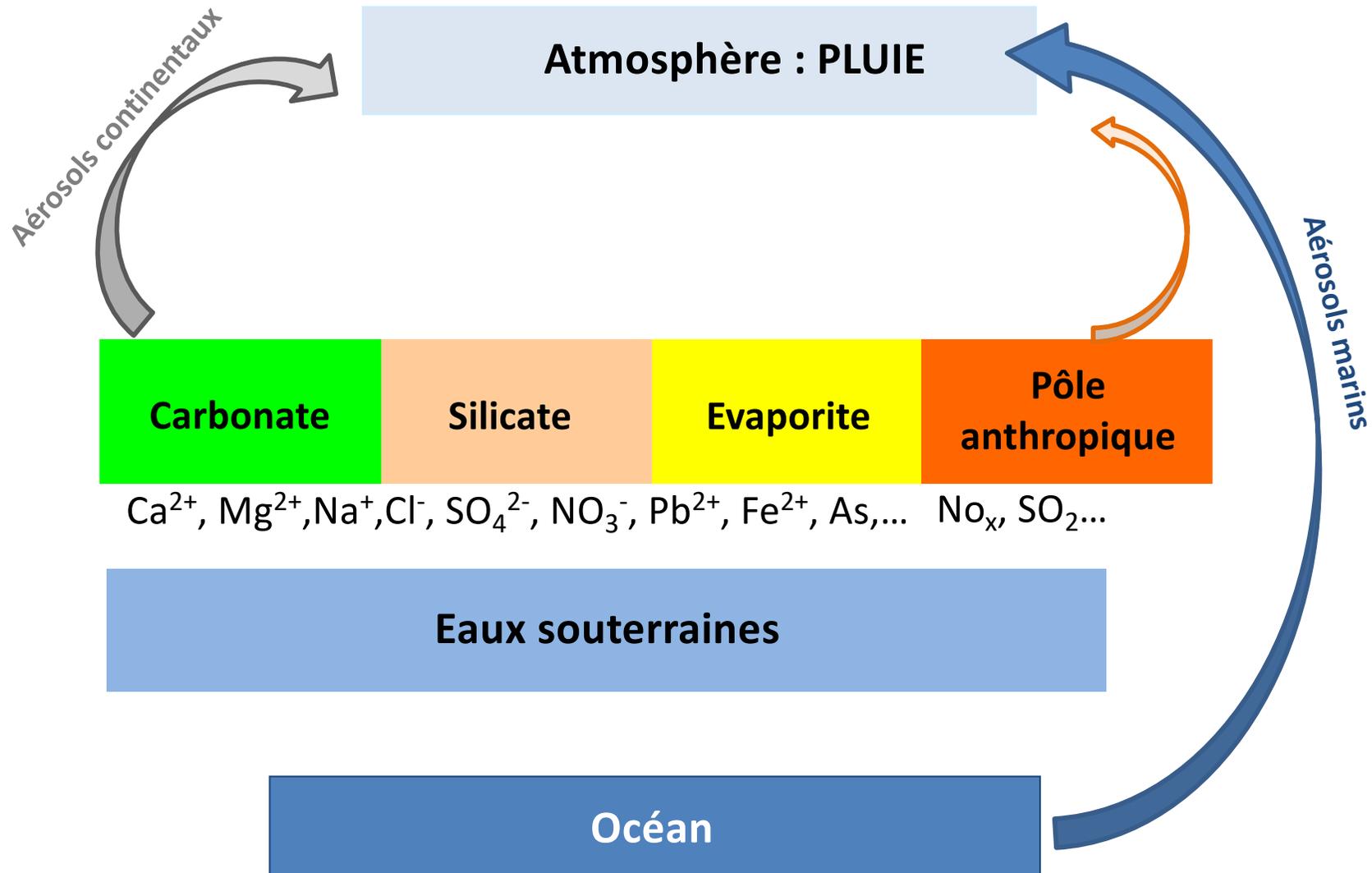
Origine des éléments dissous et particuliers dans l'eau souterraine?

**Atmosphère : PLUIE**

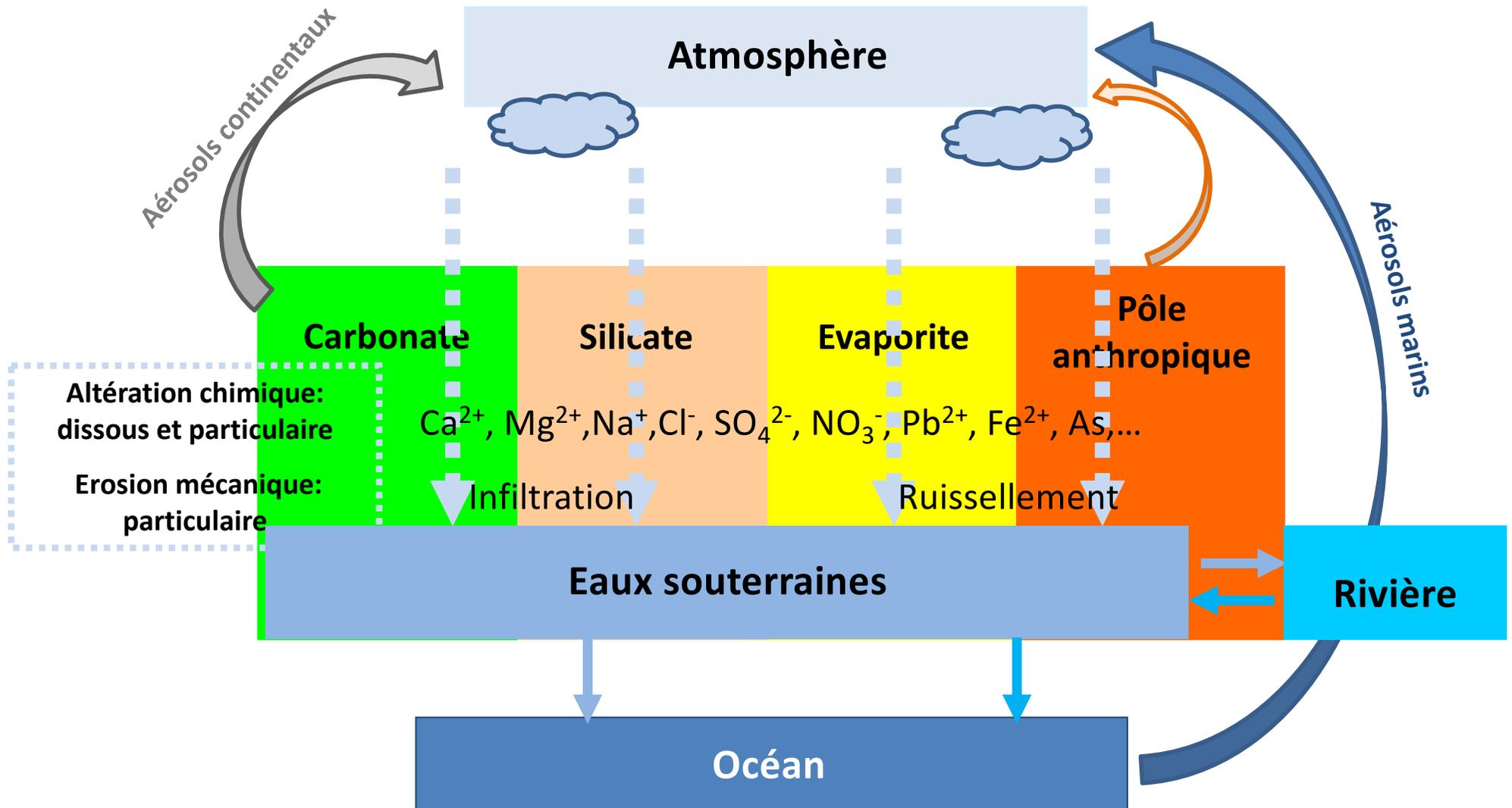
**Eaux souterraines ?**

## □ Acquisition du chimisme des eaux souterraines

Origine des éléments dissous et particulaires dans l'eau souterraine?



## □ Acquisition du chimisme des eaux souterraines



## □ Acquisition du chimisme des eaux souterraines

### ▶ Apports atmosphériques

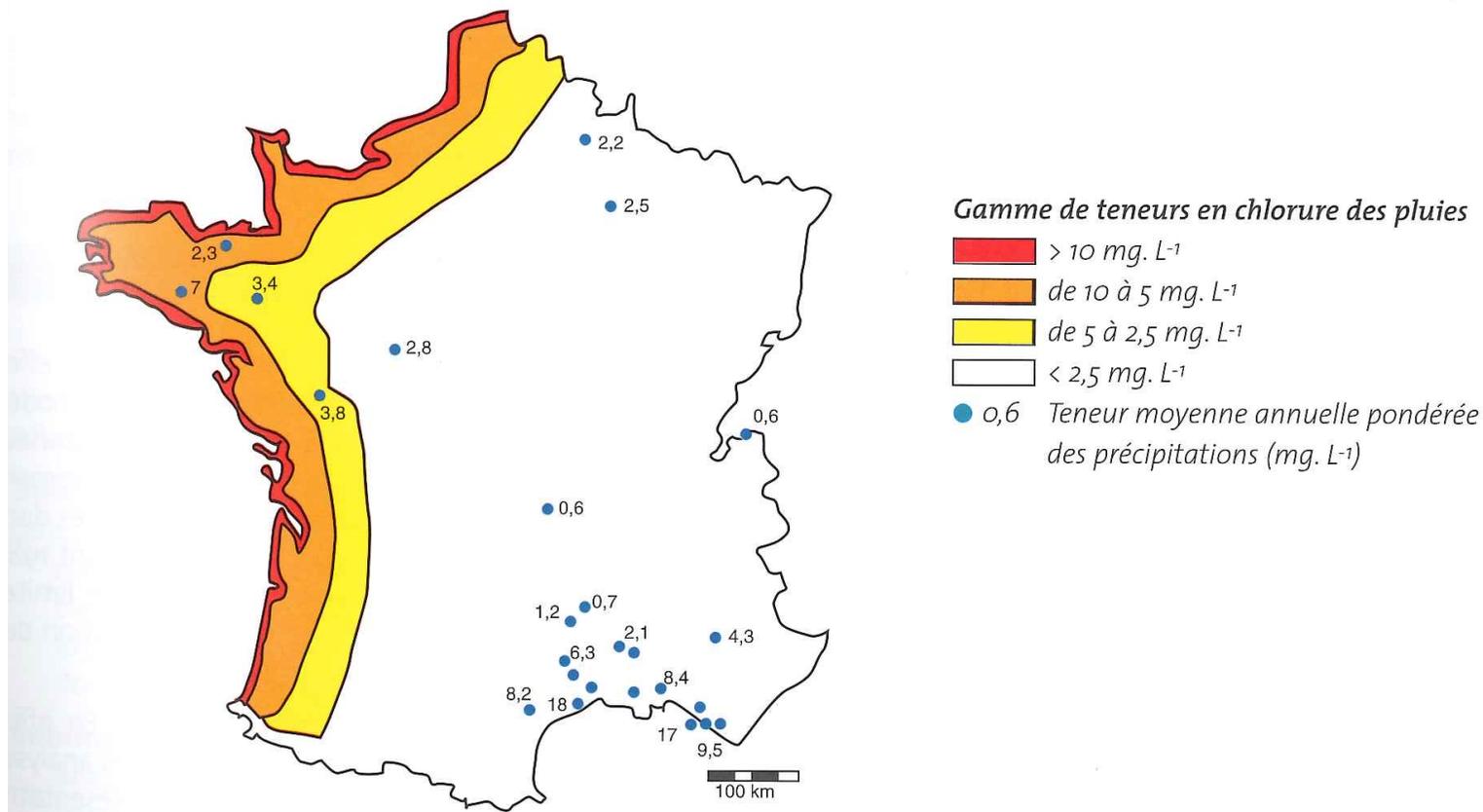


Figure 1 : Carte schématique des teneurs en chlorure dans les précipitations sur la côte de l'Atlantique, de la Manche, de la Mer du Nord.

## □ Acquisition du chimisme des eaux souterraines

### ► Apports atmosphériques

### ► Phénomène de mise en solution



Caractérisée par le produit de solubilité et l'indice de saturation :  $IS > 0$  : sur saturation;  $IS < 0$  : sous saturation

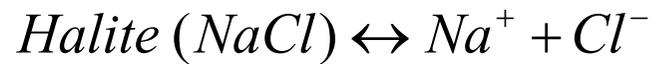
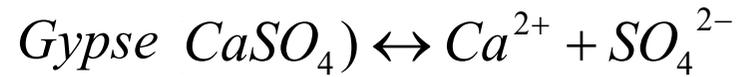
Exemples de réactions d'altération de quelques minéraux

Minéraux	+ Eau	+ Carbonates dissous	$\rightleftharpoons$	Cations	+ Anions	+ Acide silicique	+ Minéraux argileux ex. kaolinite
<i>Calcaire</i> $CaCO_3$	+ $H_2O$		$\rightleftharpoons$	$Ca^{2+}$	+ $HCO_3^- + OH^-$		
$CaCO_3$		+ $H_2CO_3$	$\rightleftharpoons$	$Ca^{2+}$	+ 2 $HCO_3^-$		
<i>Dolomite</i> $CaMg(CO_3)_2$	+ 2 $H_2O$		$\rightleftharpoons$	$Ca^{2+} + Mg^{2+}$	+ 2 $HCO_3^- + 2 OH^-$		
<i>Quartz (Granite)</i> $SiO_2$	+ 2 $H_2O$		$\rightleftharpoons$			$H_4SiO_4$	
<i>Anhydrite (Gypse)</i> $CaSO_4$			$\rightleftharpoons$	$Ca^{2+}$	+ $SO_4^{2-}$		
<i>Feldspath</i> $NaAlSi_3O_8$	+ 5.5 $H_2O$		$\rightleftharpoons$	$Na^+$ +	+ $OH^-$	+ 2 $H_4SiO_4$	$\left[ \begin{array}{l} + 0.5 Al_2Si_2O_5(OH)_4 \\ + 0.5 Al_2Si_2O_5(OH)_4 \\ \text{Kaolinite} \end{array} \right.$
$NaAlSi_3O_8$	+ 4.5 $H_2O$	+ $H_2CO_3$	$\rightleftharpoons$	$Na^+$	+ $HCO_3^-$	+ 2 $H_4SiO_4$	
<i>Sels</i> $NaCl$			$\rightleftharpoons$	$Na^+$	+ $Cl^-$		

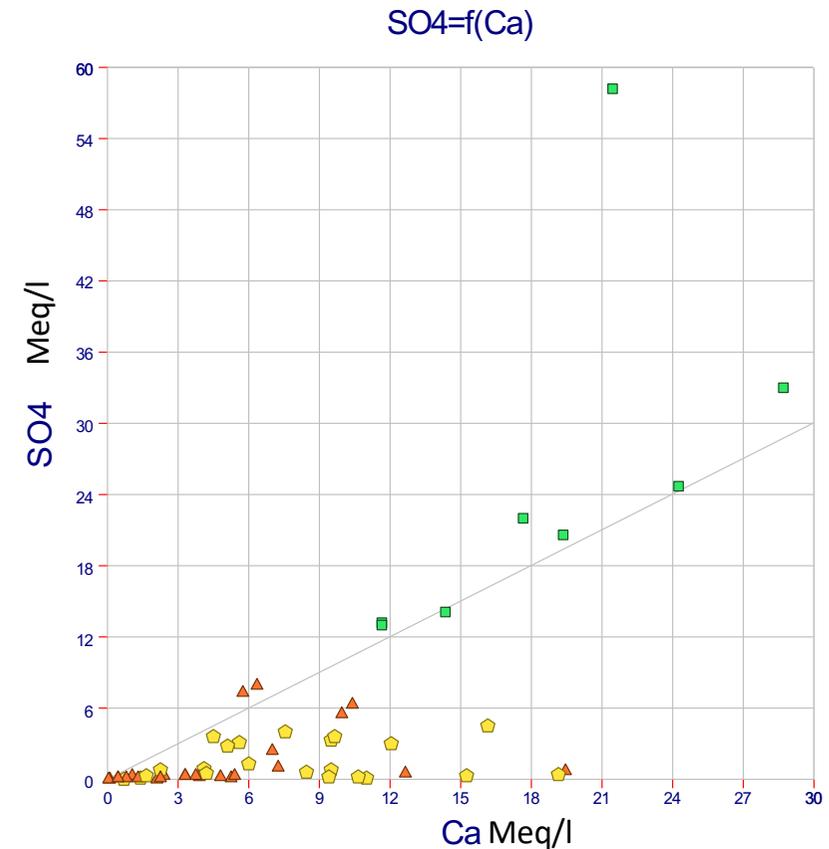
## □ Acquisition du chimisme des eaux souterraines

### ► Phénomène de mise en solution (interaction eau/roche)

- Mise en solution des évaporites



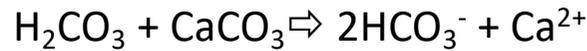
NB:  $\text{Meq/l} = (\text{mg/l}) / \text{M} \cdot \text{valence}$



□ **Acquisition du chimisme des eaux souterraines**

▶ **Phénomène de mise en solution** (interaction eau/roche)

- Mise en solution des carbonates

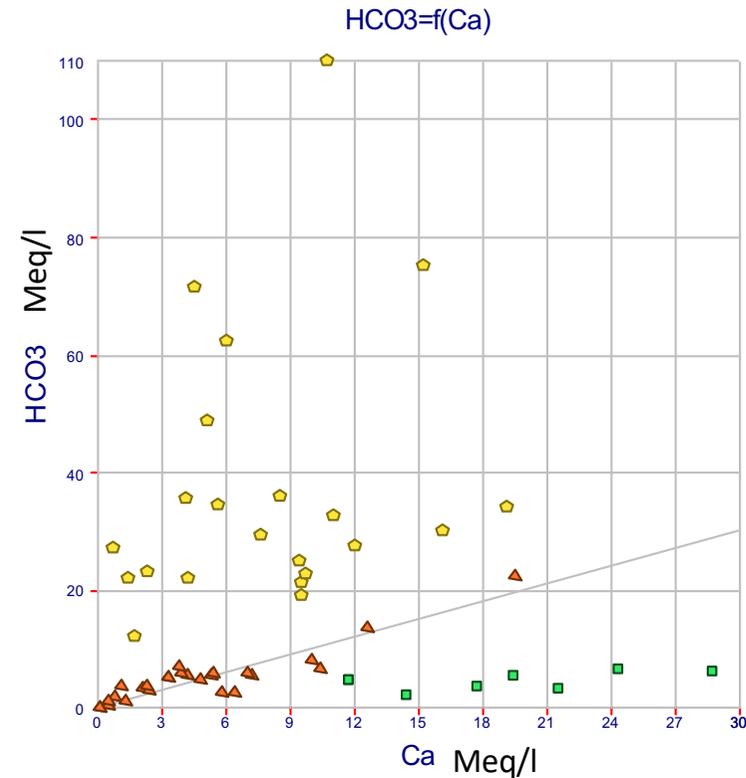


Equilibre en quelques mois

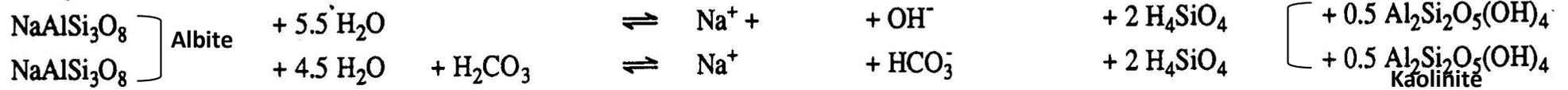
NB: Meq/l = (mg/l)/M\*valence

- Mise en solution des silicates

Equilibre en plusieurs siècles



*Feldspath*



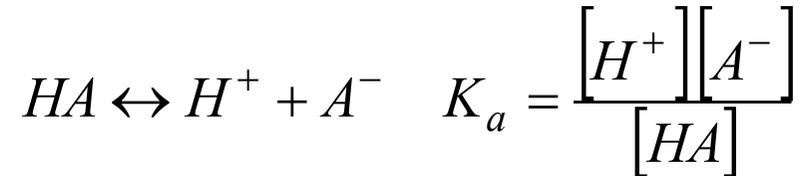
(Sigg et al., 1992)

## □ Acquisition du chimisme des eaux souterraines

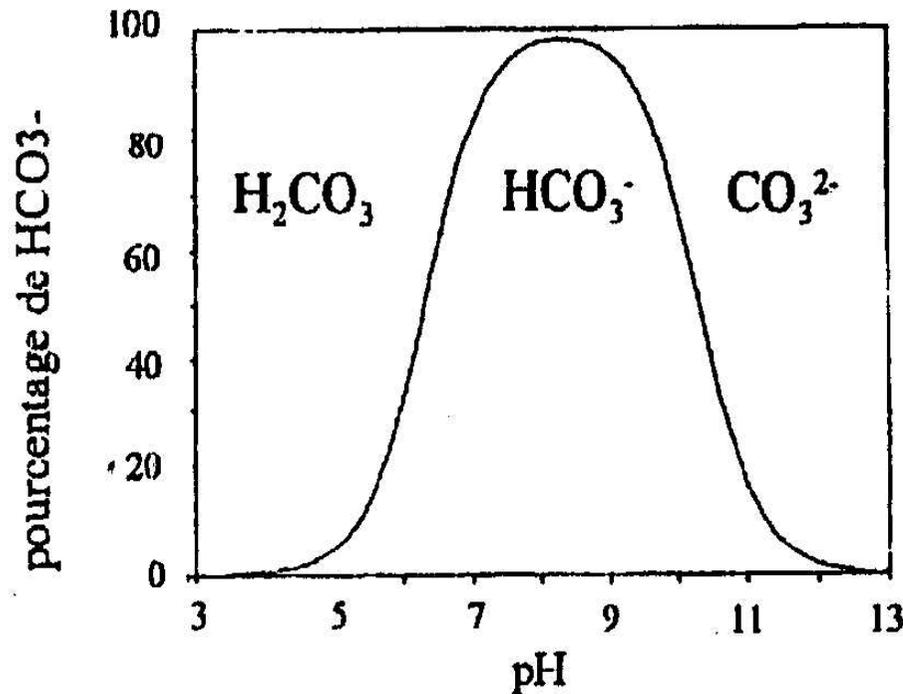
### ► Réactions acide-base

Avec  $K_a$  : constante d'acidité

Caractérisées par le pH

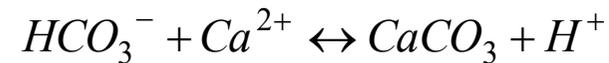
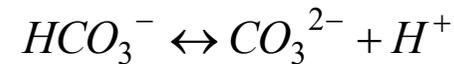


Systèmes acide-base majoritairement actif dans les eaux souterraines: Carbonate



a) système ouvert à 25 ° C

(Stum et Morgan, 1981)



## □ Acquisition du chimisme des eaux souterraines

### ► Réactions d'oxydoréduction $Ox_1 + Red_2 \leftrightarrow Red_1 + Ox_2$

Caractérisées par Eh

Contrôle important sur la mobilité des métaux lourds (Fe, Mn, As) :

En présence d'O<sub>2</sub>, milieu oxydant : métaux sous forme non soluble

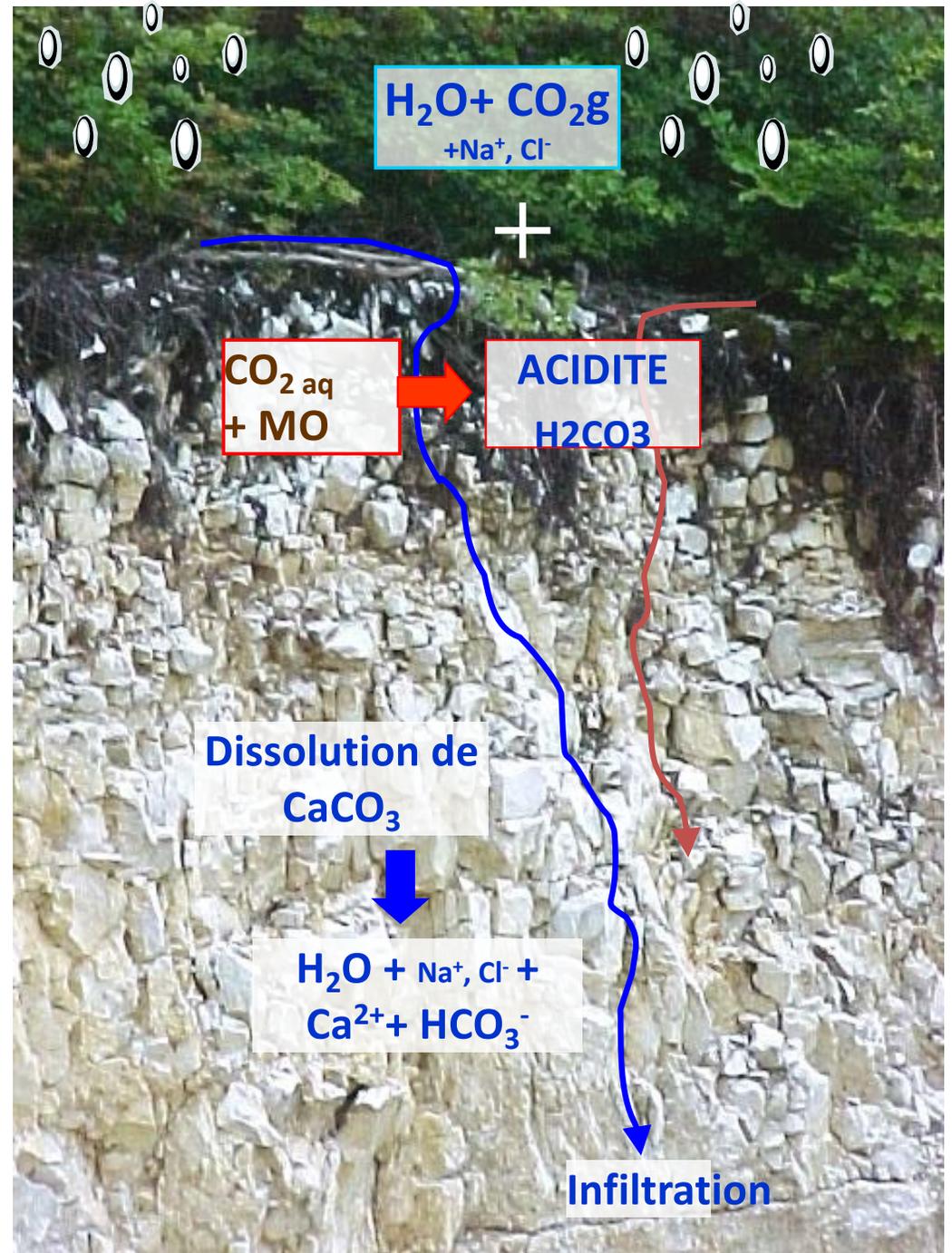
En milieu réducteur, absence d'O<sub>2</sub> : mise en solution de métaux

### ► Autres phénomènes

- Apport gaz ex: CO<sub>2</sub> profond
- Influence micro-organisme ex: sulfato-réduction, dénitrification
- Mélange avec les eaux de surface/ un autre aquifère

□ **Acquisition du chimisme des eaux souterraines**

▶ Exemple d'un milieu karstique en région méditerranéenne



□ **Facteurs influençant la composition chimique de l'eau**

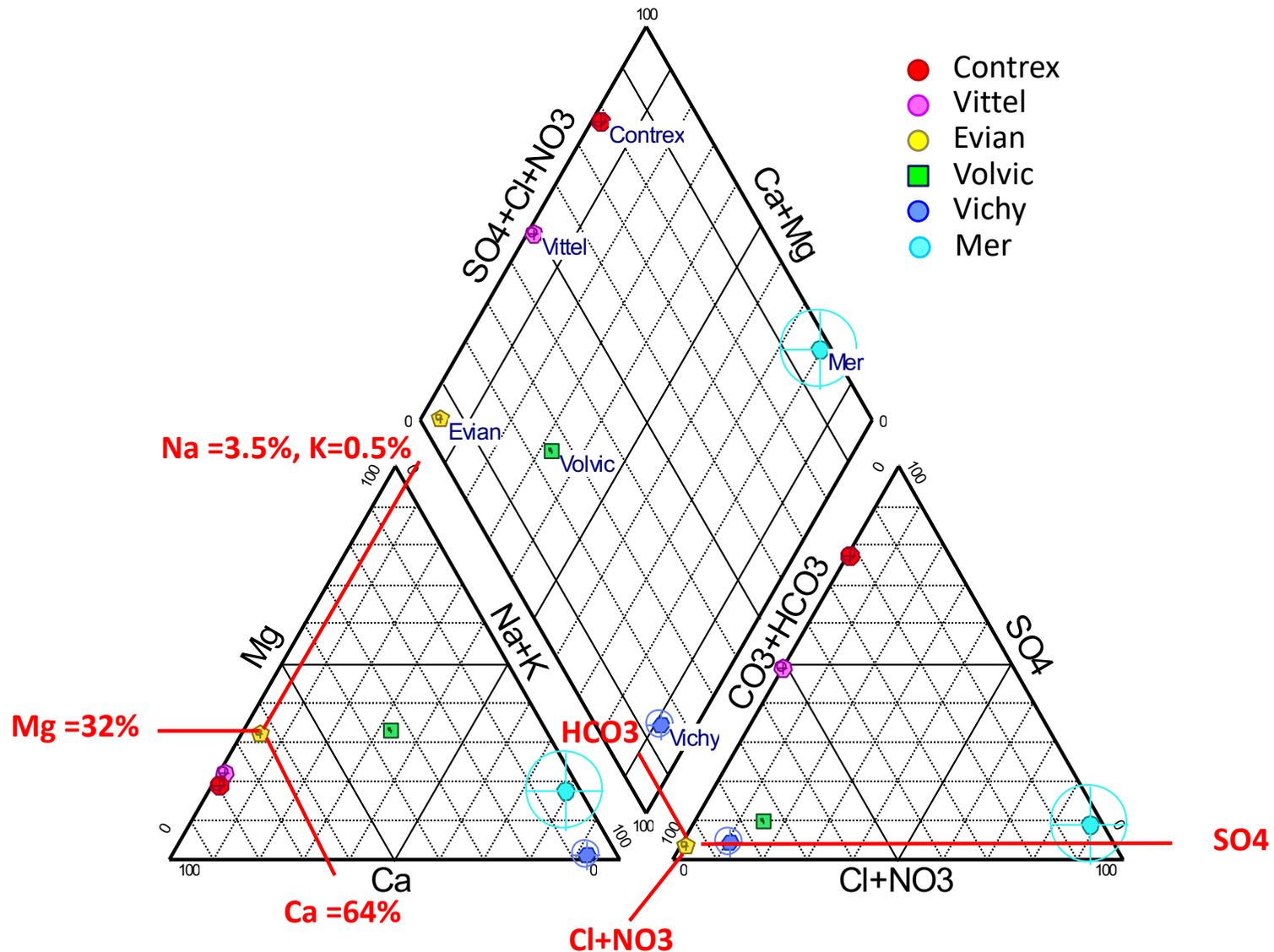
► Nature des roches encaissantes et composition chimique des eaux souterraines

Catégories de roches	Type de roches	Minéralisation (ordres de grandeurs littérature + mesures in situ, <b>à prendre de façon indicative</b> )	Composition chimique d'après (Mazor, 1997)
Détritiques	Grés/Sables	Relativement faible (50 à 500 mg/l; < 500 µS/cm)	Si, HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / Na <sup>+</sup>
	Argiles	Forte (> 1500 mg/l; > 1500 µS/cm)	Si, Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / Na <sup>+</sup>
Carbonatées	Calcaires	Moyenne (400 à 1000 mg/l; 300 à 600 µS/cm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / Ca <sup>2+</sup>
	Dolomies		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / Ca <sup>2+</sup> et Mg <sup>2+</sup>
	Marnes	Assez forte (> 1000 mg/l; > 700 µS/cm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / Na <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup>
Silicatées	Granites	Très faible (< 150 mg/l; < 200 µS/cm)	Si, Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / Ca <sup>2+</sup> (et Na <sup>+</sup> )
	Schistes	Faible (< 250 mg/l; < 300 µS/cm)	Si, HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / Ca <sup>2+</sup> (et Na <sup>+</sup> )
	Basaltes	Faible (< 250 mg/l; < 300 µS/cm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / Na <sup>+</sup> (et Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> )
Evaporites	Gypses	Très forte (plusieurs g/l; plusieurs ms/cm)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / Ca <sup>2+</sup>
	Halite	Très forte (plusieurs g/l; plusieurs ms/cm)	Cl <sup>-</sup> / Na <sup>+</sup>

⇒ **La nature géologique des aquifères détermine la composition chimique des eaux souterraines**

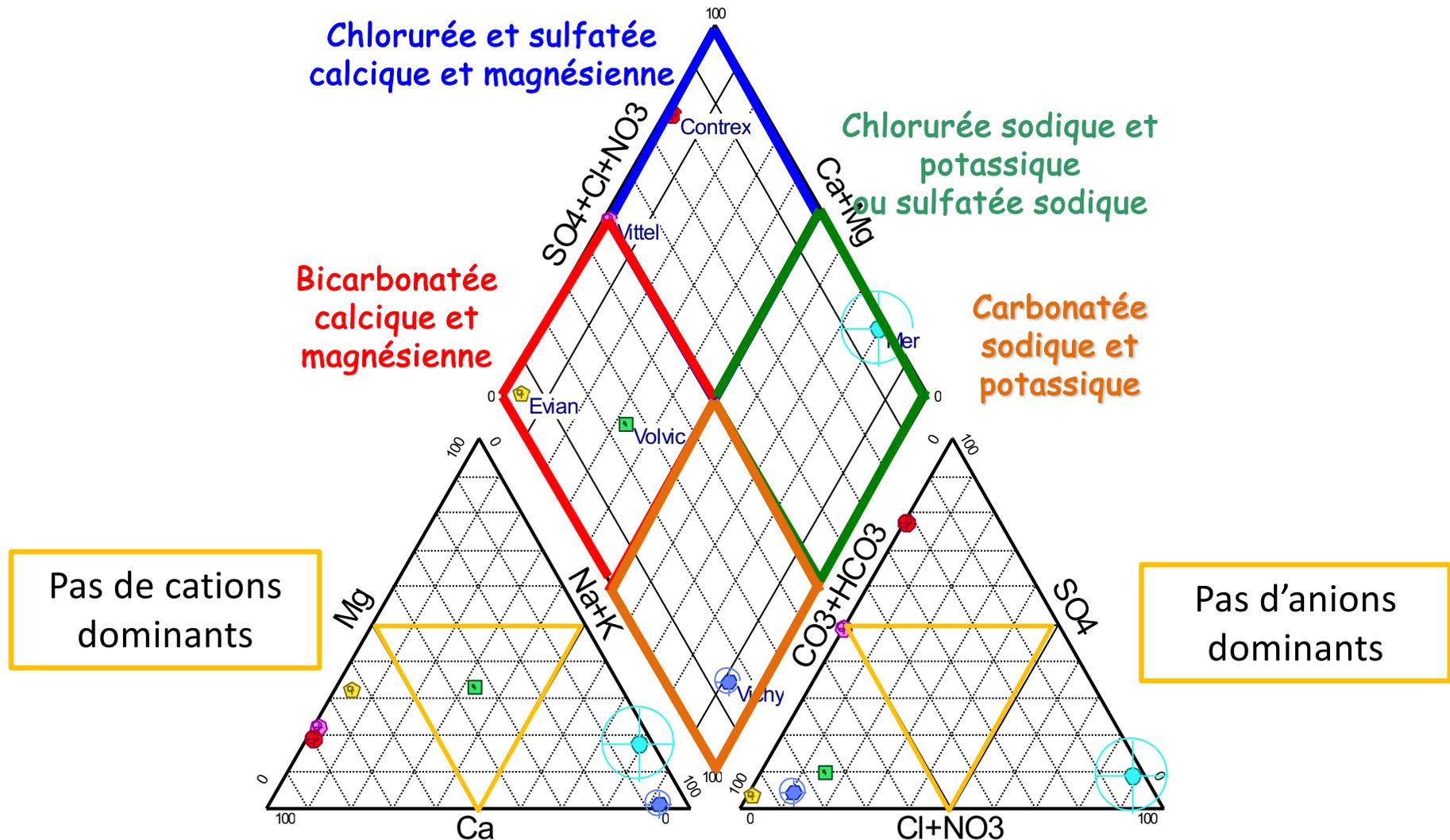
❑ **Facteurs influençant la composition chimique de l'eau**

▶ **Le facies chimique - Diagramme de Piper**



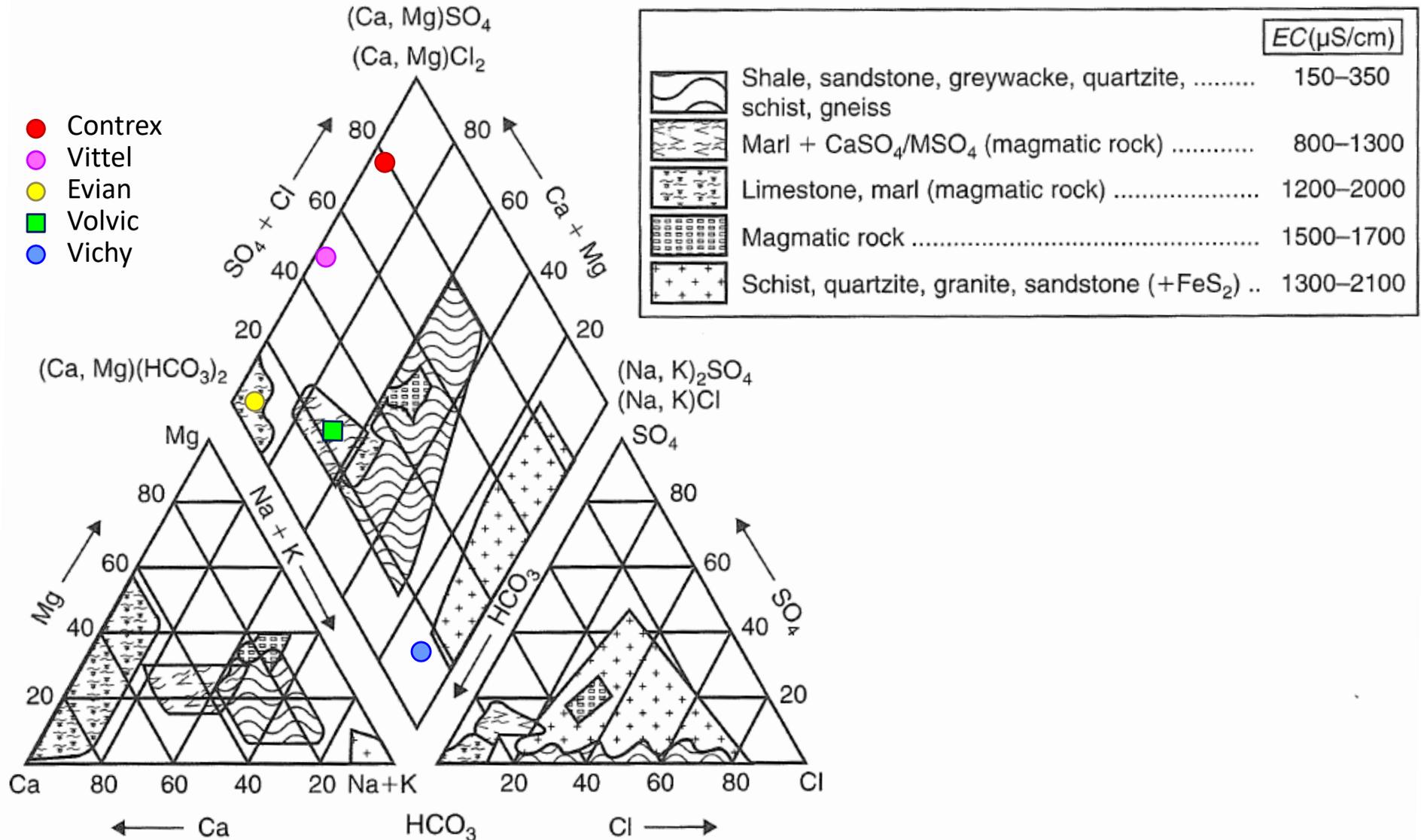
❑ Facteurs influençant la composition chimique de l'eau

▶ Le facies chimique - Diagramme de Piper



❑ **Facteurs influençant la composition chimique de l'eau**

▶ **Le facies chimique - Diagramme de Piper**

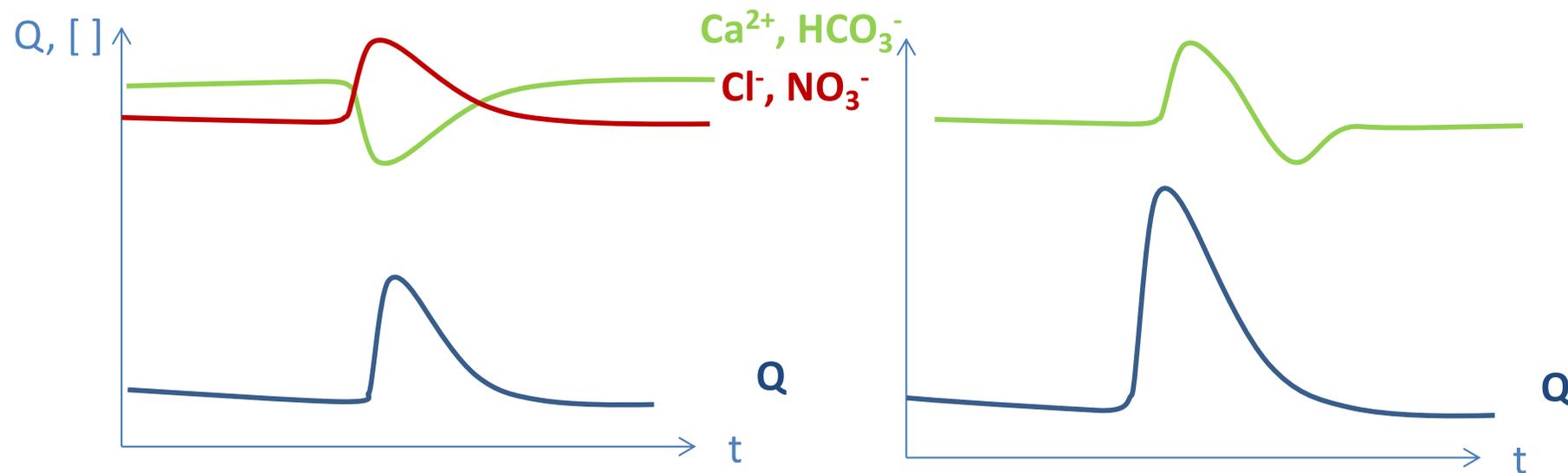


### □ Facteurs influençant la composition chimique de l'eau

- ▶ Fonction du type de roche
- ▶ Fonction du temps de contact

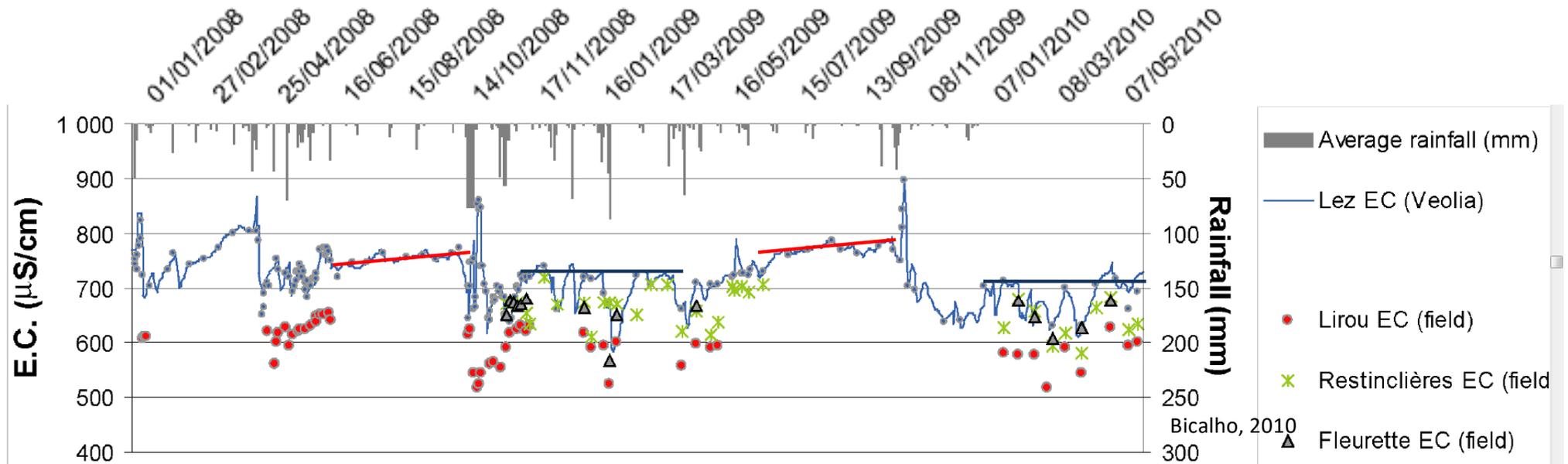
Evolution temporelle du chimisme d'une source:

2 type de réponses:



## □ Facteurs influençant la composition chimique de l'eau

► Evolution du chimisme avec l'hydrodynamique: Exemple de la source du Lez



□ **Facteurs influençant la composition chimique de l'eau**

- ▶ Fonction du type de roche
- ▶ Fonction du temps de contact

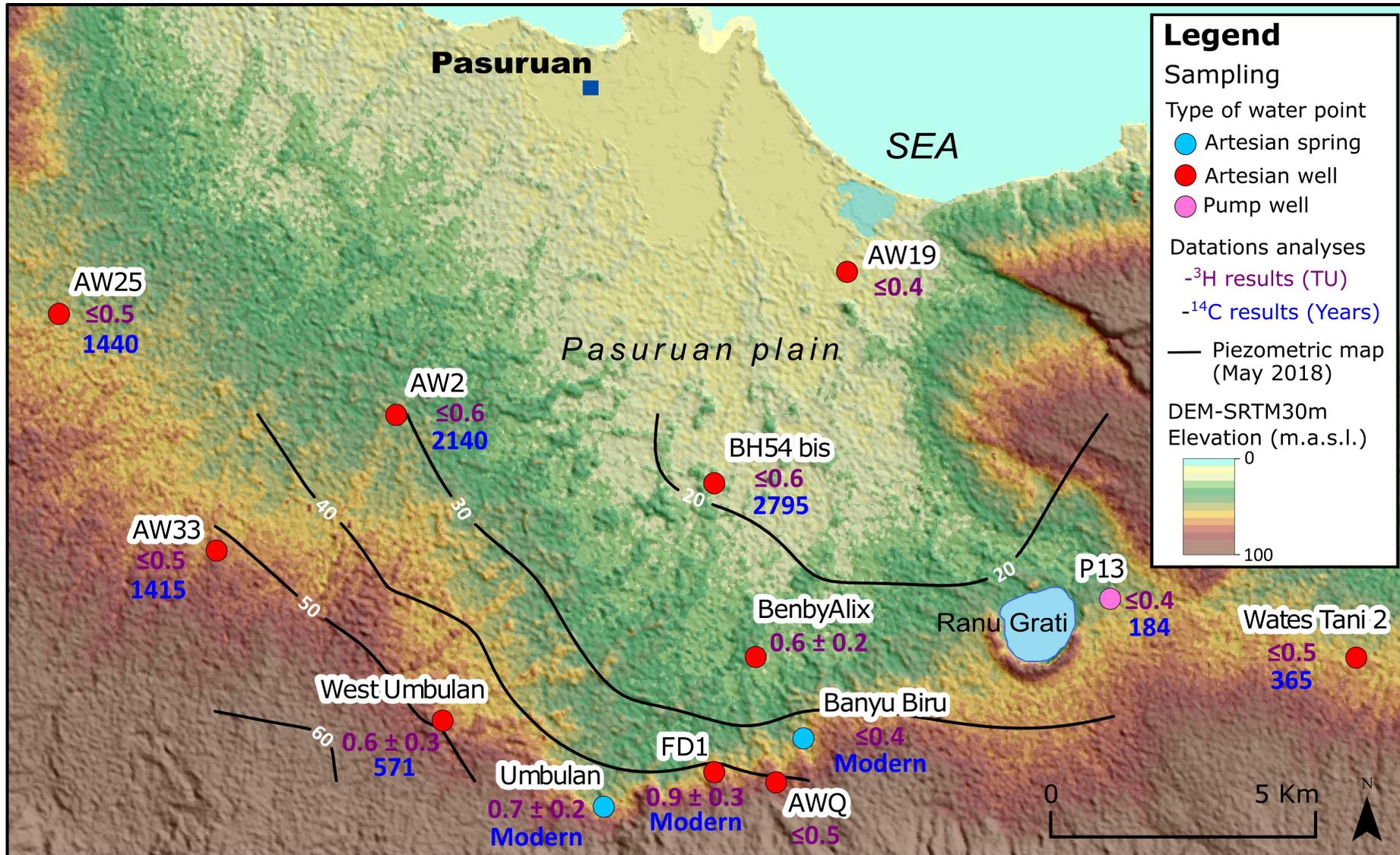
Principales méthodes d'estimation du temps de séjour des eaux souterraines:

- ▶ Evaluation indirecte
  - Modélisation hydrodynamique
  - Analyse hydrochimique
- ▶ **Evaluation directe** : « Datation » par des traceurs des temps de séjour
  - Isotopique: Tritium,  $^{14}\text{C}$
  - Gazeux: Gaz anthropique (CFC/SF<sub>6</sub>),  $^3\text{H}/\text{He}$

❑ **Facteurs influençant la composition chimique de l'eau**

► Fonction du temps de contact

Estimation du temps moyen de séjour par le <sup>14</sup>C *Traceurs isotopiques*



# HYDROGEOLOGIE GENERALE

## HLST 304



Piezomètre dans le glissement de Super-Sauze, Haute-Provence



Sources d'Ichetucknee, Floride

Site expérimental de Kerrien, Bretagne



## II. Méthode d'étude du fonctionnement des aquifères

CM5. Cartographie hydrogéologique

CM6. Forage et essai par pompage

CM7. Caractérisation hydrochimique de l'eau de l'aquifères

### CM8. Protection des eaux souterraines

*Comment faire pour ne pas en manquer et qu'elle reste bonne ?*

#### 1. Estimation des réserves en eau souterraine

1.1. Réserves et ressources

1.2. Bilan hydrogéologique

#### 2. Périmètres de protection et cartes de vulnérabilité

2.1. Vulnérabilité des eaux souterraines

2.2. Les différents périmètres

2.3. Cartographie de la vulnérabilité

**A la fin de ce cours, vous devez être capable de....**

- Citer les différents types de conditions aux limites et les identifier sur une carte hydrogéologique

- Citer les différents types de périmètres de protection

- Définir la notion de vulnérabilité

## **I. Estimation des réserves en eau souterraine**

### **1. Réserves et ressources**

► Réserves: quantité d'eau gravitaire stockée au cours d'une durée moyenne, dans une tranche d'aquifère délimitée

Expression : volume

Dépend de la fonction capacitive du réservoir

- Réserve totale
- Réserve permanente
- Réserve régulatrice

## I. Estimation des réserves en eau souterraine

### 1. Réserves et ressources

▶ Réserves: quantité d'eau gravitaire stockée au cours d'une durée moyenne, dans une tranche d'aquifère délimitée

Expression : volume

Dépend de la fonction capacitive du réservoir

- Réserve totale
- Réserve permanente
- Réserve régulatrice

▶ Ressources: quantité d'eau pouvant être exploitée

Expression : Débit moyen

Dépend :

- des caractéristiques hydrodynamiques et hydrochimiques du réservoir
- des contraintes techniques et socio-économiques

▶ Contraintes physiques et techniques

▶ Contraintes Socio-économiques

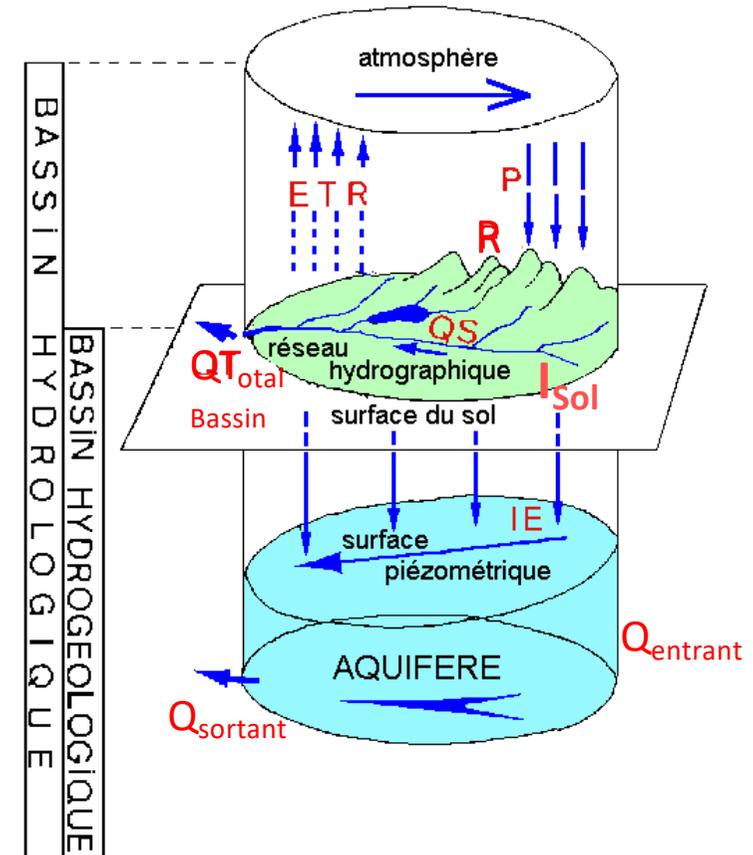
# I. Estimation des réserves en eau souterraine

## 2. Bilan de la nappe:

$$\Delta \text{ stock} = \sum \text{Entrée} - \sum \text{Sortie}$$

$$\Delta S = P - ETR - R - I_{\text{sol}} + Q_{\text{entrant}} - Q_{\text{sortant}}$$

- ▶ Entrée:
  - Infiltration efficace
  - Perte de surface
  
- ▶ Sortie:
  - Exutoires naturels
  - Exutoires artificiels



débit des apports (m3/s)	débit des écoulements (m3/s)
infiltration efficace.....1,5	pertes souterraines (vers la mer)..1
infiltration des irrigations.....5,5	émergences et drains.....6
apports des aquifères voisins..1	prélèvements.....1
TOTAL.....8	TOTAL.....8

Bilan annuel moyen de l'aquifère à nappe libre des alluvions de la Crau, superficie 520 km<sup>2</sup> (d'après Bodelle et Margat).

## 2. Bilan de la nappe:

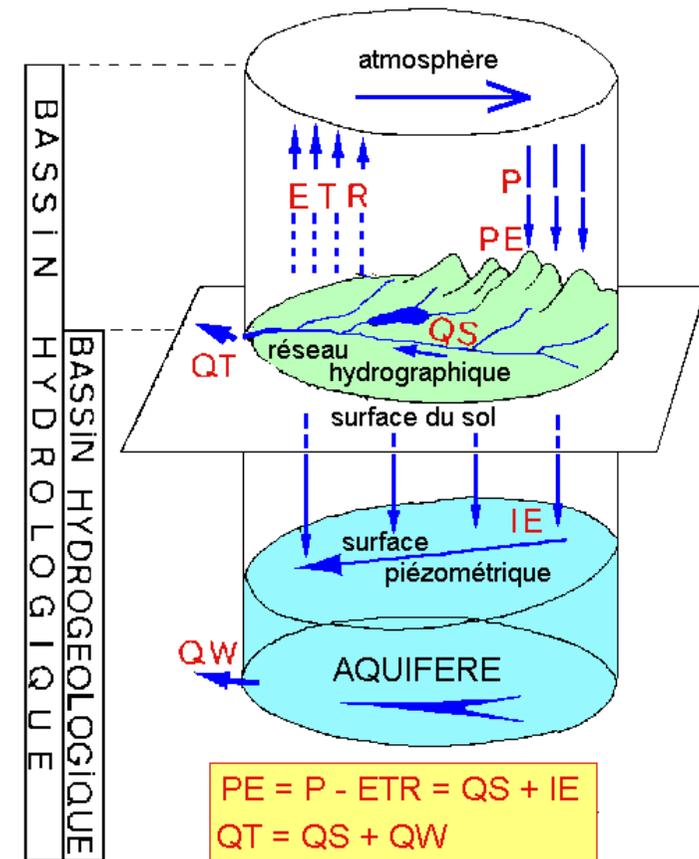
$$\Delta \text{ stock} = \sum \text{Entrée} - \sum \text{Sortie}$$

$$\Delta S = P - ETR - R - I + Q_{\text{entrant}} - Q_{\text{sortant}}$$

- ▶ Entrée:
  - Infiltration efficace
  - Perte de surface
- ▶ Sortie:
  - Exutoires naturels
  - Exutoires artificiels

*Echelle d'espace et de temps?*

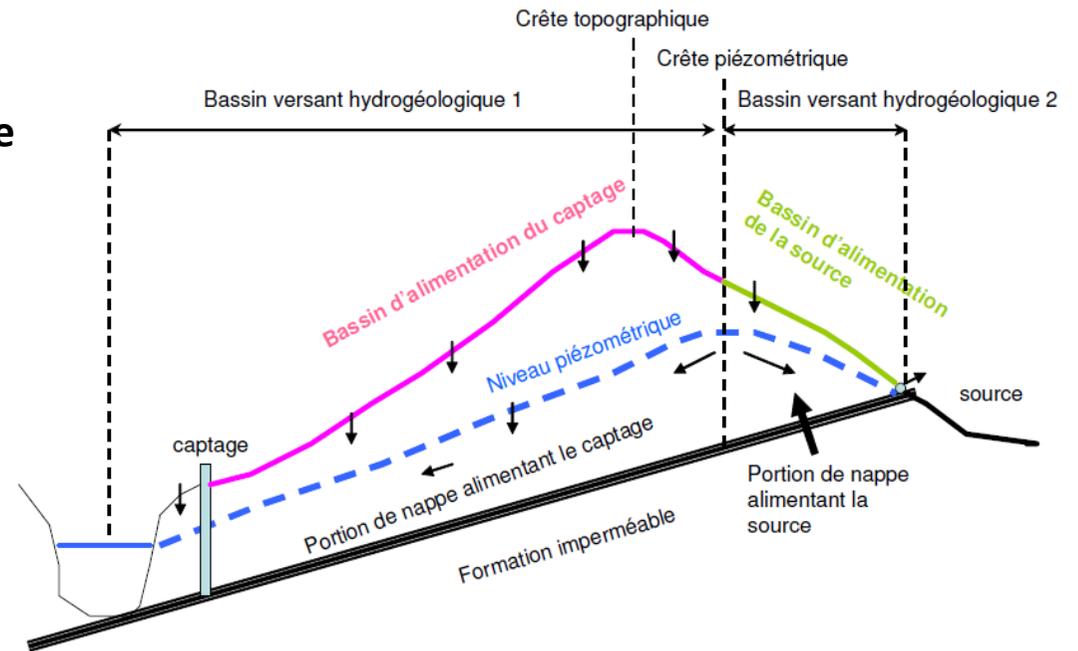
- ▶ Echelle d'espace des bilans hydrologiques
  - Nécessite de connaître les limites du bassin versant hydrogéologique
  - Nécessite de connaître les conditions régnants à ces limites
- ▶ Echelle de temps



## 2. Bilan de la nappe:

### 1) Echelle d'espace:

- **BV hydrologique/hydrogéologique**



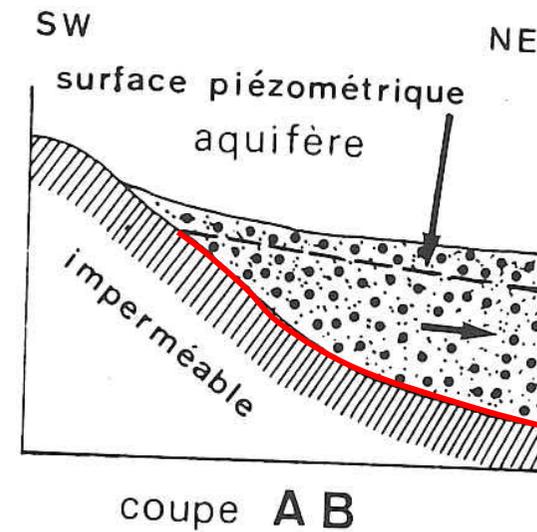
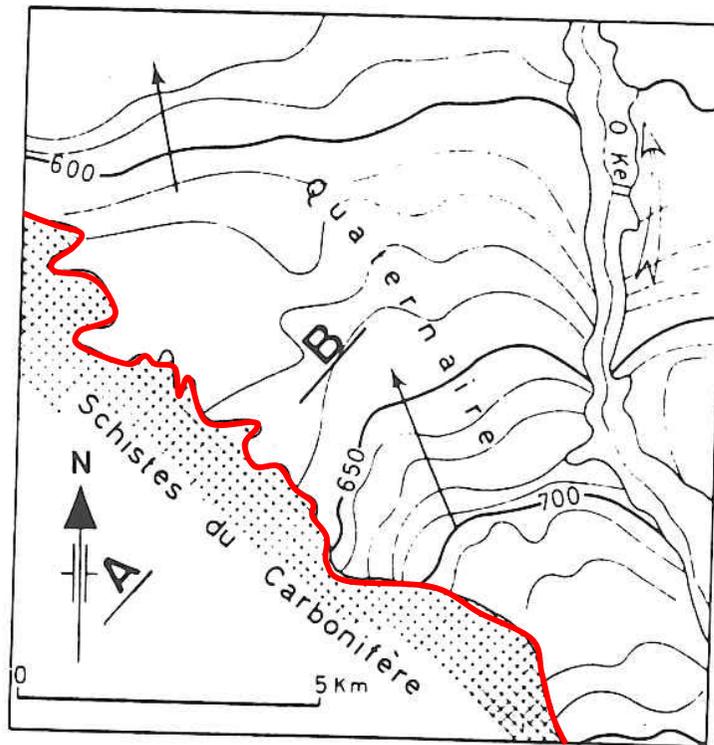
## 2. Bilan de la nappe

### 1) Echelle d'espace:

- Conditions aux limites du BV hydrogéologique

→ **Limites à flux nul ou étanches :**

limites géologiques, position fixe



limite à flux nul = limite étanche

## 2. Bilan de la nappe

### 1) Echelle d'espace:

- **Conditions aux limites du BV hydrogéologique**

- **Limites à flux nul ou étanches :**

- limites géologiques, position fixe

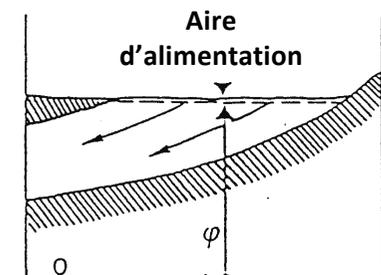
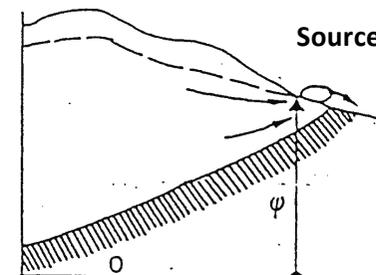
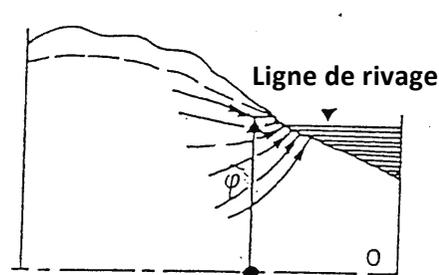
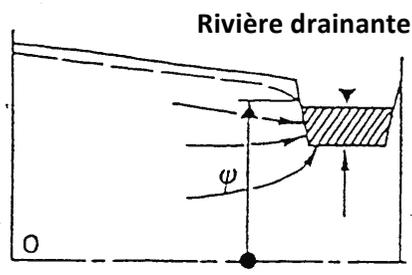
- **Limites hydrodynamiques**

- position variable dans le temps :

- **limites à potentiel imposé ou conditions de potentiel**

- ⇒ Contact d'une nappe avec un plan d'eau libre

Au niveau du contact, le potentiel (charge hydraulique) est constant et imposé par la cote de l'eau de surface.



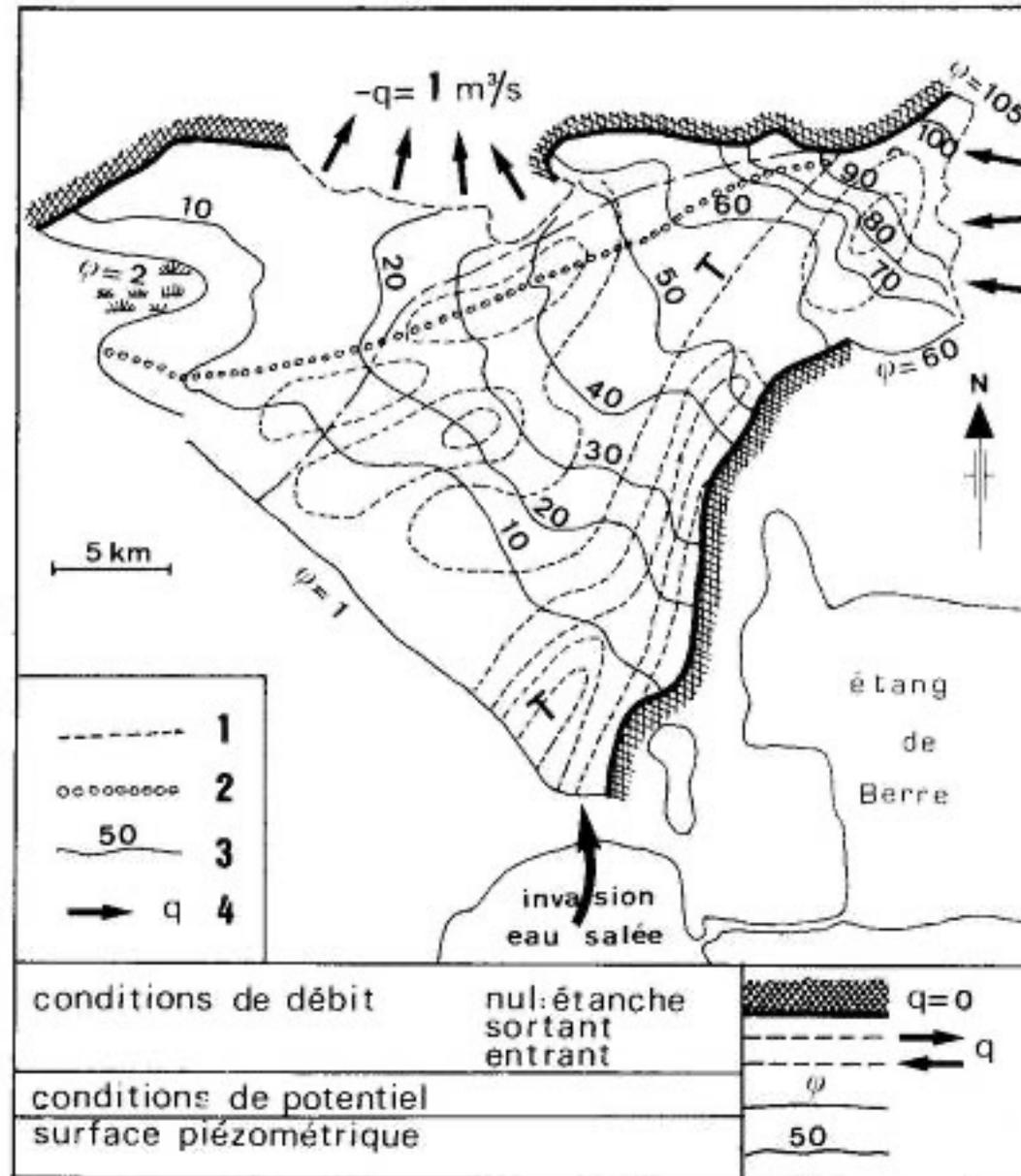
LIMITES A POTENTIEL IMPOSE

## 2. Bilan de la nappe

### 1) Echelle d'espace:

- Conditions aux limites du BV

Application : Nappe de Crau



- 1- courbe d'isotransmissivité
- 2- ligne de partage des eaux souterraines
- 3- lignes piézométriques

## 2. Bilan de la nappe

### 1) Echelle d'espace:

- **Conditions aux limites du BV hydrogéologique**

→ **Limites à flux nul ou étanches :**

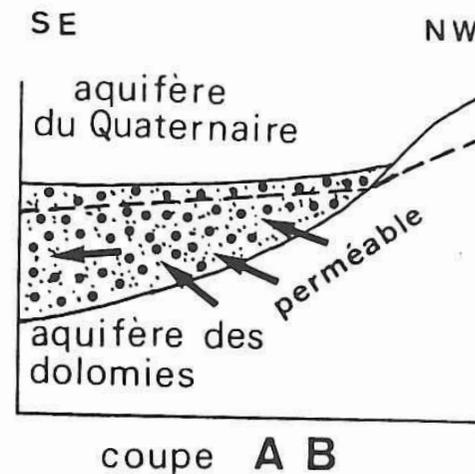
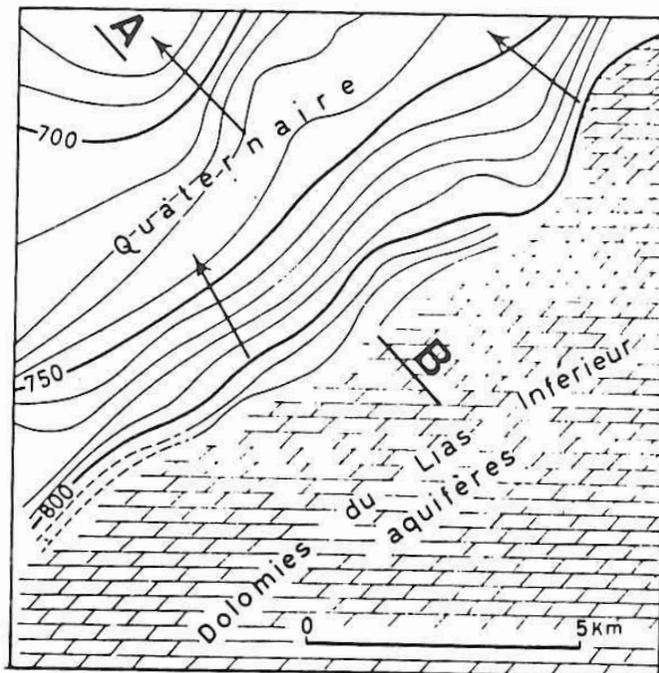
limites géologiques, position fixe

→ **Limites hydrodynamiques**

position variable dans le temps :

- **limites à potentiel imposé ou conditions de potentiel**

- **limites à flux imposé ou à condition de débit (Q nuls, entrants ou sortants),**



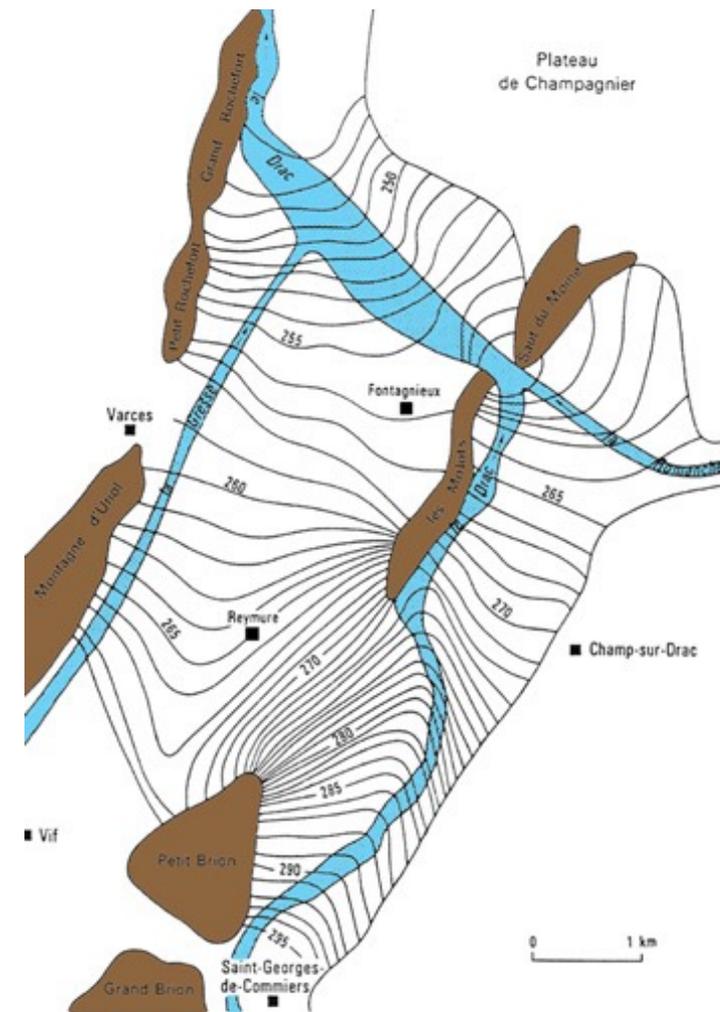
limite à flux imposé entrant = limite d'affluence

## 2. Bilan de la nappe

### 1) Echelle d'espace:

- Conditions aux limites du BV hydrogéologique

👉 Application : Nappe du Drac

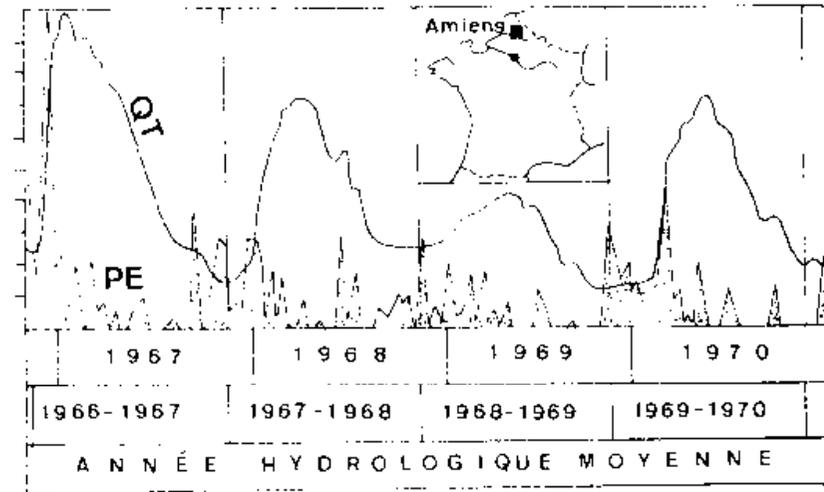


Carte piézométrique de la nappe du Drac et de la Gresse.

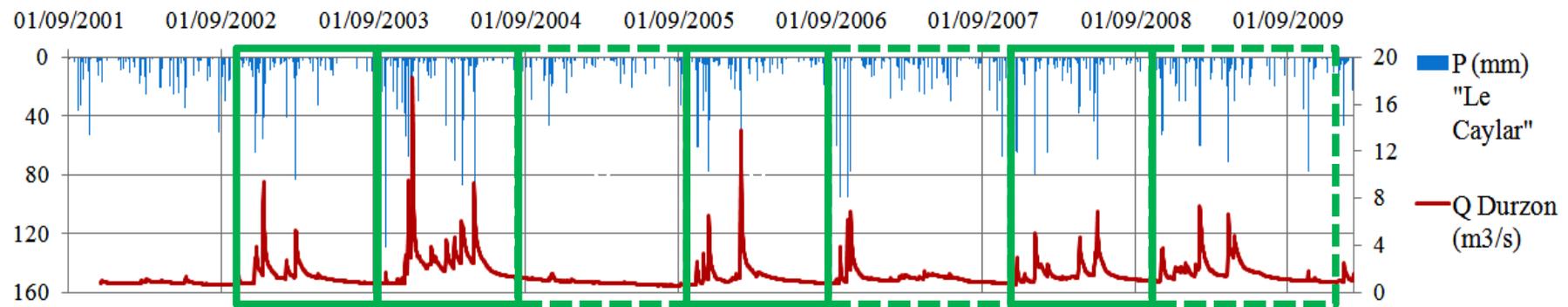
## 2. Bilan de la nappe

### 1) Echelle d'espace

### 2) Echelle de temps



Exemple de séries chronologiques de PE et Q (bassin de l'Hallue)



Exemple de séries chronologiques de P (mm) et Q (m3/s) (système du Durzon, Larzac)

## II. Protection des eaux souterraines

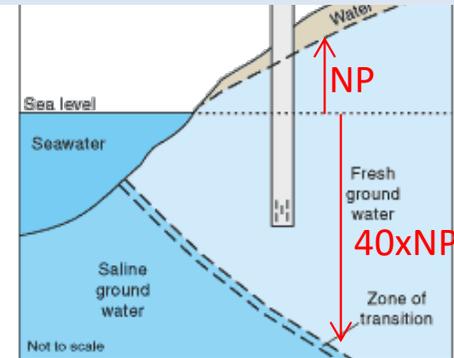
### 1. Origine des contaminants des eaux souterraines

#### ► Naturelle

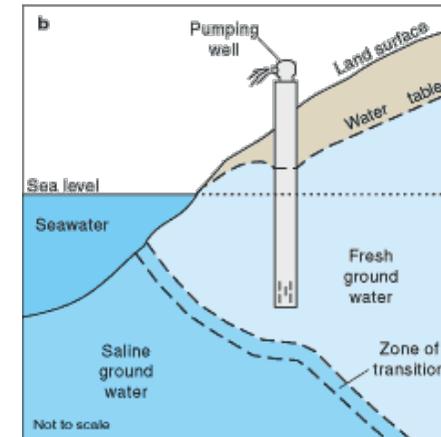
- Dissolution d'évaporites (plusieurs g/l de  $\text{SO}_4^{2-}$ )
- Mise en solution de métaux indésirables en milieu réducteur
- Intrusion marine

Principe de Ghyben-Herzberg : interface nette

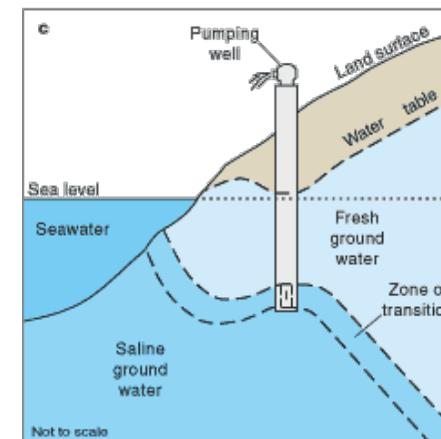
⇒ Profondeur de l'interface = 40 x NP



Nonpumping well in an unconfined (water-table) aquifer under conditions of equilibrium—no intrusion has occurred.



Well pumping from an unconfined (water-table) aquifer—seawater intrusion not affecting salinity of pumped water.



## 1. Origine des contaminants des eaux souterraines

### ► Anthropique

- Domestique/Urbaire/Industrielle/agricole
- Ponctuelle/Diffuse

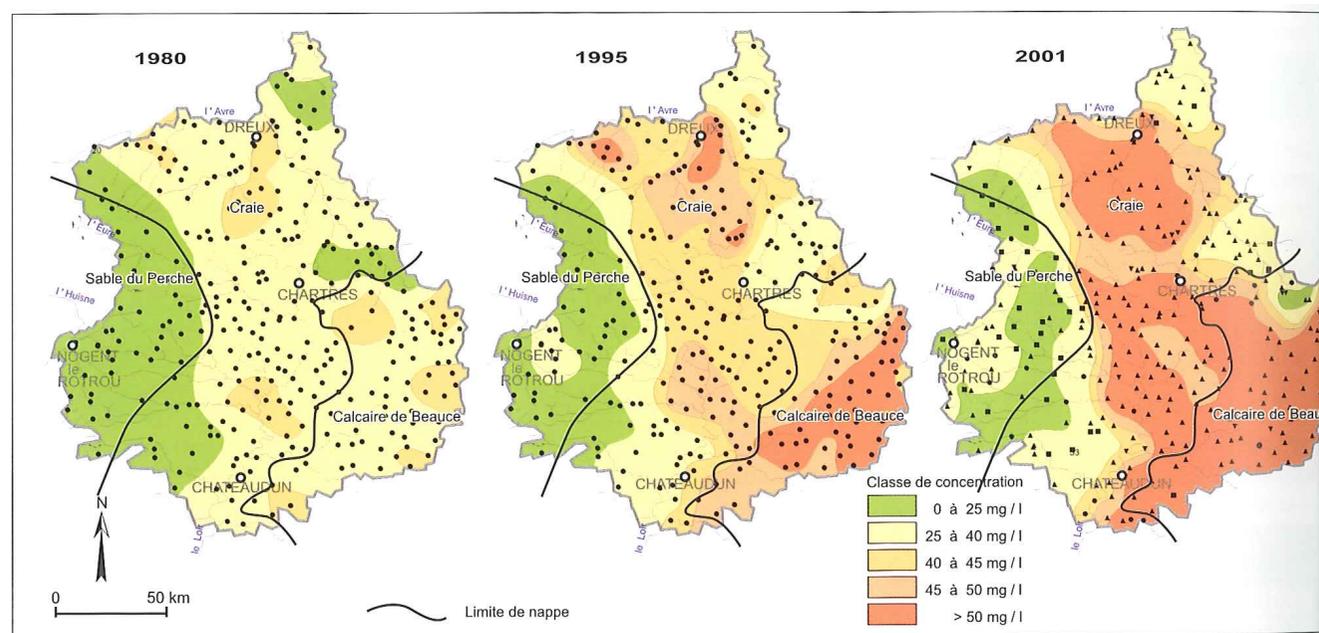
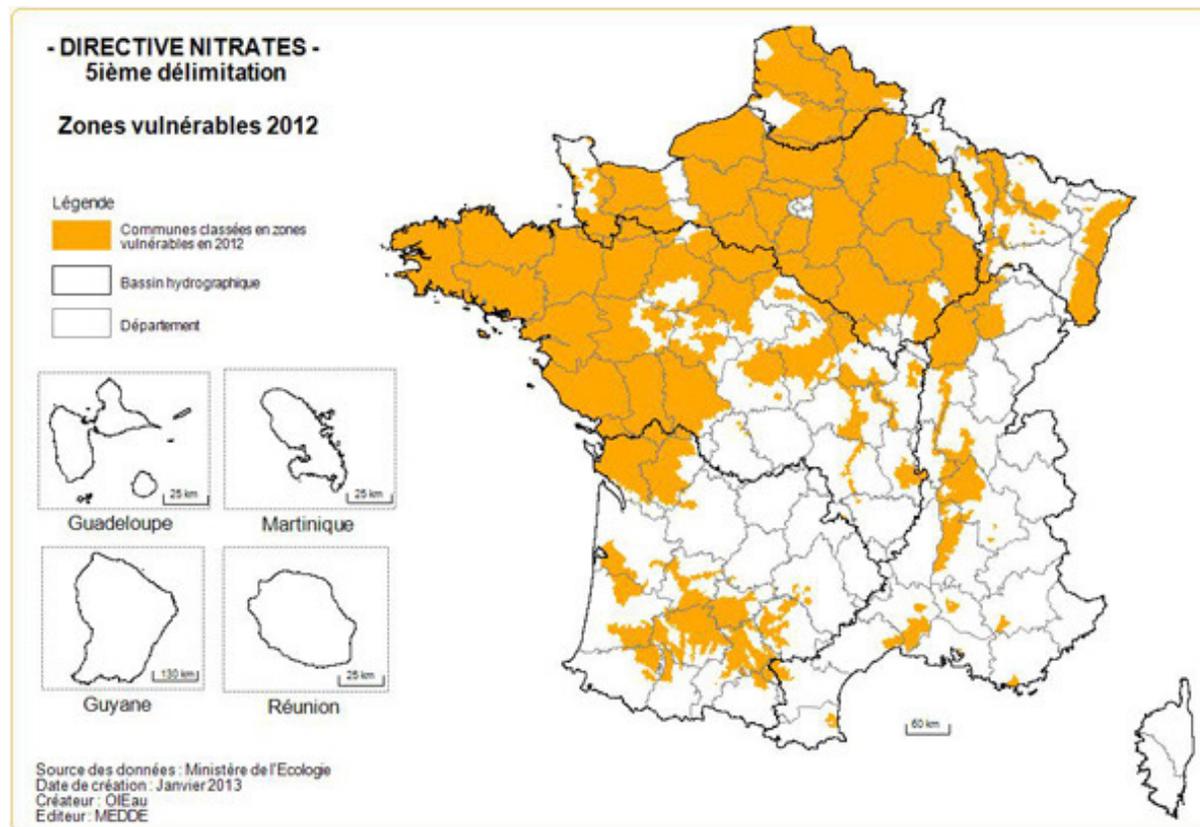


Fig. 2  
Evolution de la concentration en nitrates dans les nappes libres du département d'Eure-et-Loir, années 1980, 1995 et 2001 (CG 2001)  
Cartes établies d'après les teneurs moyennes issues du contrôle réglementaire des eaux potables distribués

## 2. Périmètres de protection et cartes de vulnérabilité

### ► Vulnérabilité, aléa et risque

Risque = vulnérabilité  $\times$  aléa



## 2. Périmètres de protection et cartes de vulnérabilité

### ► La Règlementation

- 1964 : 1<sup>ère</sup> loi sur l'eau.
  - Obligation de déterminer ces périmètres pour les nouveaux captages.
- 1992 : Extension de la loi aux ouvrages existants avant 1964.
- 2004 : loi de la Santé Publique et PNSE
  - Redéfinissent le rôle des PPC
  - Moyen de lutte contre les pollutions ponctuelles. (objectif : 100% en 2010).

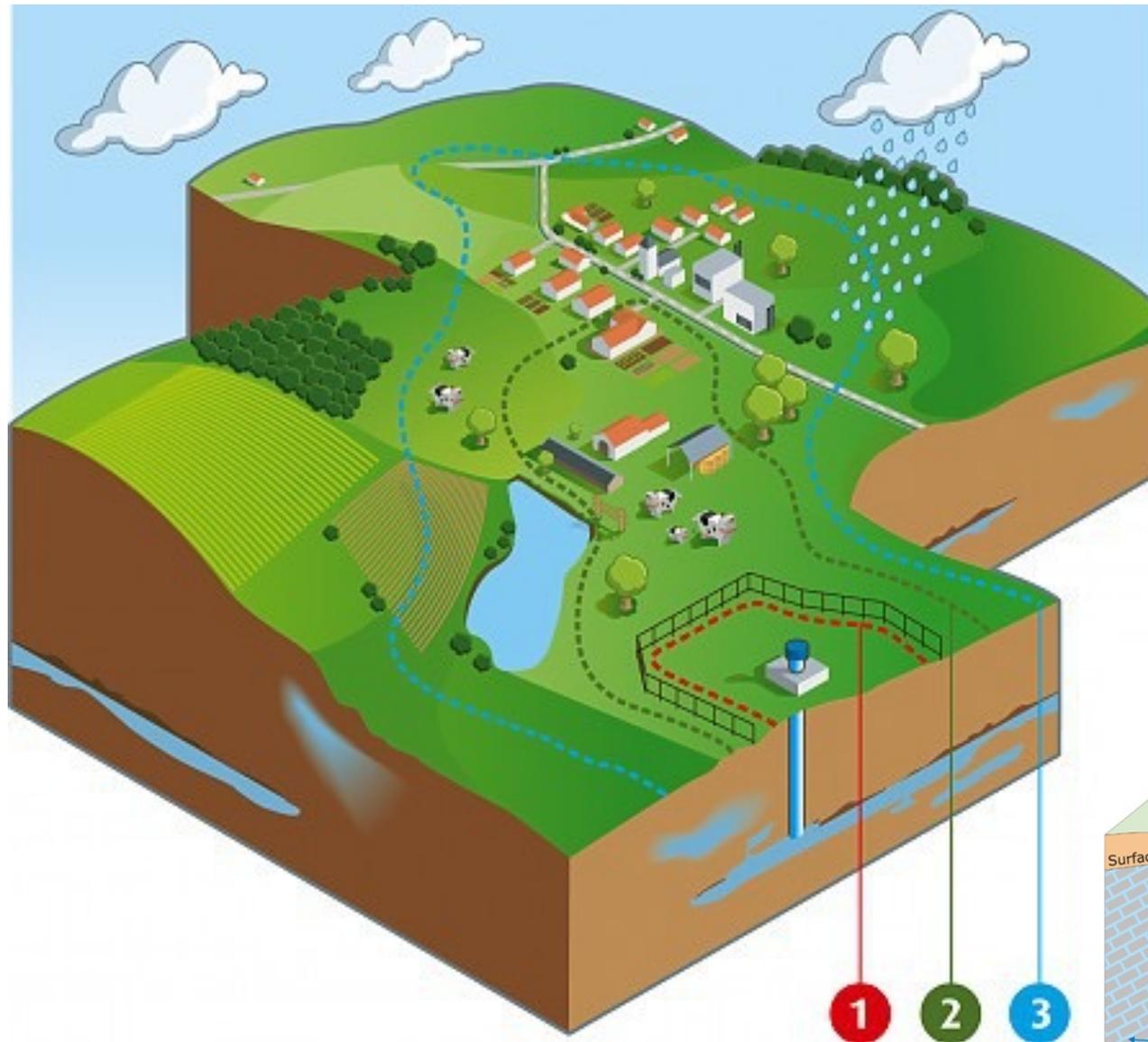
## 2. Périmètres de protection et cartes de vulnérabilité

### ► Les Acteurs

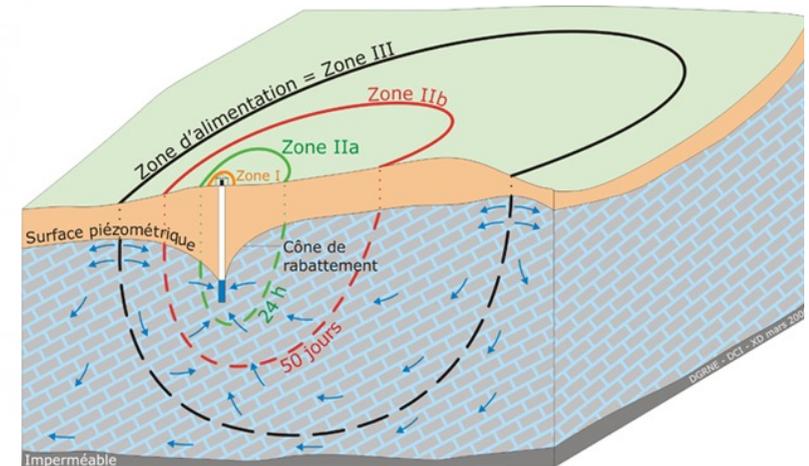
- Maître d'oeuvre
- Agence Régionale de Santé
- Préfecture → Hydrogéologue Agréé
- Bureau d'Etude

## 2. Périmètres de protection et cartes de vulnérabilité

### ► Les différents périmètres



- PPI :  
Immédiat.
- PPR :  
Rapproché.
- PPE : Eloigné.



## 2. Périmètres de protection et cartes de vulnérabilité

### ► Les différents périmètres

**Périmètre de protection immédiate (PPI)** : espace restreint obligatoire (quelques ares) destiné à la protection de l'ouvrage lui-même, dans lequel toute activité est interdite, à l'exception de l'exploitation de l'eau. Le périmètre immédiat et ses abords doivent être déboisés et tondus mécaniquement c'est-à-dire sans herbicides. Enfin le PPI doit être clôturé par un grillage infranchissable muni d'une porte fermant à clé.



## 2. Périmètres de protection et cartes de vulnérabilité

### ► Les différents périmètres

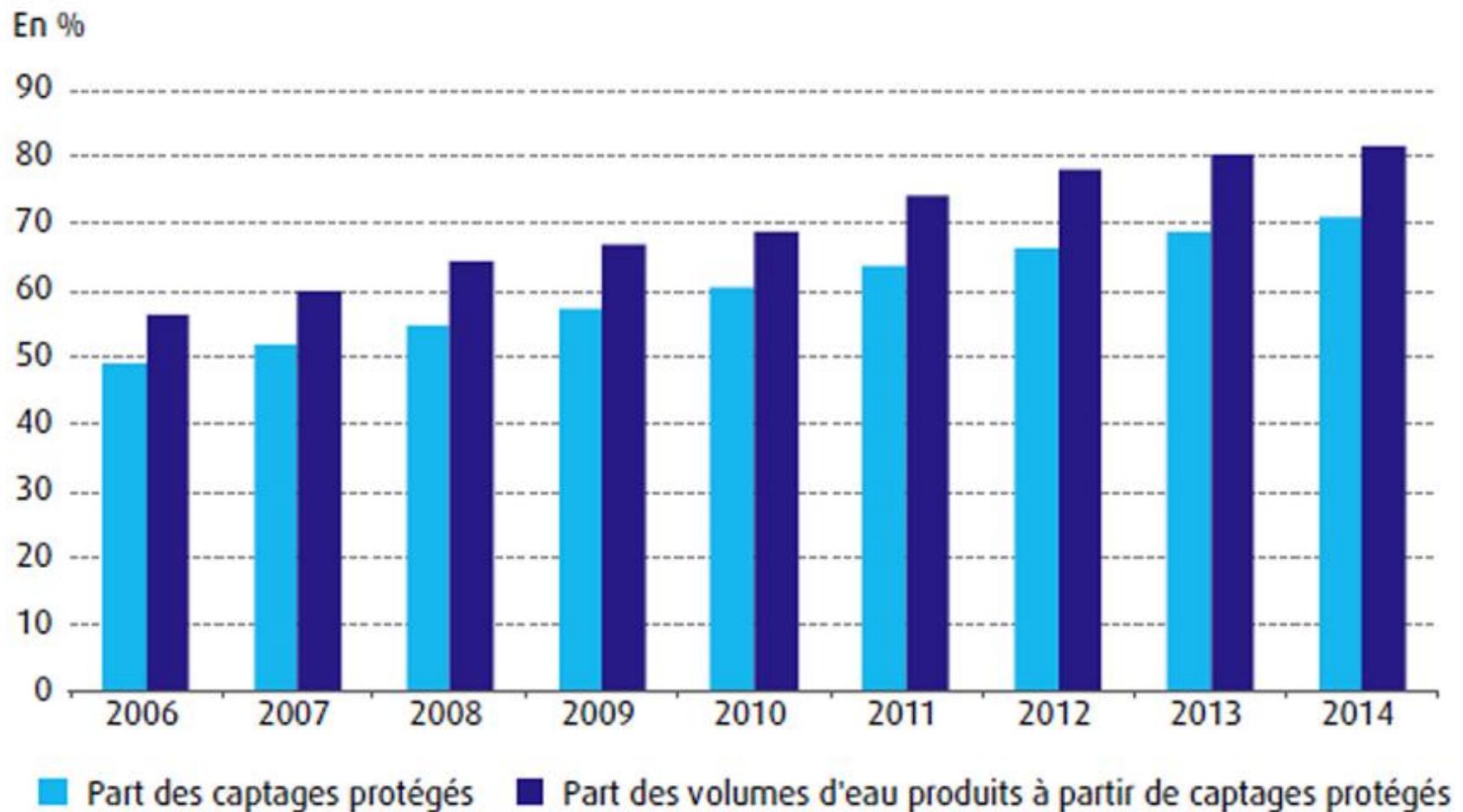
**Périmètre de protection immédiate (PPI)** : espace restreint obligatoire (quelques ares) destiné à la protection de l'ouvrage lui-même, dans lequel toute activité est interdite, à l'exception de l'exploitation de l'eau. Le périmètre immédiat et ses abords doivent être déboisés et tondus mécaniquement c'est-à-dire sans herbicides. Enfin le PPI doit être clôturé par un grillage infranchissable muni d'une porte fermant à clé.

**Périmètre de protection rapprochée (PPR)** : surface obligatoire de plus grande étendue (en général quelques hectares) qui prend en compte les caractéristiques de l'aquifère (géologie, volume), sa vulnérabilité et les débits d'exploitation. C'est une zone pour laquelle toutes activités susceptibles de provoquer une pollution sont interdites ou sont soumises à des prescriptions particulières (construction, rejets agricoles...).

**Périmètre de protection éloignée (PPE)** : cette dernière aire de protection est facultative et n'est créée que si certaines activités sont susceptibles d'être à l'origine de pollutions importantes. Ce secteur correspond généralement à une partie ou la totalité de la zone d'alimentation du point de captage.

## 2. Périmètres de protection et cartes de vulnérabilité

### ► Les problèmes !

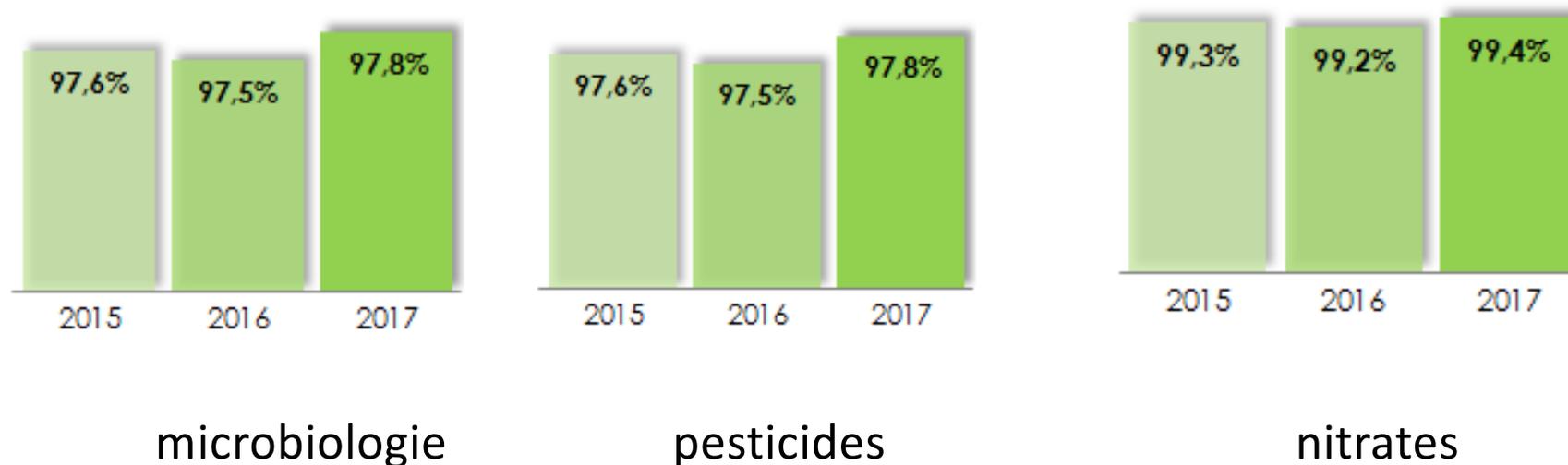


## 2. Périmètres de protection et cartes de vulnérabilité

### ► Qualité de l'eau du robinet en France

33200 captages

16700 stations de production d'eau potable

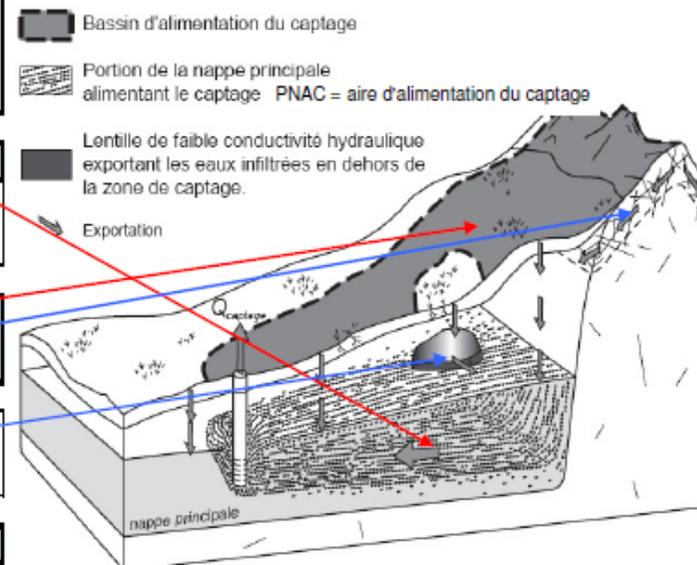
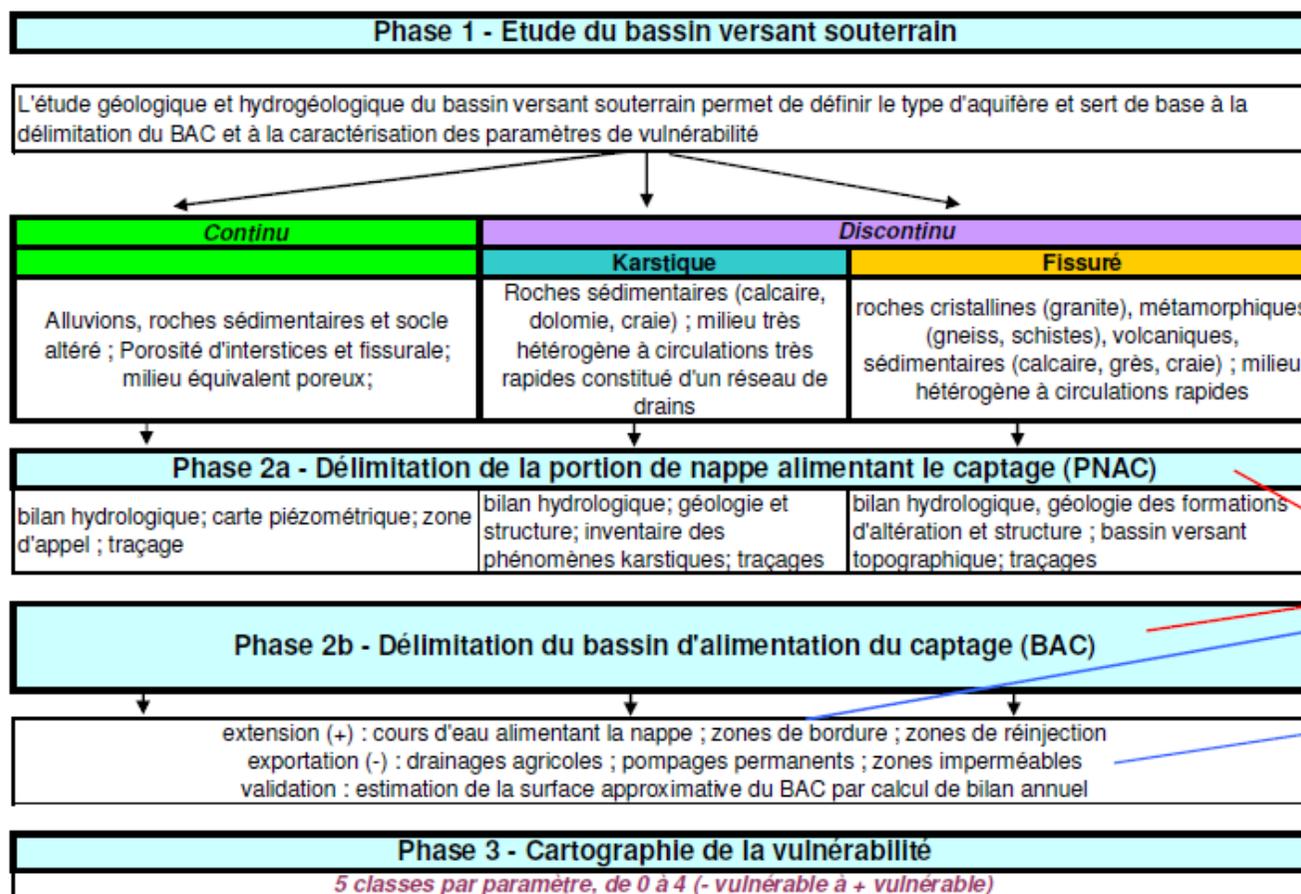


Population alimentée par de l'eau respectant en permanence les limites de qualité fixée par la réglementation

## 2. Périmètres de protection et cartes de vulnérabilité

### ► Cartographie de la vulnérabilité

#### Méthodologie:

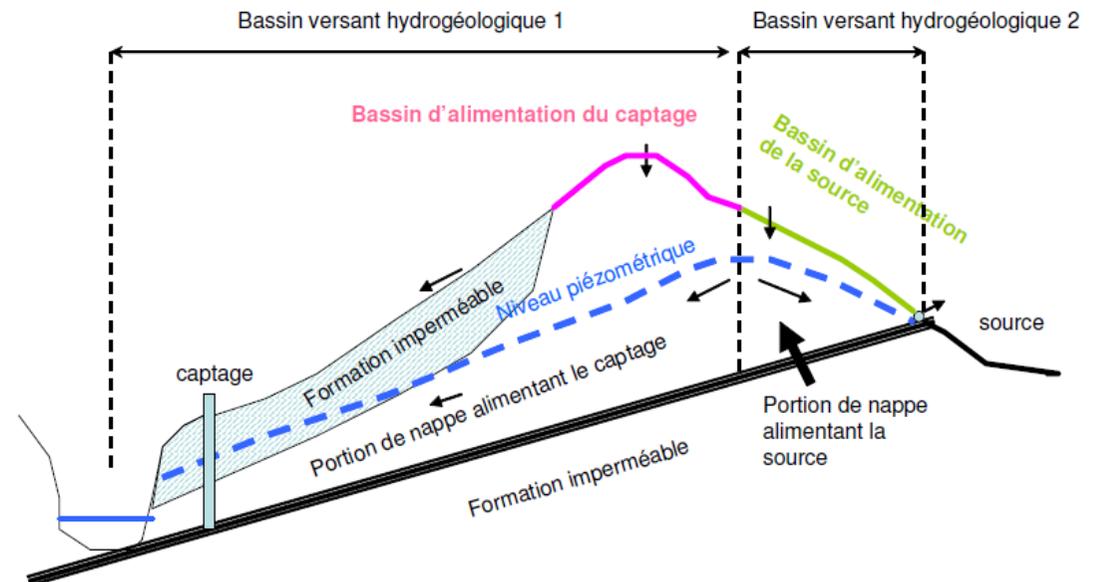
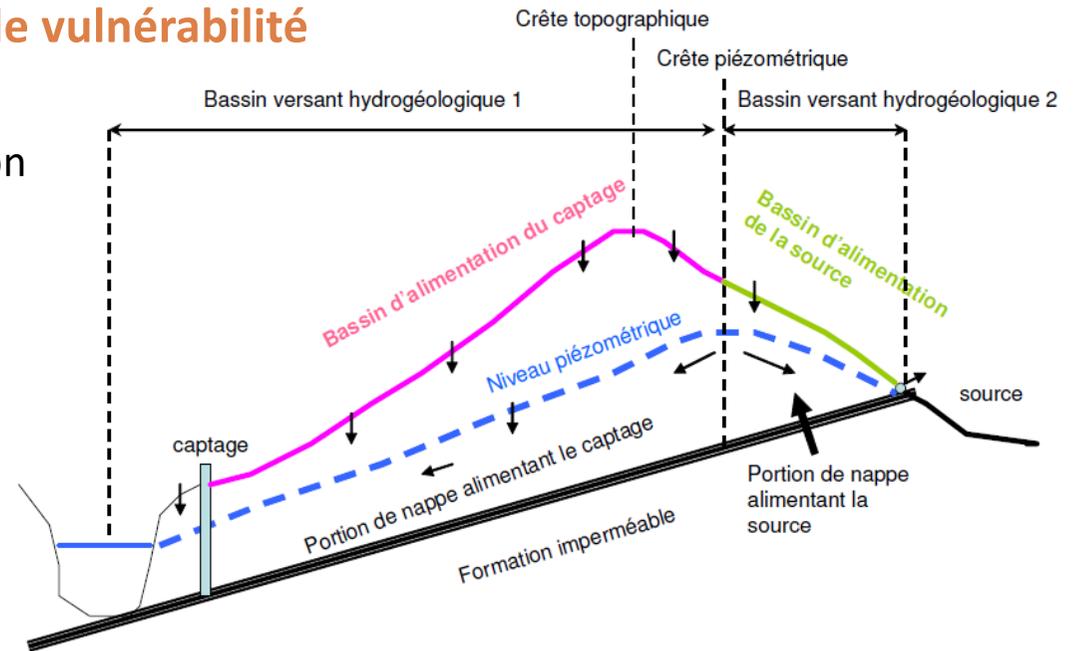


## 2. Périmètres de protection et cartes de vulnérabilité

### ► Cartographie de la vulnérabilité (Cf TP7)

#### a. Délimitation du Bassin d'alimentation du Captage

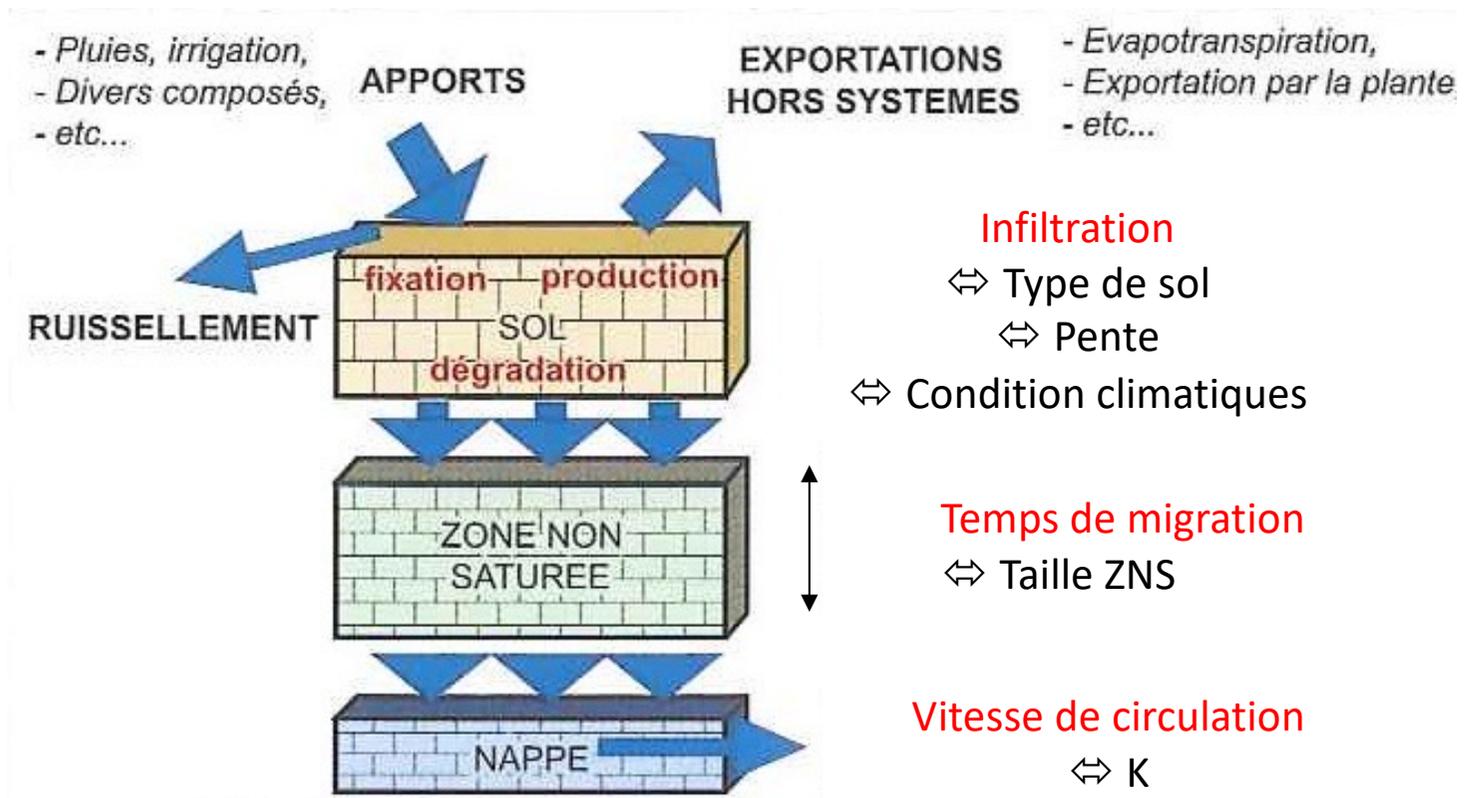
Identification de la zone en surface susceptible d'influer sur la qualité de l'eau du captage



## 2. Périmètres de protection et cartes de vulnérabilité

### ► Cartographie de la vulnérabilité (Cf TP7)

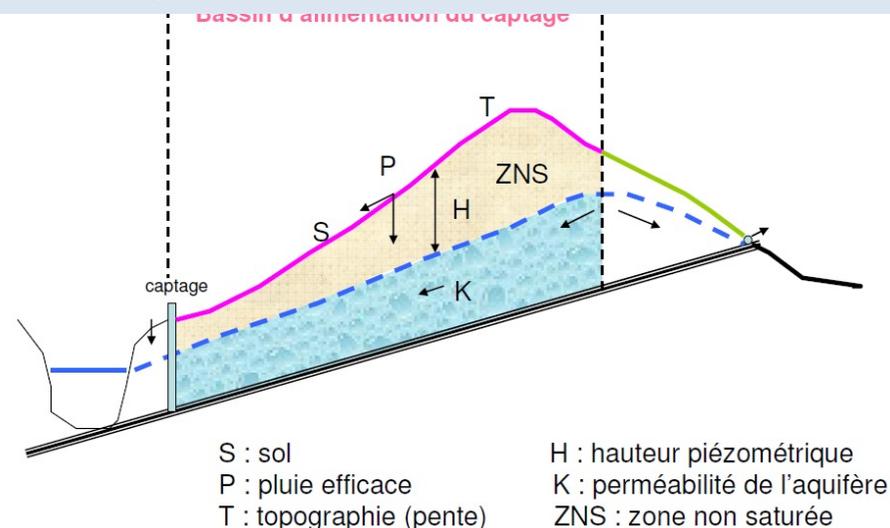
#### b. Caractérisation de la vulnérabilité



► Cartographie de la vulnérabilité

Ex: DRASTIC, RISK, EPIK

- Pluies
- Sol
- Infiltration efficace :
  - Calculée par le bilan hydrique:  $I_e = P - R - ETR$
  - Estimée a partir de l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux.
- Epaisseur ZNS
- Perméabilité



(Manuel et méthodes, n° 33, BRGM, 1999)

Valeur de l'indice	Pluies efficaces P (mm)	IDPR	Epaisseur ZNS H (m)	Perméabilité K (m/s)
4	> 300	0 - 400	< 2	$> 10^{-3}$
3	200 - 300	400 - 800	2 - 5	$10^{-4} - 10^{-3}$
2	100 - 200	800 - 1200	5 - 20	$10^{-5} - 10^{-4}$
1	50 - 100	1200 - 1600	20 - 50	$10^{-7} - 10^{-5}$
0	< 50	1600 - 2000	> 50	$< 10^{-7}$

► Cartographie de la vulnérabilité

**b. Cartographie de la vulnérabilité**

Paramètre	Abrév.	Poids (%)
Pluie efficace	P	10
Sol	S	25
Infiltration (IDPR ou autres paramètres)	I	30
Epaisseur ZNS	H	20
Perméabilité de l'aquifère	K	15
Total		100

$$\Rightarrow \text{Vulnérabilité} = 0,1P + 0,25S + 0,3I + 0,2H + 0,15K$$

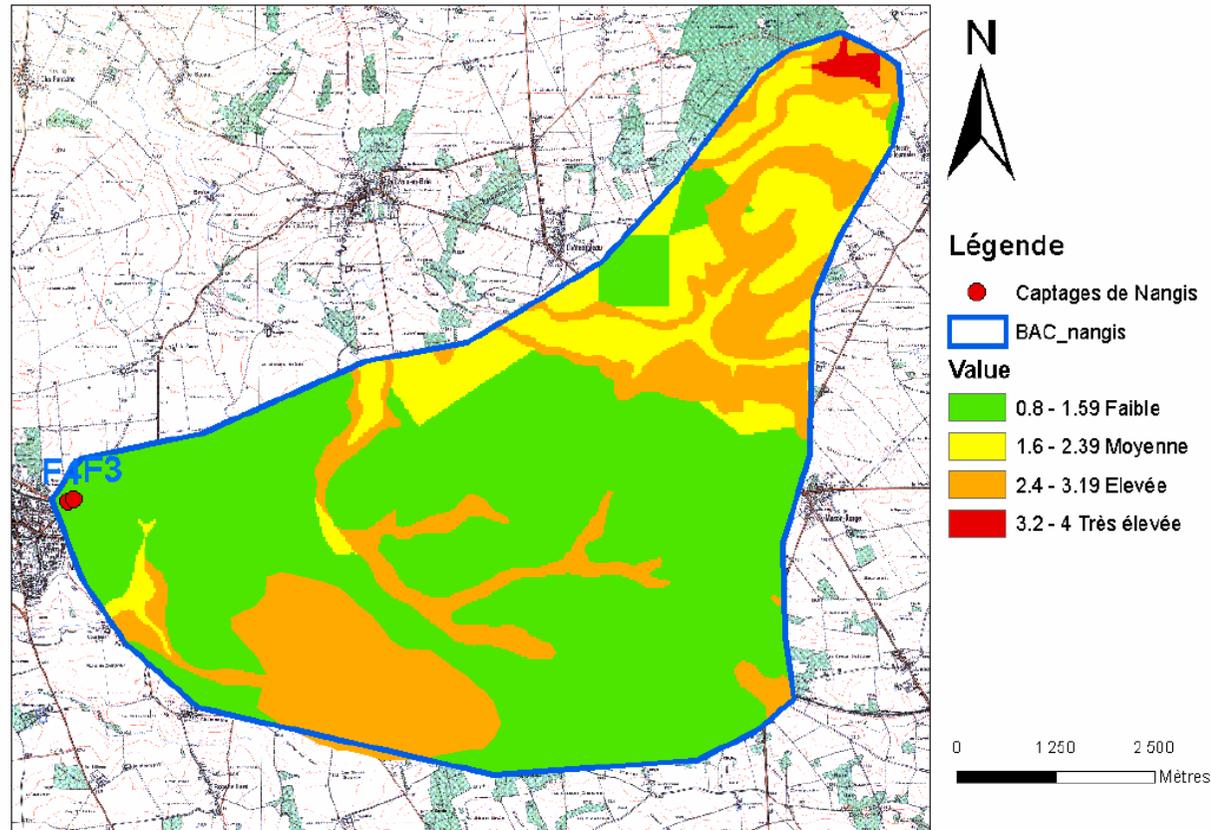
Valeurs indice	Classe	Vulnérabilité
3,2 – 4	4	Très élevée
2,4 – 3,19	3	Elevée
1,6 – 2,39	2	Modérée
0,8 – 1,59	1	Faible
0 – 0,79	0	Très faible

*Classes de vulnérabilité*

## ► Cartographie de la vulnérabilité

**b. Cartographie de la vulnérabilité**

Ex: carte de vulnérabilité de Nangis (Seine et Marnes)



(Manuel et méthodes, n° 33, BRGM, 1999)

# HYDROGEOLOGIE GENERALE

## HLST 304



Piezomètre dans le glissement de Super-Sauze, Haute-Provence



Sources d'Ichetucknee, Floride

Site expérimental de Kerrien, Bretagne



## II. Méthode d'étude du fonctionnement des aquifères

CM5. Cartographie hydrogéologique

CM6. Réalisation d'un forage et validation par essai de puit

CM7. Caractérisation de l'aquifère par essai de nappe

CM8. Caractérisation hydrochimique de l'eau de l'aquifères

CM9. Protection des eaux souterraines

### CM10. Spécificité du fonctionnement par type d'aquifère

Aquifères poreux/ Aquifères de socle /Aquifères karstiques

a. Localisation/répartition

b. Caractéristiques géologique set structurelles

c. Fonctionnement

d. Technique d'investigation particulière

e. Vulnérabilité

## Jeu de rôle autour de l'alimentation en eau de la commune d'Ispagnac

A la fin de ce cours, vous devez être capable de....

## Spécificité du fonctionnement par type d'aquifère

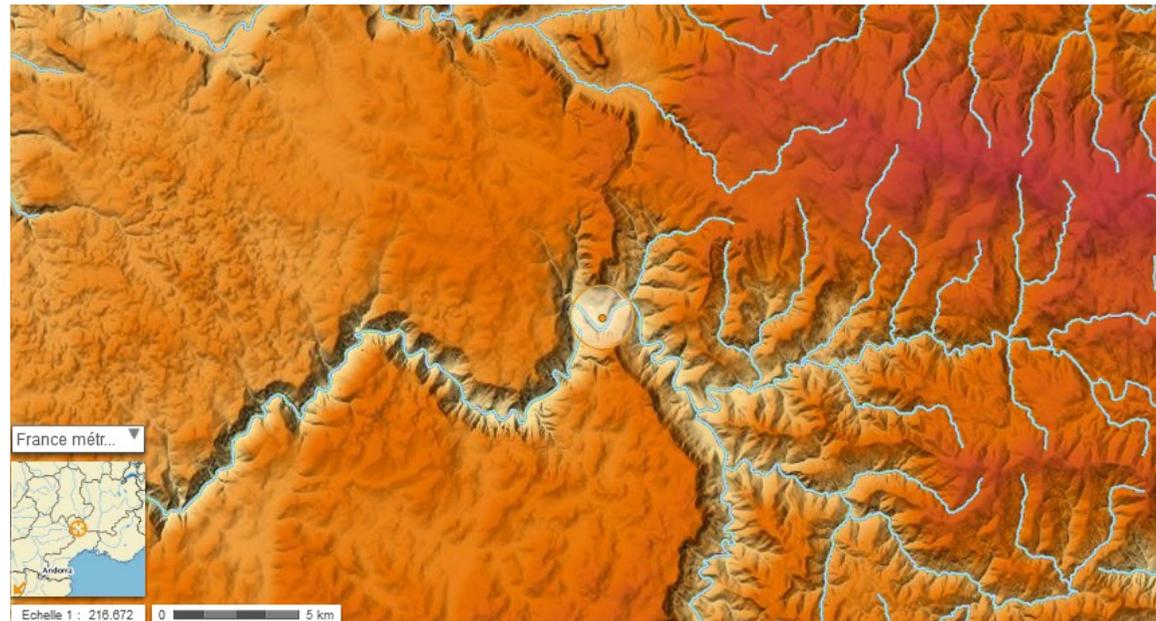
1. Aquifères poreux
2. Aquifères de socle
3. Aquifères karstiques

### Jeu de rôle autour de l'alimentation en eau d'une commune

#### 4 groupes:

- 1 Mairie
- 1 groupe / type d'aquifère

Avantages de chaque type d'aquifère /Inconvénients



**Alluvial**

**Karstique**

**Socle**

**Importance**

**Paysage associé**

**Schéma Conceptuel**

**Variabilité des propriétés hydrodynamiques**

**Hétérogénéité**

**K**

**Q moyen**

**V**

**Prospection/Méthode d'étude spécifique**

**Qualité/vulnérabilité**

**Facies**

**Vulnérabilité**

**Pression polluante**

**Potentiel auto  
épurateur**

## □ Importance relative selon les ensembles structuraux

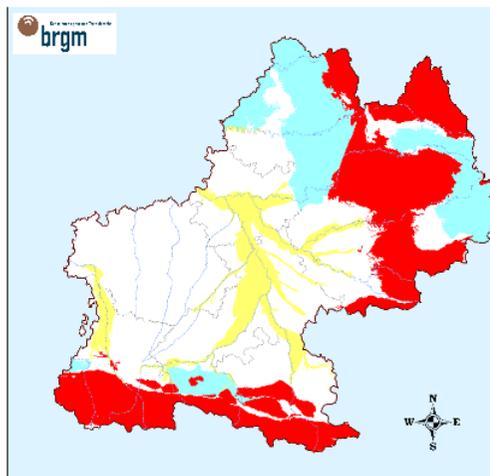
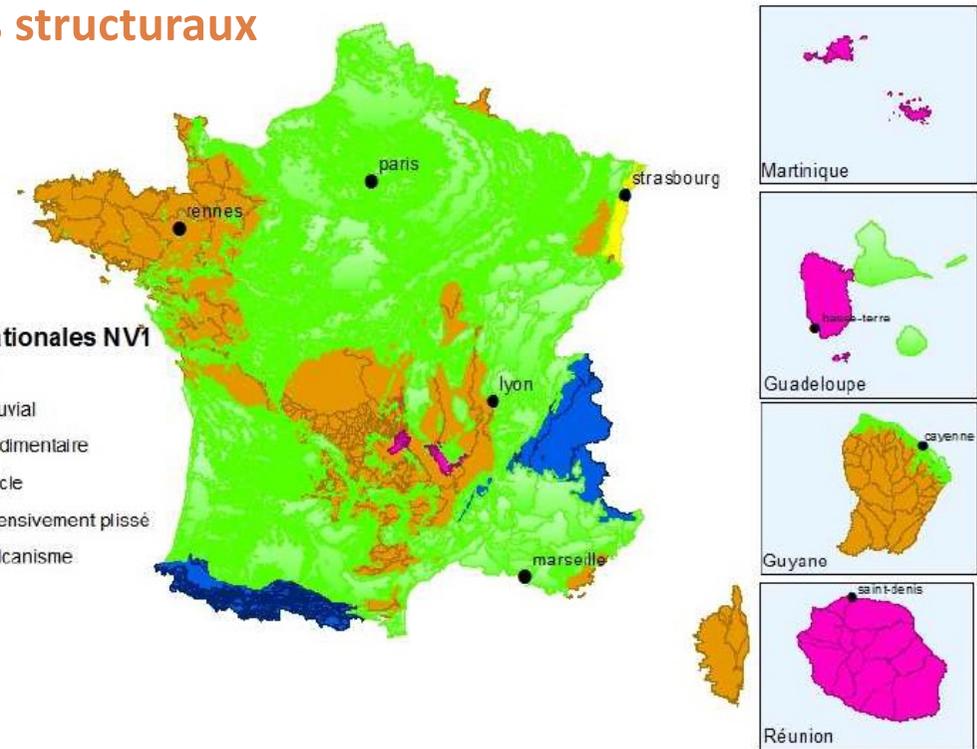
### ■ Entités hydrogéologiques

(b) Les entités hydrogéologiques sont rattachées à 5 grands types de formation géologique :

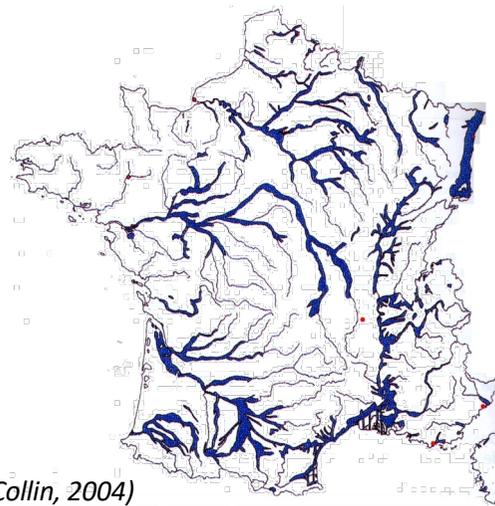
- le sédimentaire (bassin aquitain, bassin parisien, ... ) ;
- le socle (massif armoricain, massif central, ... ) ;
- l'alluvial ;
- le volcanisme ;
- les formations intensément plissées (massifs montagneux).

#### Entités nationales NV1 par thème

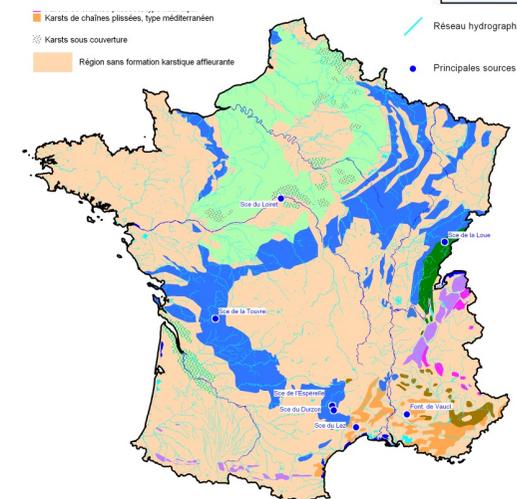
- Alluvial
- Sédimentaire
- Socle
- Intensément plissé
- Volcanisme



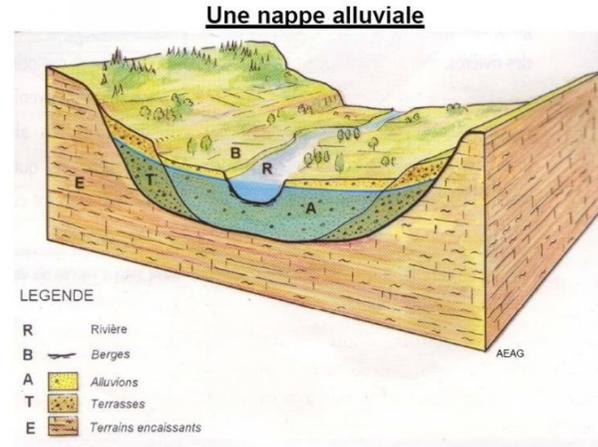
- AQUIFERES ALLUVIAUX
- AQUIFERES KARSTIQUE DU JURASSIQUE MOY ET SUP
- AQUIFERES DE SOCLE



(J.J. Collin, 2004)

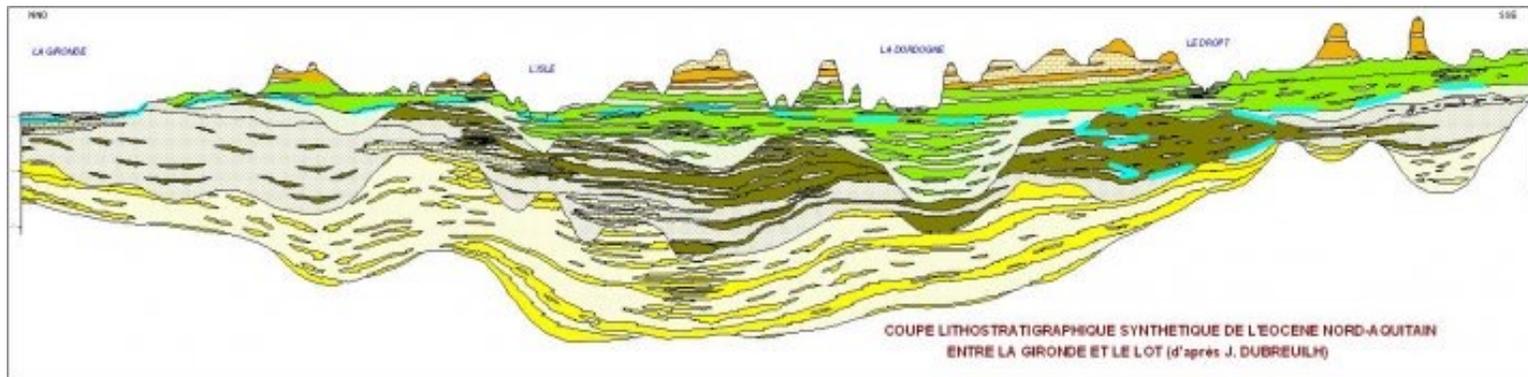
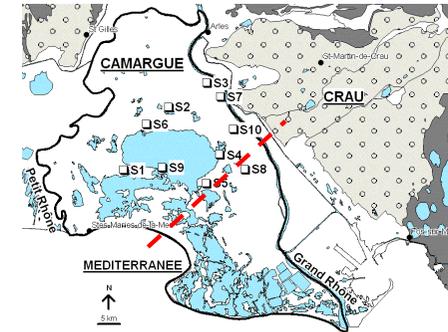
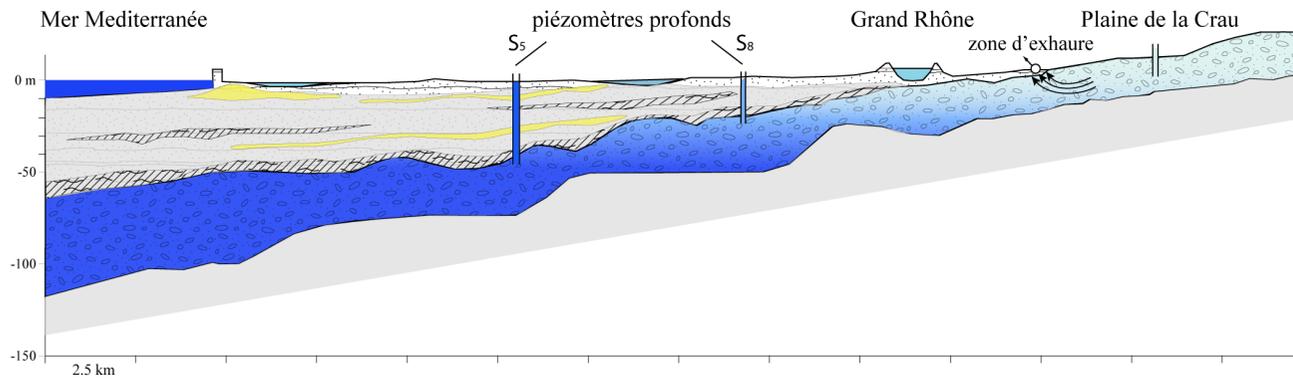


### a) Les aquifères alluviaux



S-W

N-E



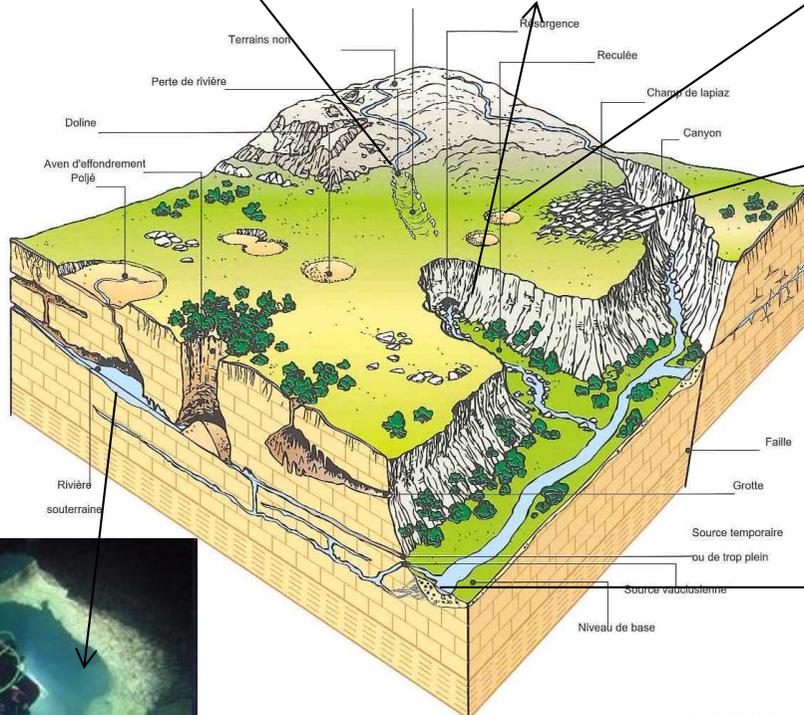
### b) Les aquifères karstiques



Doline sur le Causse de Sauveterre



Lapiaz

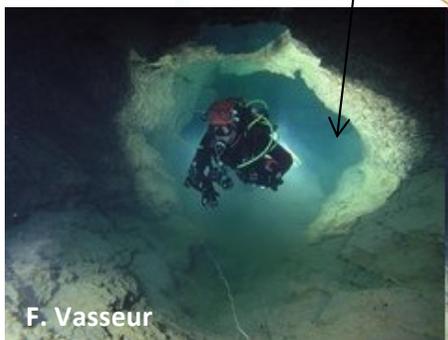


Bakalowicz, 1999

⇒ Organisation des vides contrôlée par la circulation de l'eau : karstification

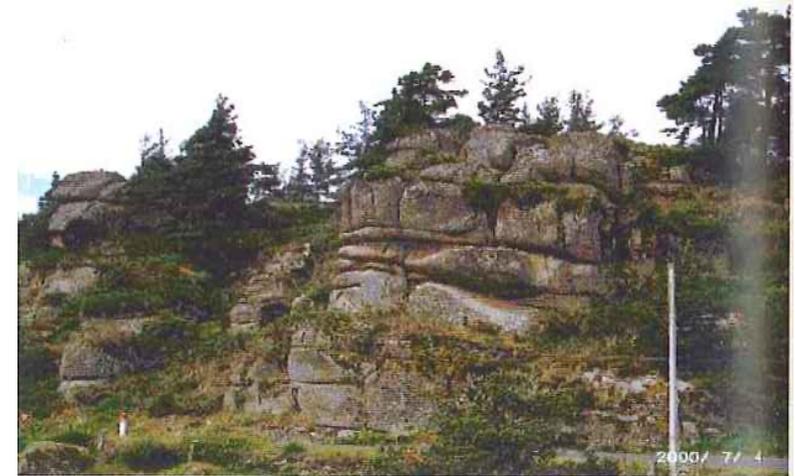
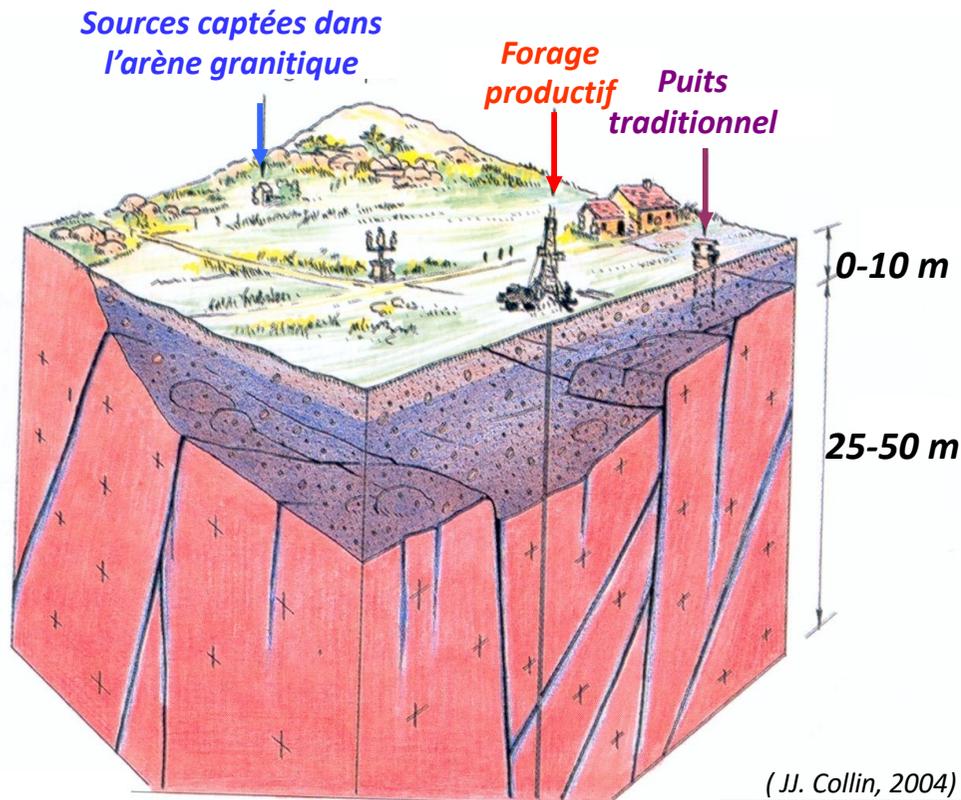


Fontaine de Vaucluse Qmoy = 21 m<sup>3</sup>/s



F. Vasseur

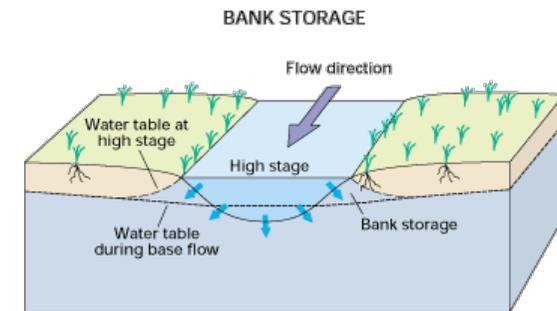
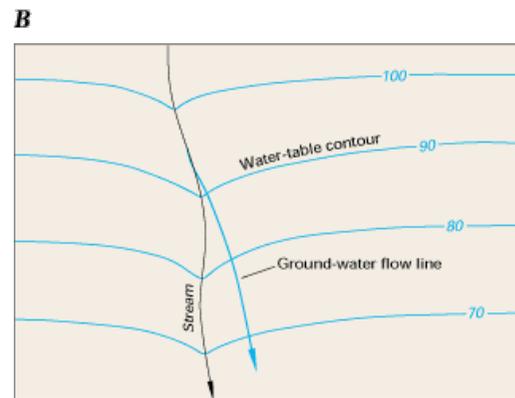
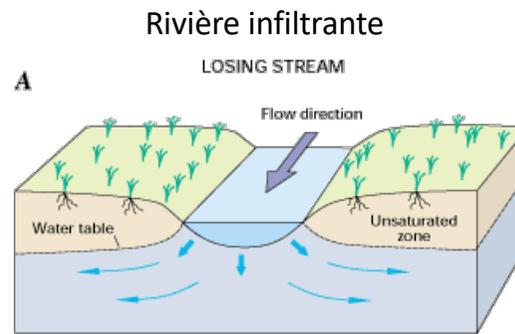
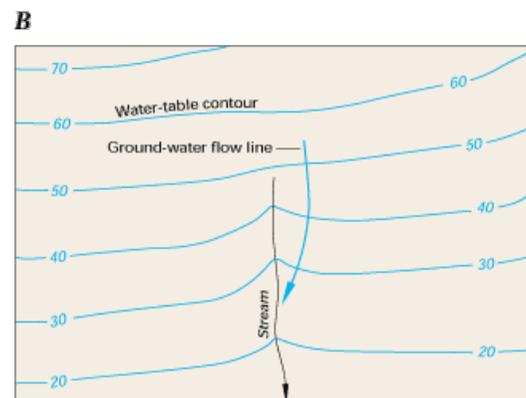
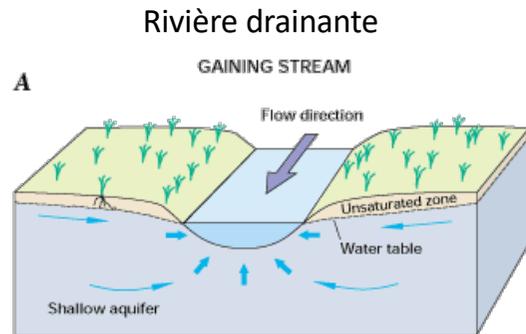
□ **Aquifères fissurés/fracturés/ de socle**



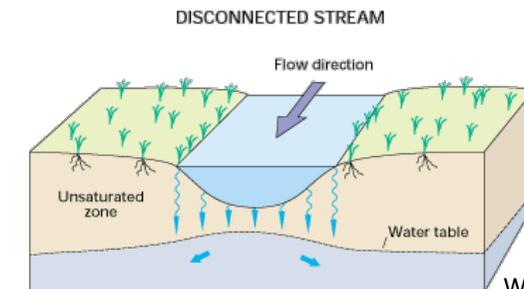
(JJ. Collin, 2004)

## □ Les aquifères alluviaux

Relation avec le réseau hydrographique: Rivière infiltrante/ drainante



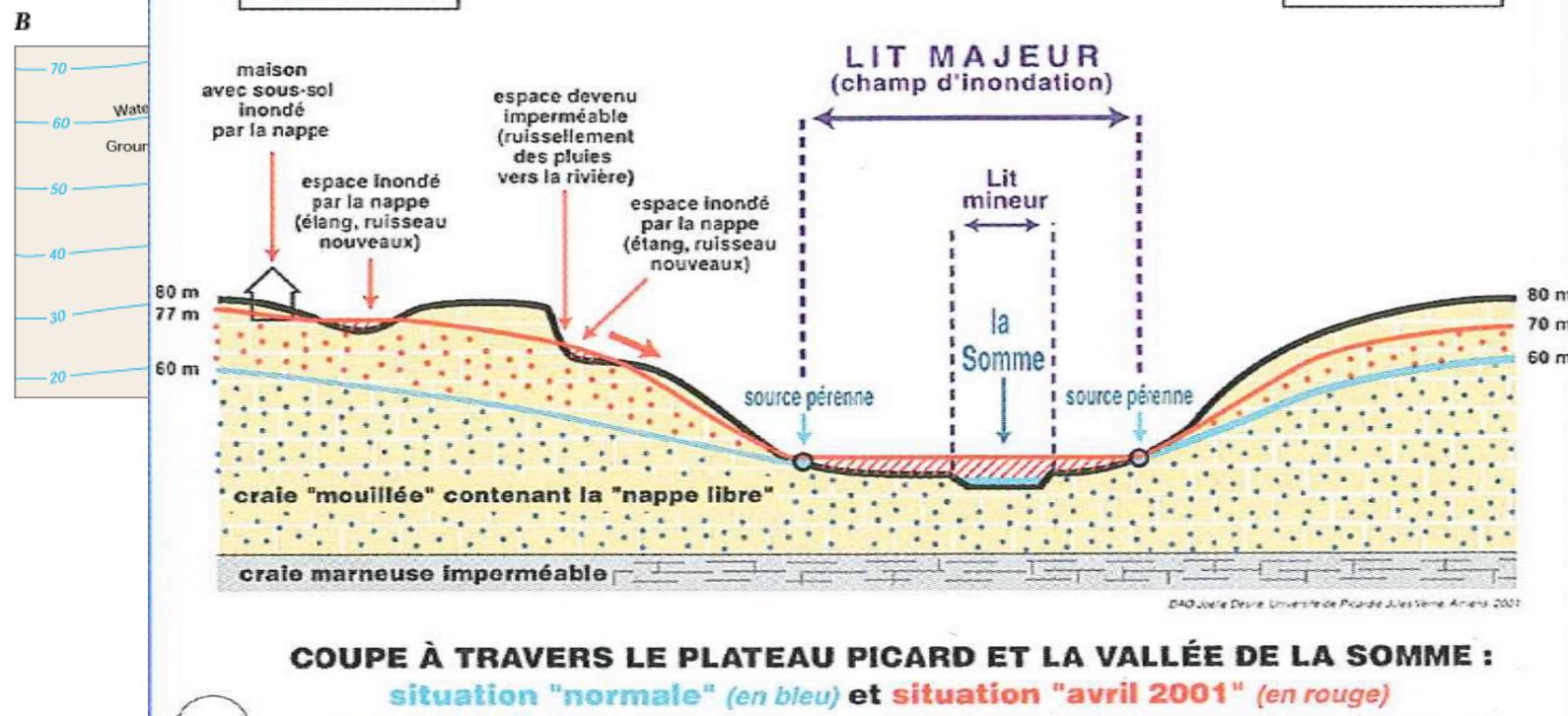
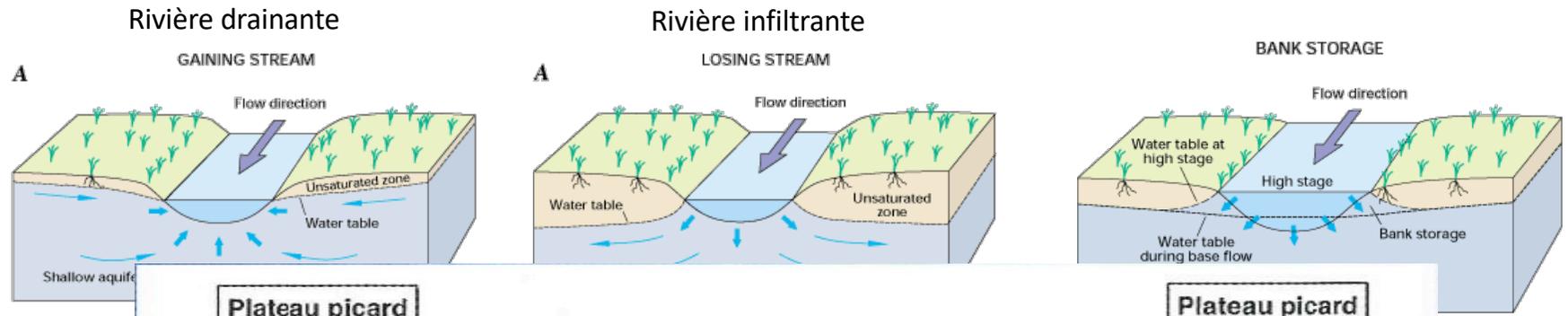
« tampon » naturel atténue l'intensité des crues : stockage temporaire



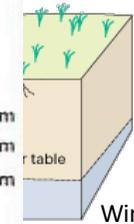
Winter et al., 1998

Les aquifères alluviaux

Relation avec le réseau hydrographique: Rivière infiltrante/ drainante



ensité des

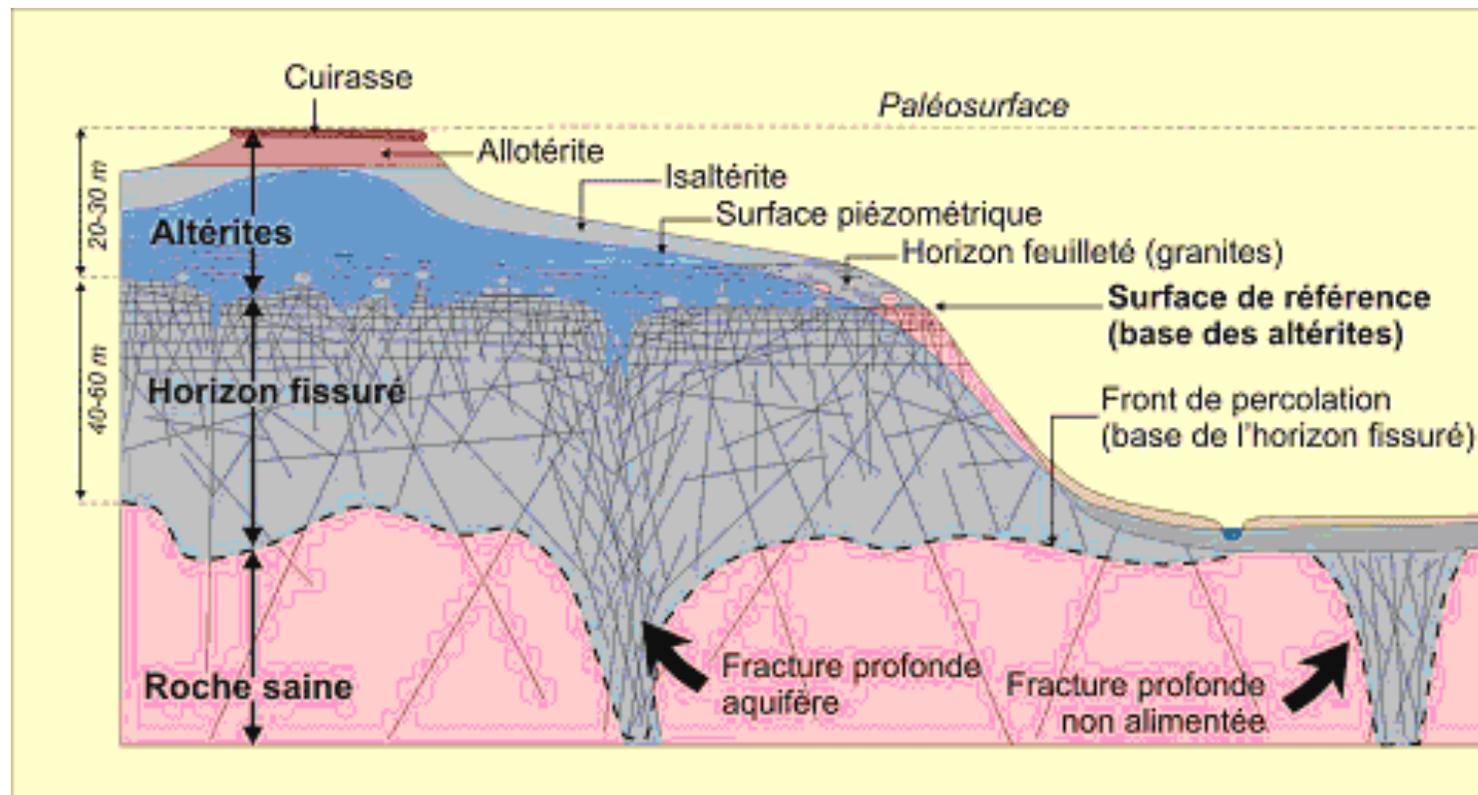


Winter et al., 1998

COUPE À TRAVERS LE PLATEAU PICARD ET LA VALLÉE DE LA SOMME : situation "normale" (en bleu) et situation "avril 2001" (en rouge)

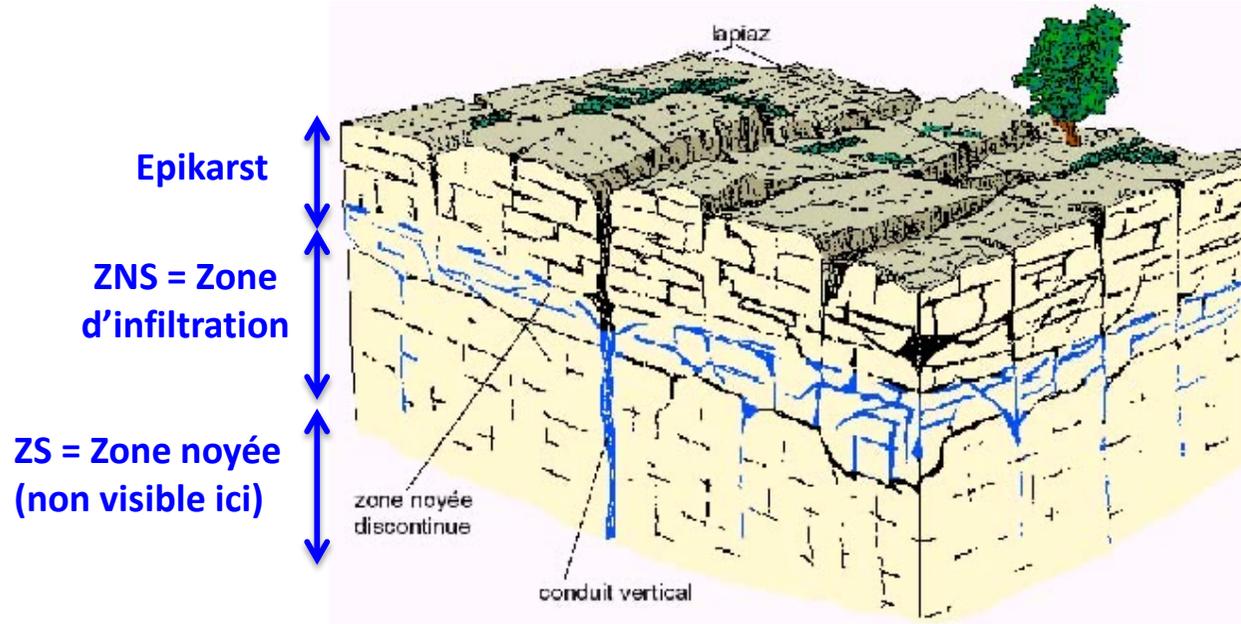
## □ Les aquifères de socle et karstique

- Dissociation fonction conductrice/ fonction capacitive

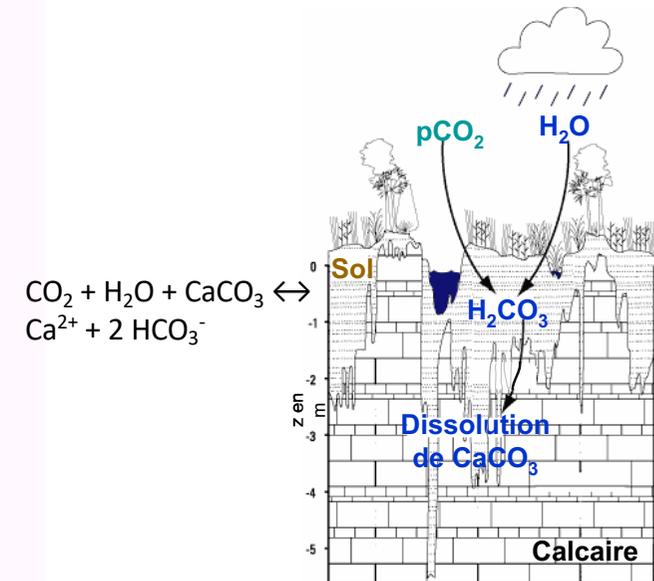


## □ Les aquifères de socle et karstique

- Dissociation fonction conductrice/ fonction capacitive



(d'après R. Wyns, BRGM)



⇒ Organisation des vides contrôlée par la circulation de l'eau : karstification

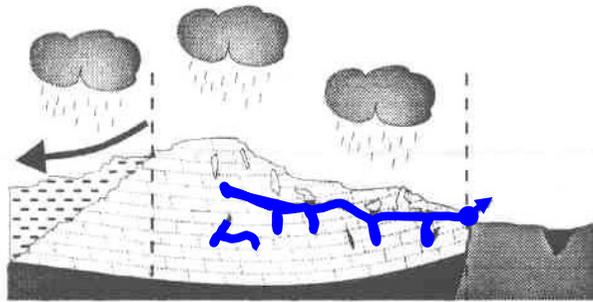
Schéma en coupe av zone d'inf  
imp en amont  
+ Zone sat

5 facteurs de développement:

- Roche soluble (calcaire, gypse)
- Eau (solvant + agent de transport)
- Acidité (Co2 sol)
- Gradient hydraulique
- Temps

⇒ K évolutive

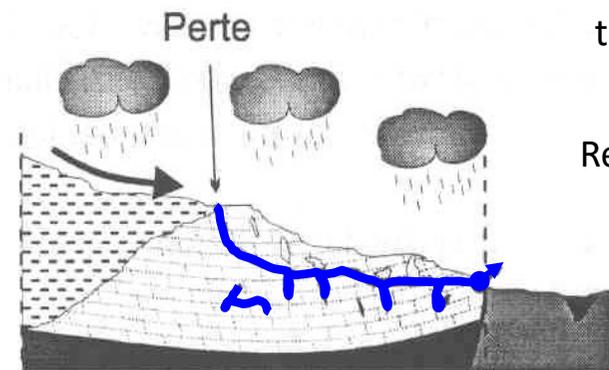
## □ Les aquifères de socle et karstique



*Limites de l'impluvium*

### SYSTEME UNAIRE

L'ensemble de l'impluvium est constitué de terrains karstifiables. Drainage de l'amont vers l'aval.



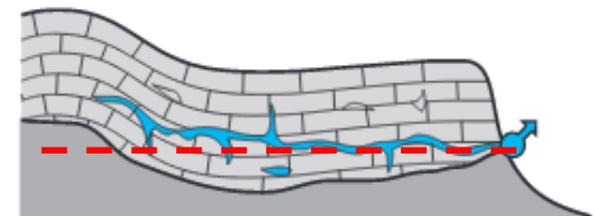
*Limites de l'impluvium*

### SYSTEME BINAIRE

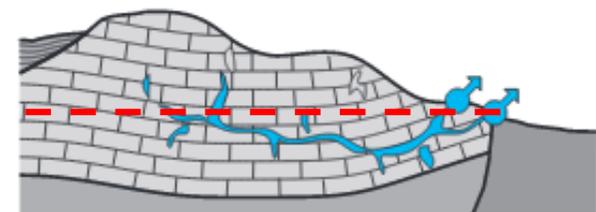
Une partie de l'impluvium est constituée de terrains non karstifiables. Infiltration des eaux concentrée en un point (perte).

Recharge allogénique. Drainage très développé.

### SYSTEME JURASSIEN

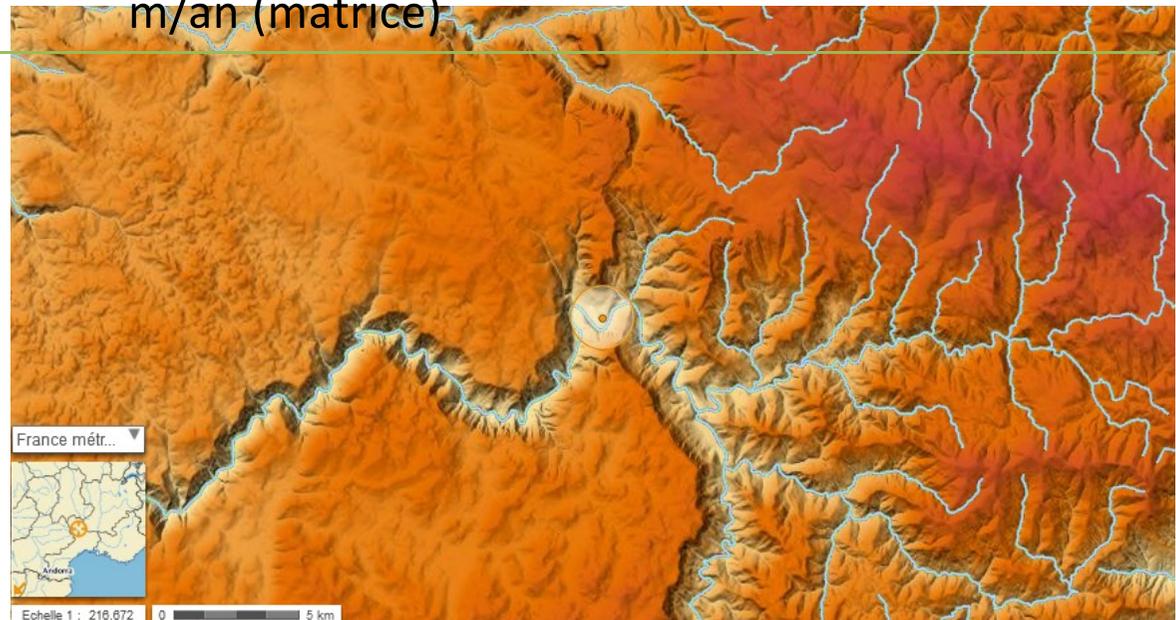


### SYSTÈME VAUCLUSIEN



### □ Variabilité des propriétés hydrodynamiques

	Alluvial	Karstique	Socle
<b>Hétérogénéité</b>	Faible △ Condition de dépôt	+++	++
<b>K</b>	$10^{-2}$ a $10^{-5}$ m/s	$10^{-7}$ a $10^{-1}$ m/s	Altérites: $10^{-7}$ a $5 \cdot 10^{-6}$ m/s Horizon fissuré: $10^{-6}$ et $5 \cdot 10^{-3}$ m/s
<b>Q moyen</b>	Qlq m <sup>3</sup> /h a 100 <sup>n</sup> de m <sup>3</sup> /h	1 <sup>ere</sup> source: 21m <sup>3</sup> /s	Nbrses sources, faibles Q
<b>V</b>	m/an	m/h (drains) – m/an (matrice)	± m/mois (selon fissures)



❑ Propriétés du réservoir aquifère

- Continuité ou discontinuité
- Homogénéité ou hétérogénéité
- Isotropie ou anisotropie

Représentativité de l'échelle d'observation?

	Milieu poreux marin	Milieu poreux continental	Milieu fracturé	Milieu karstique
Homogénéité 10 <sup>-1</sup> m	Homogène	Homogène	Homogène	Homogène
Homogénéité 10 <sup>2</sup> m	Homogène	Très hétérogène	Homogène à peu hétérogène	Très hétérogène
Isotropie	Isotrope	Très anisotrope	Isotrope à anisotrope	Très anisotrope
Taille du VER (m)	10 <sup>-2</sup> à 10 <sup>1</sup>	10 <sup>1</sup> à 10 <sup>3</sup>	10 <sup>1</sup> à 10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup> à 10 <sup>4</sup>
Productivité attendue	Faible à moyenne Irrégulière	Moyenne à forte Irrégulière	Faible à moyenne Régulière	Faible à très forte Irrégulière

(Gilli et al., 2012)

L.Kiraly / Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers 1 (3), September 2003, p.5

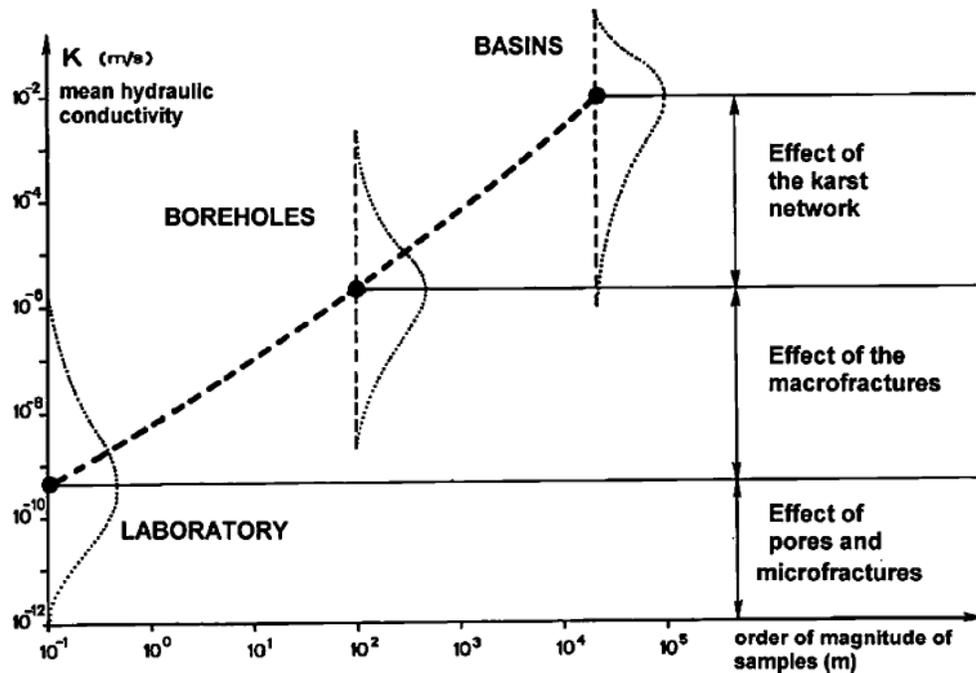
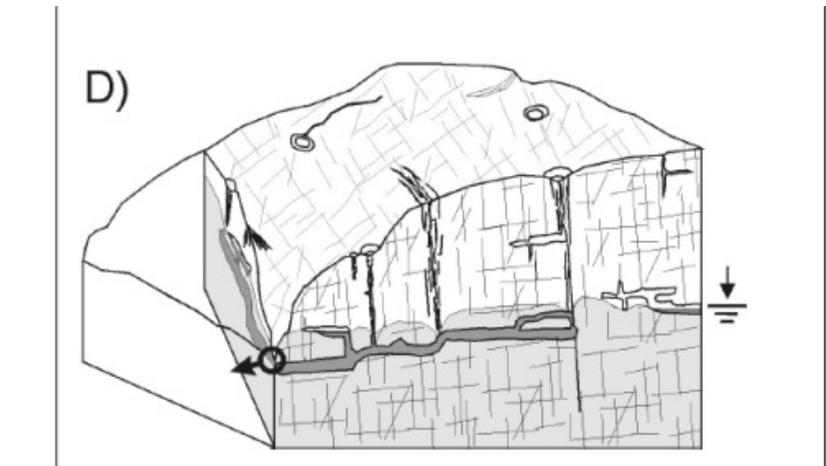


Fig. 3. Scale effect on the hydraulic conductivity in fractured and karstified limestone aquifers (after Kiraly 1975, modified).



**Alluvial**

**Karstique**

**Socle**

**Importance**

**Paysage associé**

**Schéma Conceptuel**

**Variabilité des propriétés hydrodynamiques**

**Hétérogénéité**

**K**

**Q moyen**

**V**

**Prospection/Méthode d'étude spécifique**

**Qualité/vulnérabilité**

**Facies**

**Vulnérabilité**

**Pression polluante**

**Potentiel auto  
épurateur**

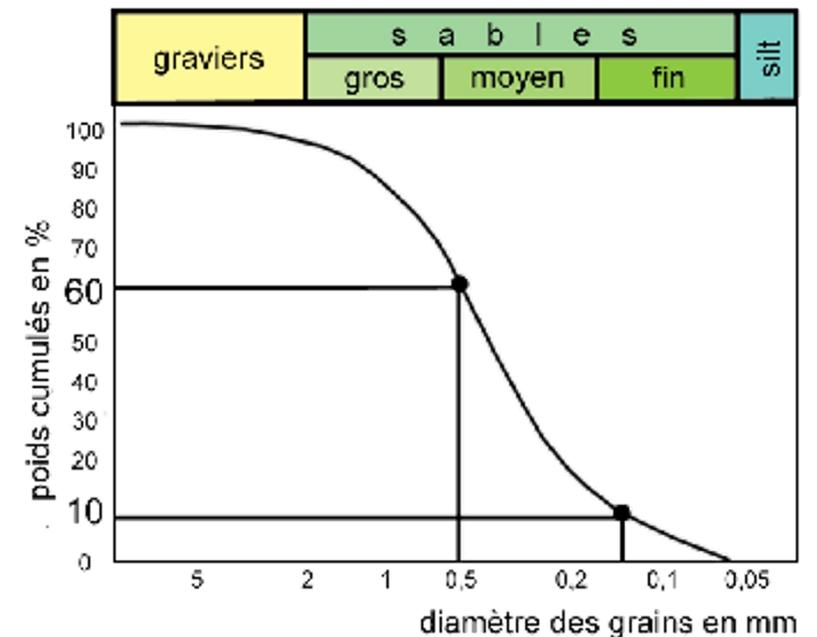
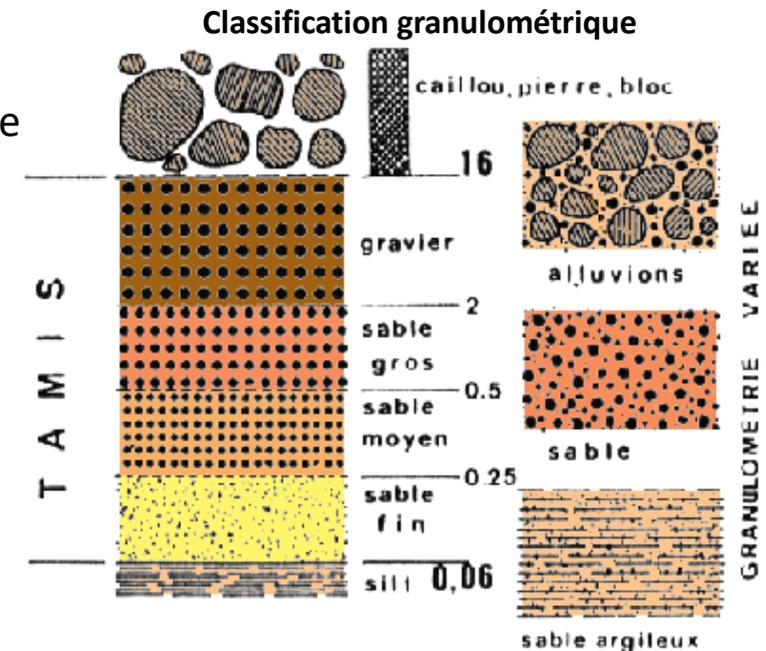
### □ Aquifères alluviaux

**Roches meubles** ⇒ Etude granulométrique en laboratoire

#### ▪ Classification granulométrique

Position de la courbe : terme lithologique

Pente de la courbe : type de granulométrie



### □ Aquifères alluviaux

**Roches meubles** ⇒ Etude granulométrique en laboratoire

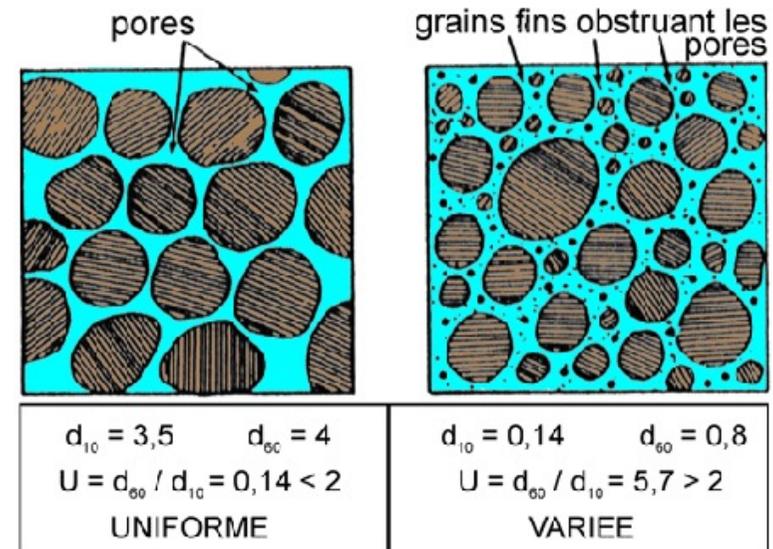
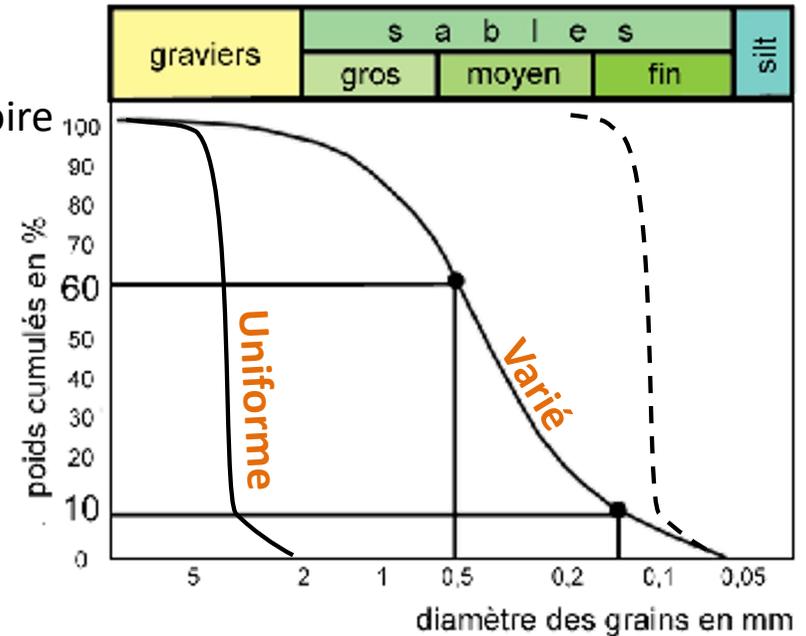
#### ▪ Classification granulométrique

Position de la courbe : terme lithologique

Pente de la courbe : type de granulométrie

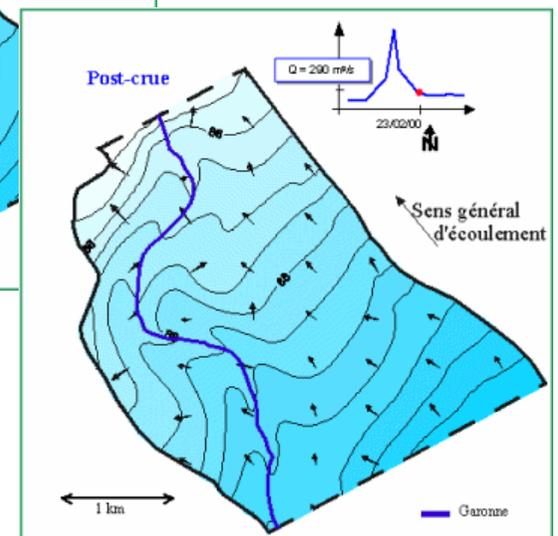
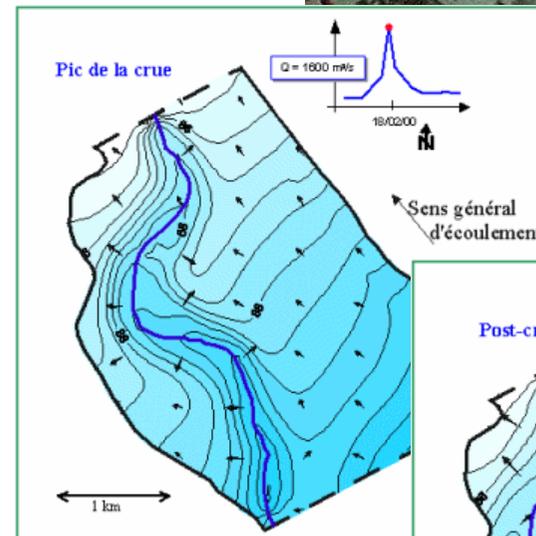
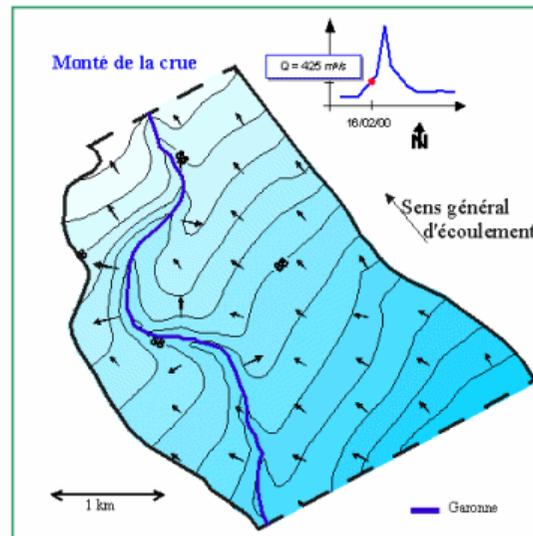
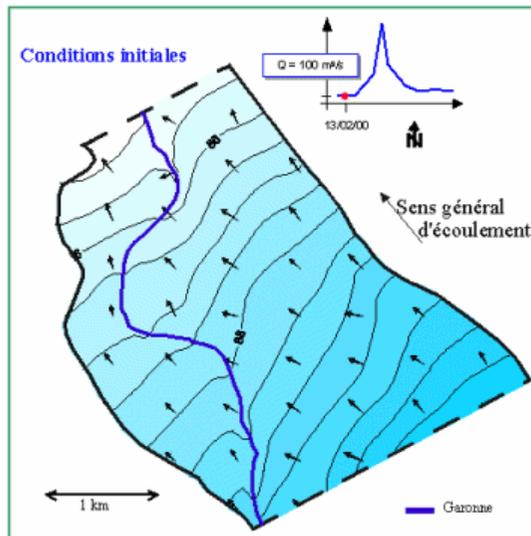
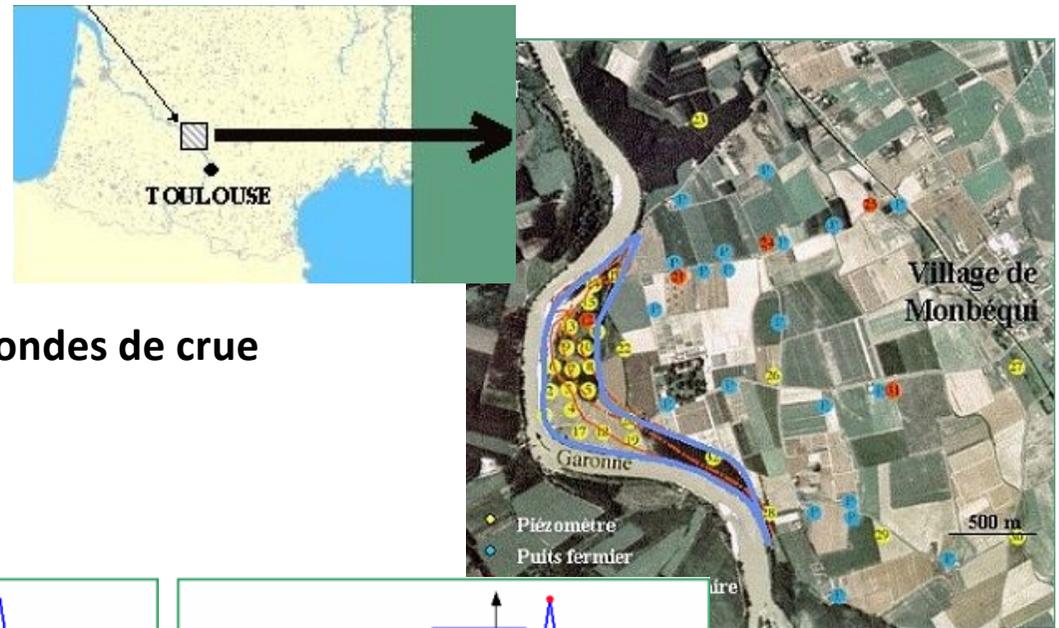
#### ▪ Paramètres granulométriques

- Diamètre caractéristique:  $d_{10}$ ,  $d_{60}$
- Pente: uniforme/varié
- Coefficient d'uniformité:  $U = d_{60}/d_{10}$

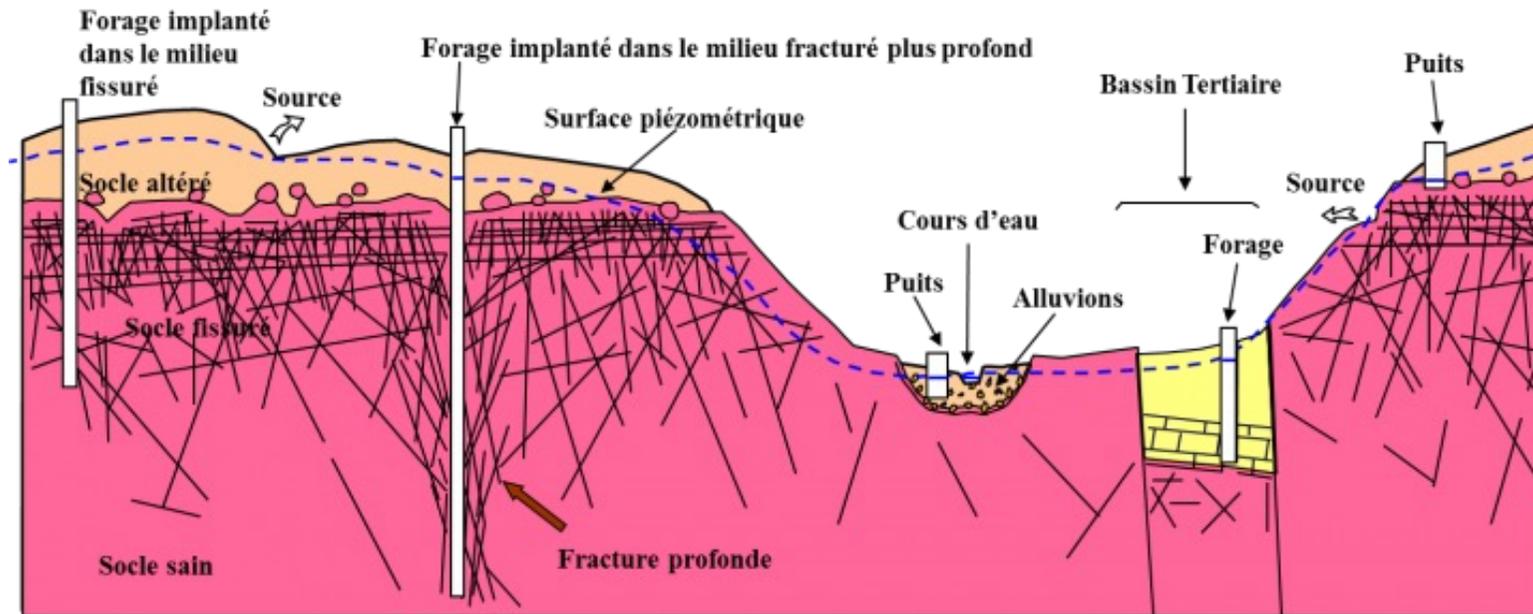


### □ Aquifères alluviaux

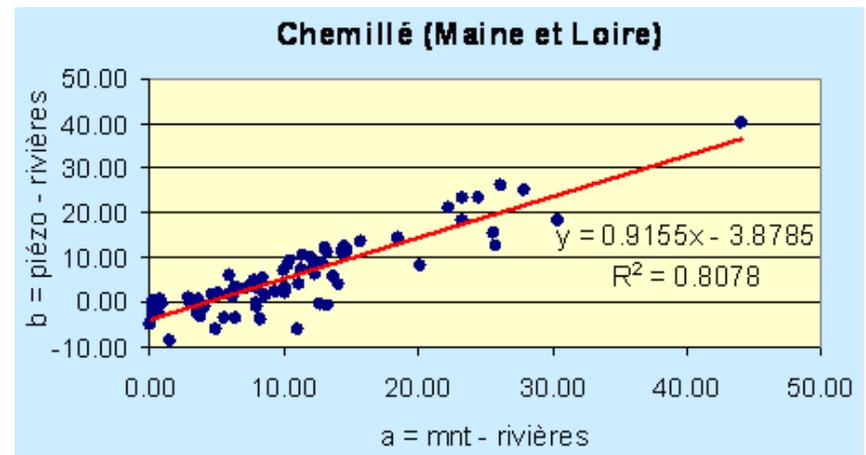
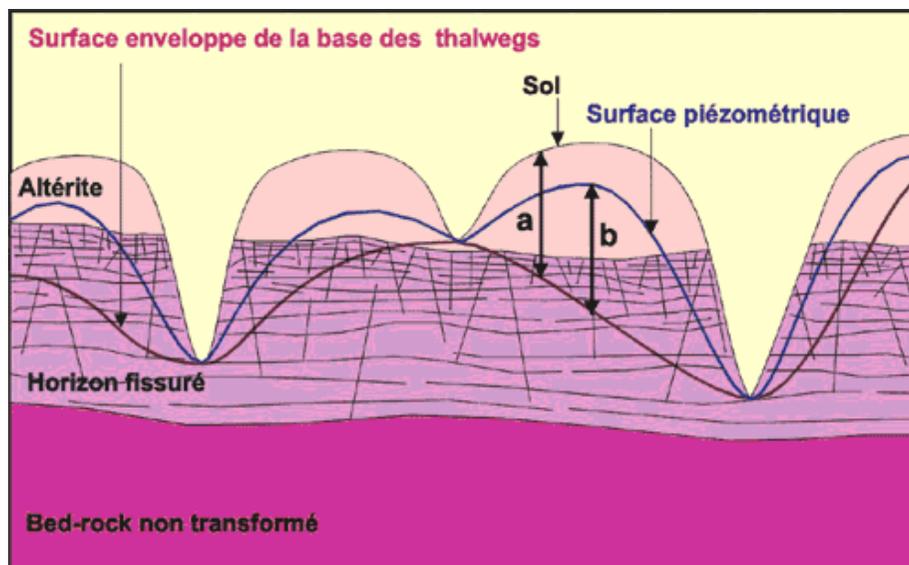
- Carte piézométrique
- Etude de la propagation des ondes de crue



□ **Aquifères de socle**



<http://sigesbre.brgm.fr>

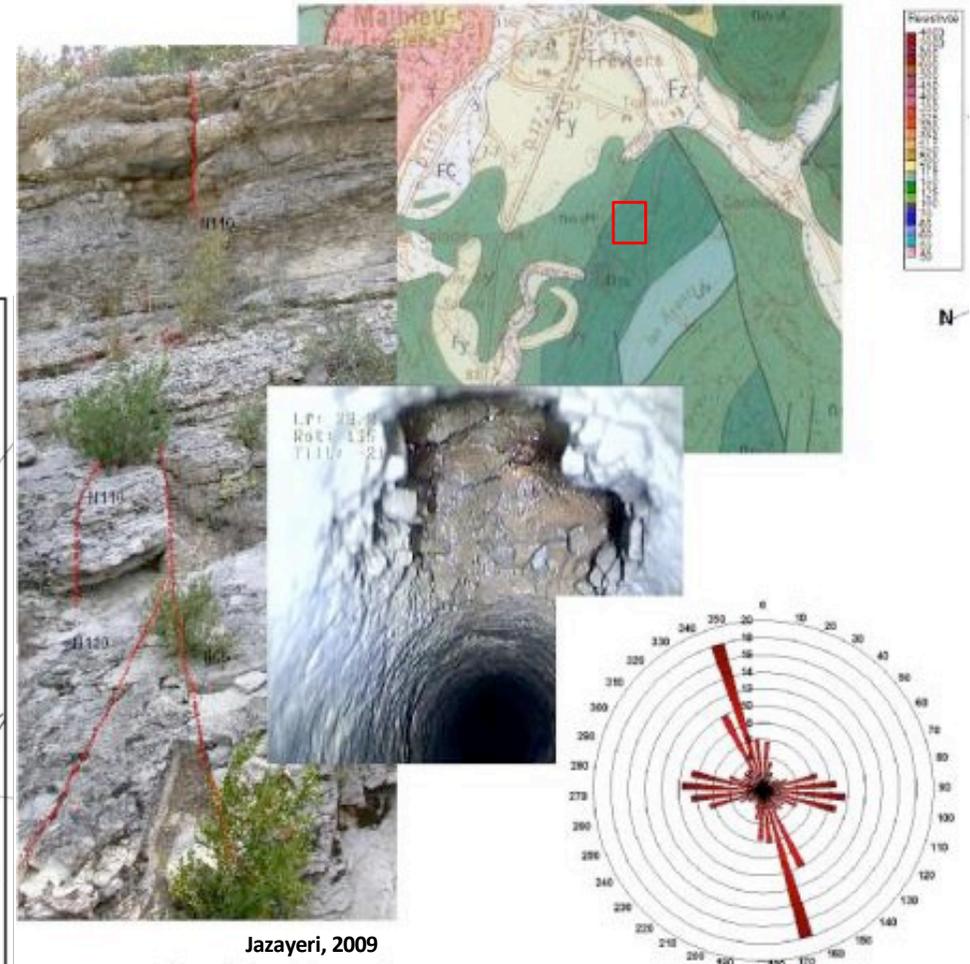
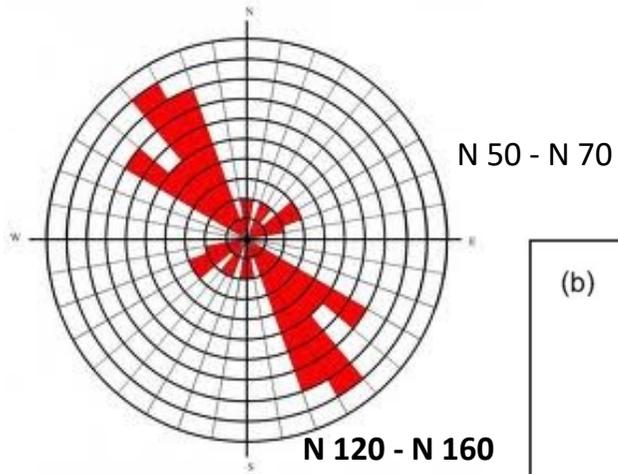


□ **Aquifères karstiques**

▪ **Roches compactes** ⇒ **Analyse de la fracturation sur le terrain**

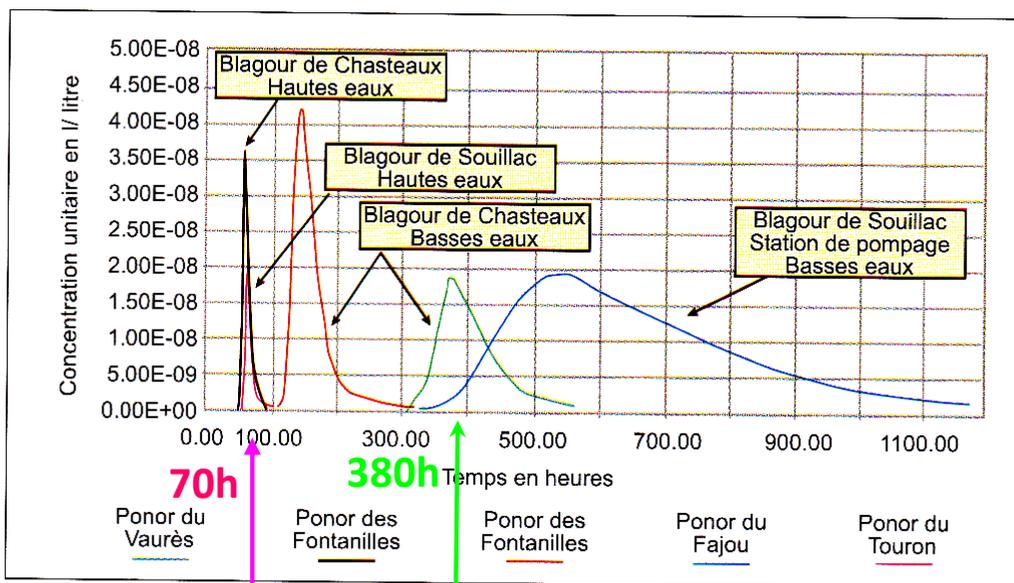
Etude de la fracturation sur le site du Terrieu (St Matthieu de Tréviers)

Rosace en fréquence de la fracturation



□ **Aquifères karstiques**

▪ **Traçage**



**Estivales**

**Ponor du Vaures**

Fig. 45

Restitution des principaux traçages réalisés sur le Causse Martel ; basses eaux et hautes eaux (Ph. Muet, Ain Géotechnique pour ASF, 1995).

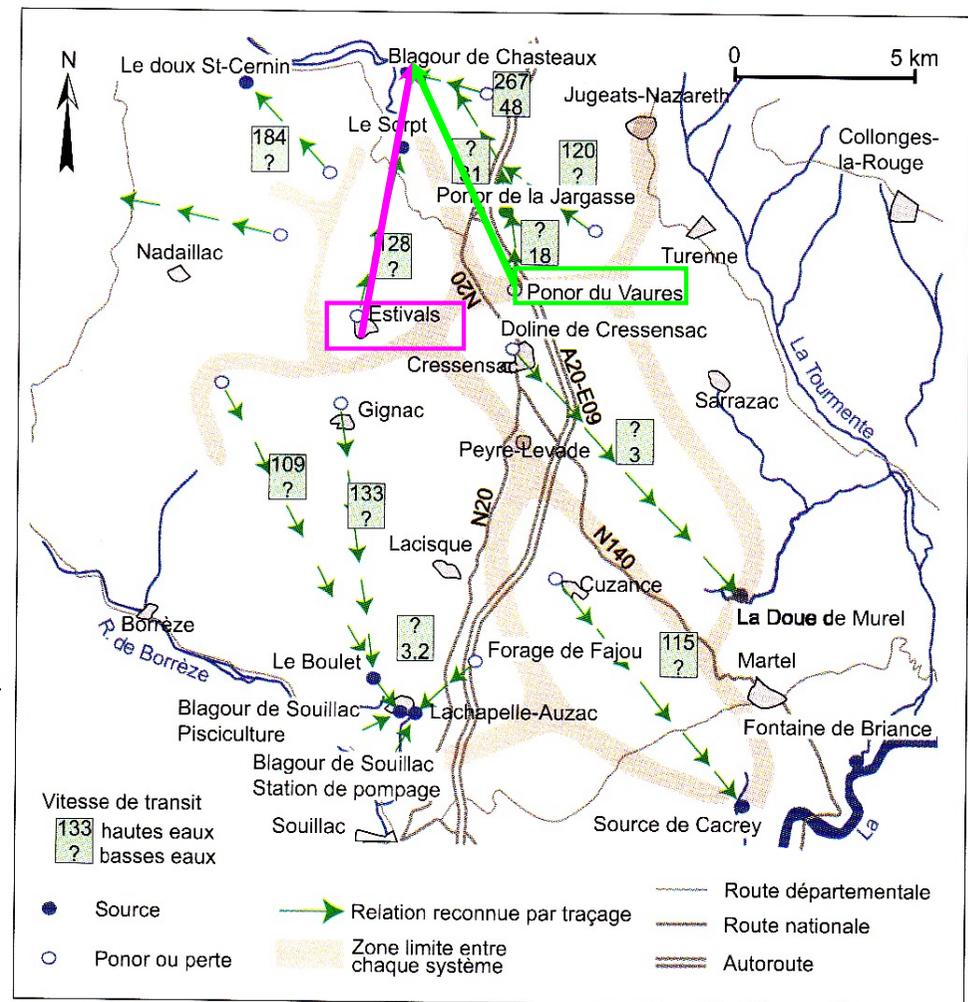


Fig. 46

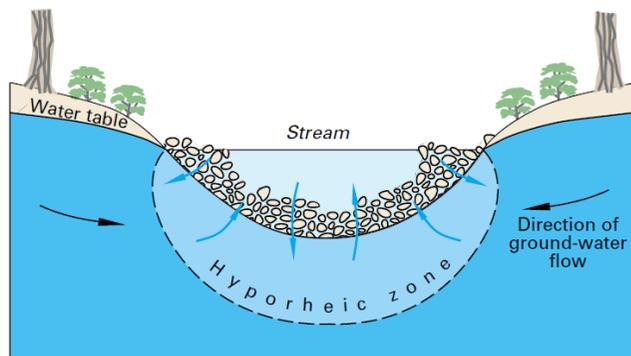
Limite des systèmes hydrogéologiques du Causse Martel (Ph. Muet, Ain Géotechnique pour ASF, 1995).

**Dist<sub>(Vaures→Chasteaux)</sub> : ~ 6,8km**  
**Vitesse: 6800 / 380 = 18 m/h**

**Dist<sub>(Estiv.→Chasteaux)</sub> : ~ 7,2km soit v = 103 m/h**

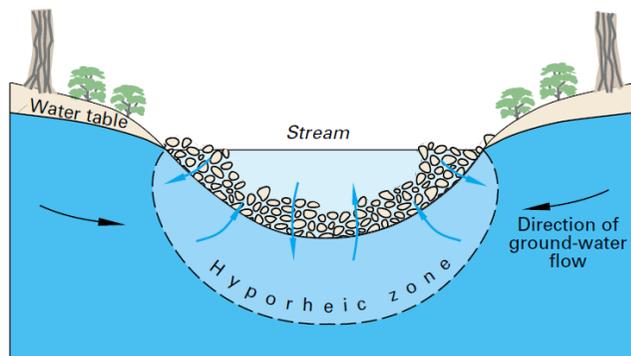
□ **Caractéristiques chimiques/ vulnérabilité**

	Alluvial	Karstique	Socle
<b>Facies</b>			
<b>Vulnérabilité</b>			
<b>Pression polluante</b>			
<b>Potentiel auto épurateur</b>			



### □ Caractéristiques chimiques/ vulnérabilité

	Alluvial	Karstique	Socle
<b>Facies</b>	Bicarbonate calcique Δ dépend du type de sédiment	Bicarbonate calcique	Bicarbonate sodique ou calcique
<b>Vulnérabilité</b>	+++	++/++++ au niveau des pertes	faible
<b>Pression polluante</b>	NO <sub>3</sub> , phytosanitaire	Ruissèlement, turbidité (MES)	Métaux lourds, Fluor
<b>Potentiel auto épurateur</b>	Zone hyporheïque	<i>faible</i>	Dénitrification (mais augmente Fe et SO <sub>4</sub> )



□ Rappel

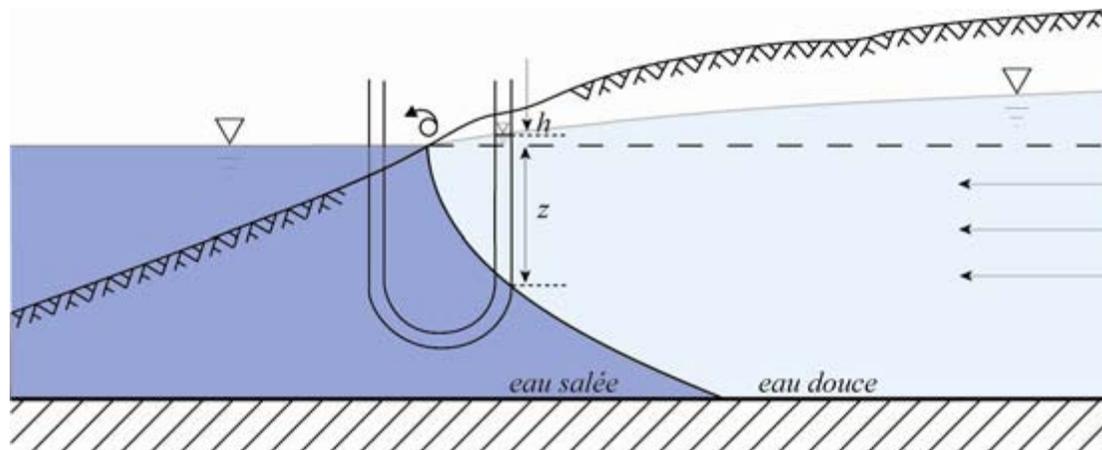
Concepts	Paramètres hydrodynamiques	Symboles	Unités (SI)
<b>Fonction capacitive</b>	Porosité totale	n	%
	Porosité efficace	$n_e$	%
	Emmagasinement	S	(%)
<b>Fonction conductrice</b>	Conductivité hydraulique	K	$\text{ms}^{-1}$
	Perméabilité intrinsèque	$k_i$	$\text{m}^2$
	Transmissivité	T	$\text{m}^2\text{s}^{-1}$
	Diffusivité	T/S	$\text{m}^2\text{s}^{-1}$
<b>Piézométrie et gradients hydrauliques</b>	Niveau piézométrique	H	m d'eau
	Charge hydraulique	h	m d'eau
	Gradient hydraulique	i	—
<b>Débits et vitesses</b>	Débit d'une nappe	Q	$\text{m}^3\text{s}^{-1}$
	Débit unitaire	q	$\text{ms}^{-1}$
	Vitesse de Darcy (de filtration)	$V_D$	$\text{ms}^{-1}$

## d) Les aquifères côtiers

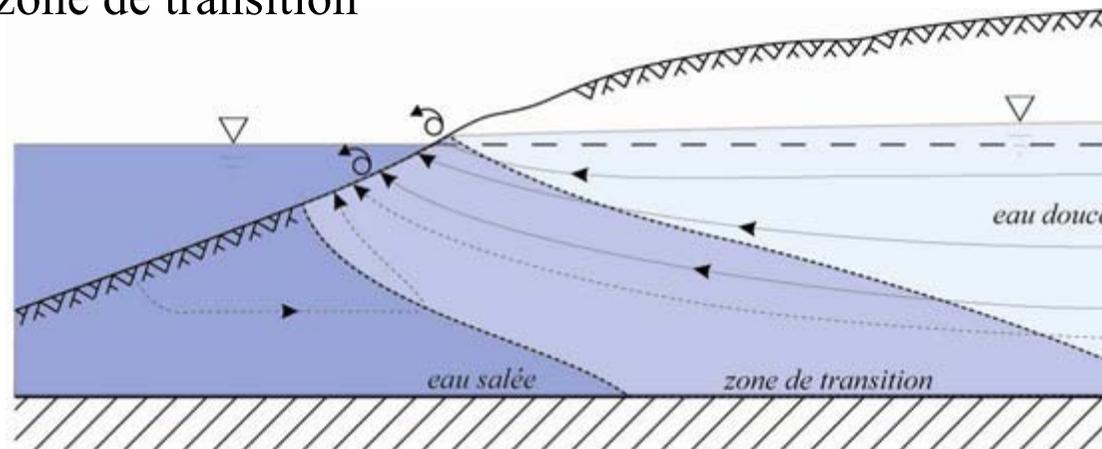
- Caractéristique

Principe de Ghyben-Herzberg : interface nette

⇒ Profondeur de l'interface =  $40 \times NP$



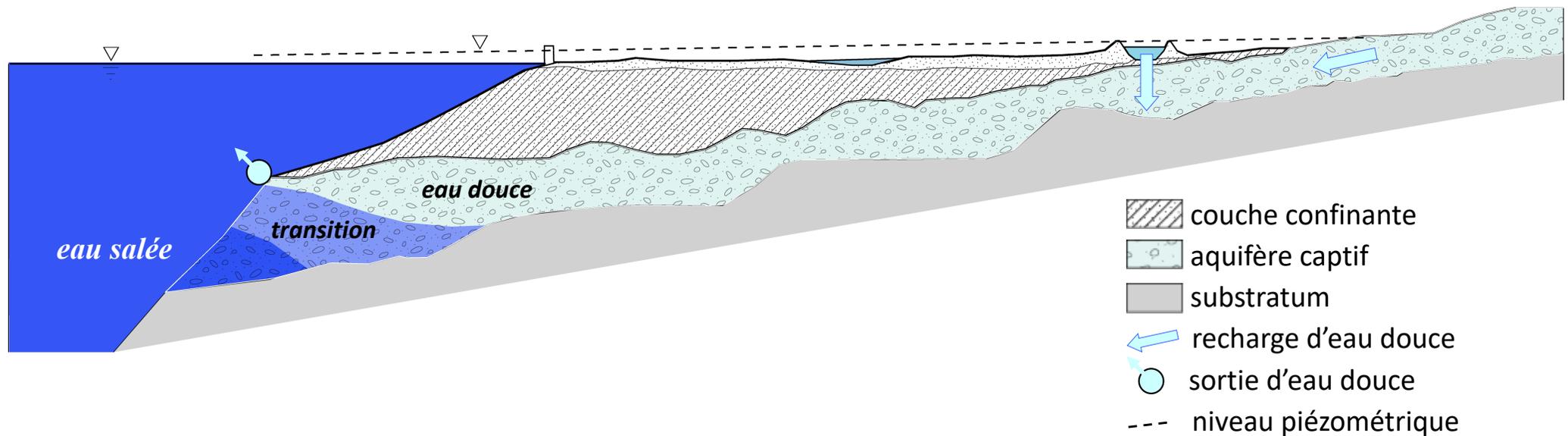
En réalité: zone de transition



Exemple d'un aquifère en zone littorale

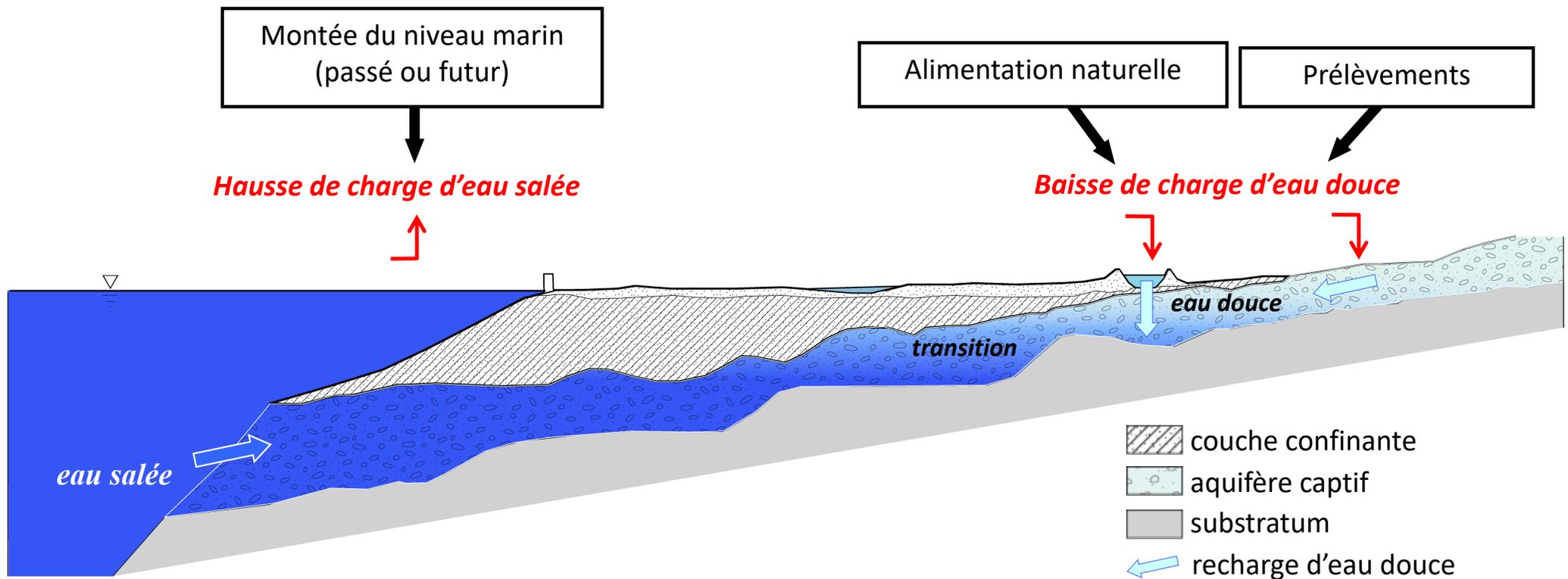
## d) Les aquifères côtiers

- Vulnérabilité
- équilibre eau douce/eau de mer  $\Rightarrow$  zone de transition



### d) Les aquifères côtiers

- Vulnérabilité
- équilibre eau douce/eau de mer  $\Rightarrow$  zone de transition
- rupture d'équilibre  $\Rightarrow$  Intrusion d'eau de mer



# III. ECOULEMENT DANS LES MILIEUX POREUX SATURÉS

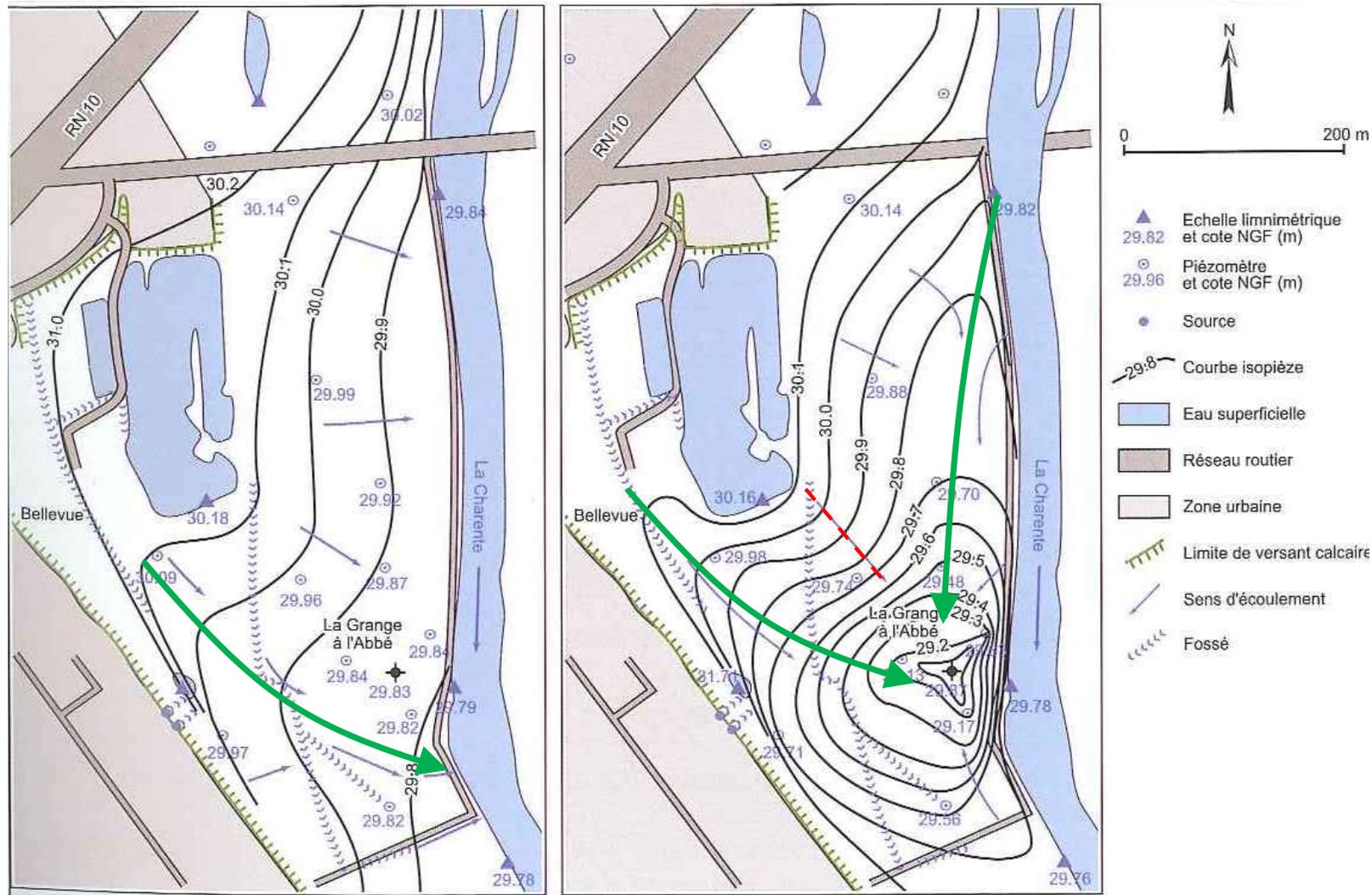
## 3. Ecoulements artificiels

b. Influence d'un pompage sur la nappe

► Impact sur la relation nappe/eau de surface

▪ Relation nappe/rivière

Réalimentation d'une nappe par un cours d'eau sous l'influence d'un pompage (SOLEN-EGS, 2001)



## IV. *GESTION ET EXPLOITATION DES AQUIFÈRES*

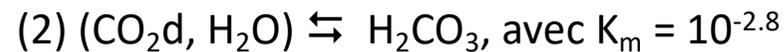
# Les équilibres calco-carboniques

Eau à 25°C :

## ■ Dissolution du CO<sub>2g</sub>, loi de Henry



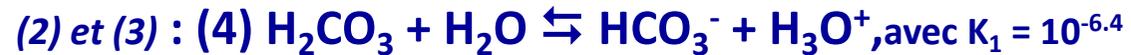
## ■ Formation d'acide carbonique



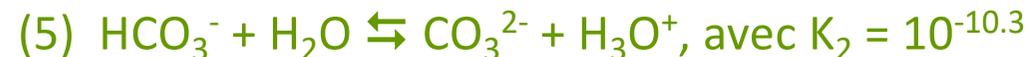
## ■ Dissociation de l'acide carbonique vrai



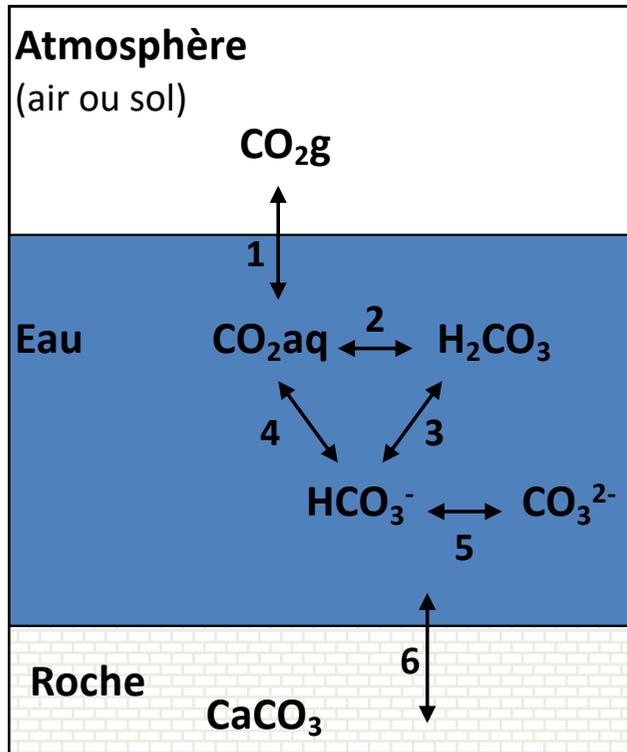
## ■ Equilibre avec les bicarbonates



## ■ Equilibre avec les carbonates



## ■ Dissolution de la calcite



NB :  $\text{H}_2\text{CO}_3 = (\text{CO}_{2d}, \text{H}_2\text{O}) + \text{H}_2\text{CO}_{3\text{vrai}}$ , mais  $\text{H}_2\text{CO}_{3\text{vrai}}$  ne représente que 0.3% du CO<sub>2</sub> dissous à 25°C, donc la teneur en acide carbonique est assimilable à celle du CO<sub>2aq</sub>.

□ **Entrée (hydrologie) : → Zone d'alimentation ou de recharge (Points hauts)**

▪ **Précipitation** (Nappe libre ou semi-captive)

- Evapotranspiration: ETP/ETR
- Ruissellement

Précipitation efficace  $PE = P - ETR - R$

⇒ Infiltration diffuse

▪ **Pertes de surfaces** ○

⇒ Infiltration concentrée

▪ **Alimentation latérale**

▪ **Alimentation verticale par drainance**

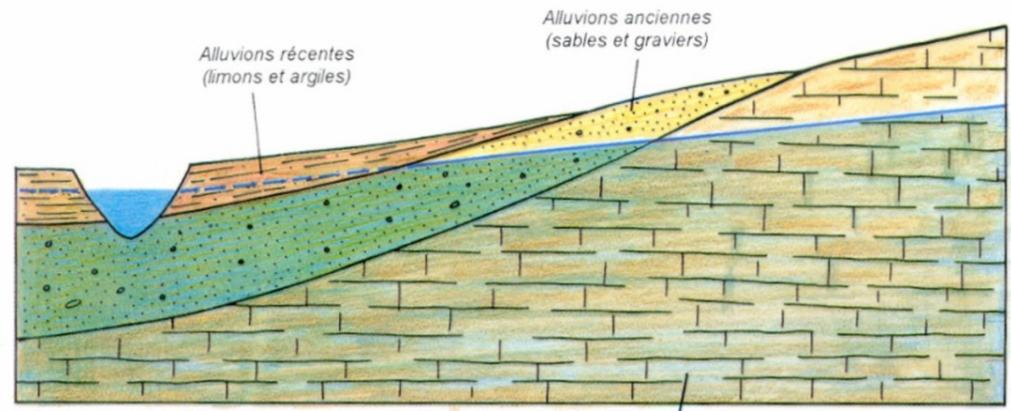
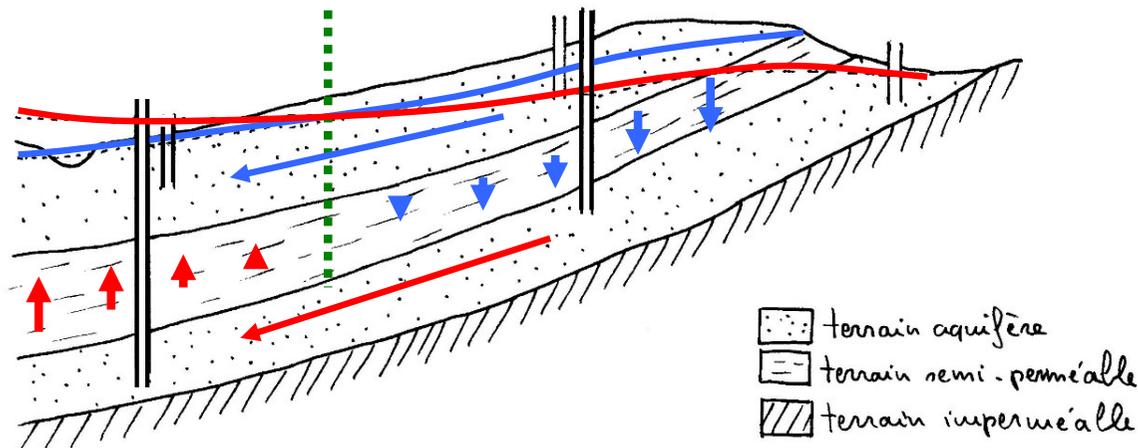


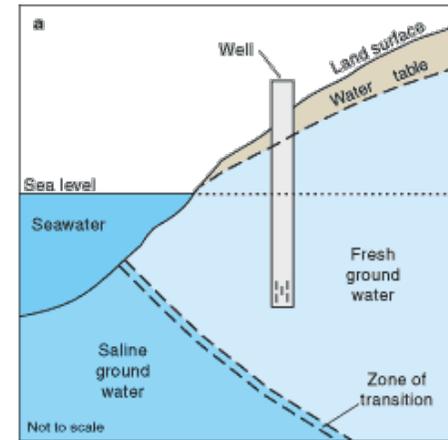
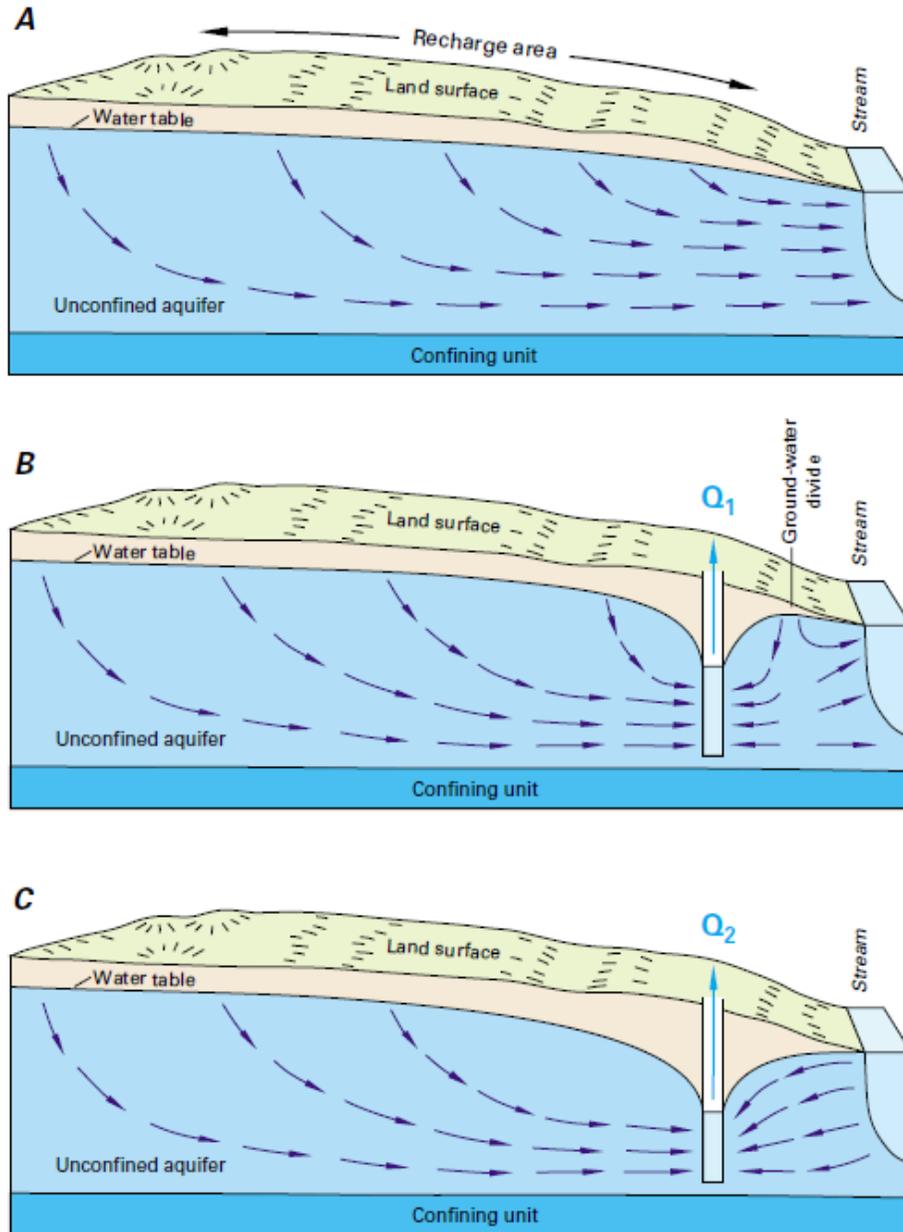
Illustration 20 - Exemple de communication entre la craie et les alluvions



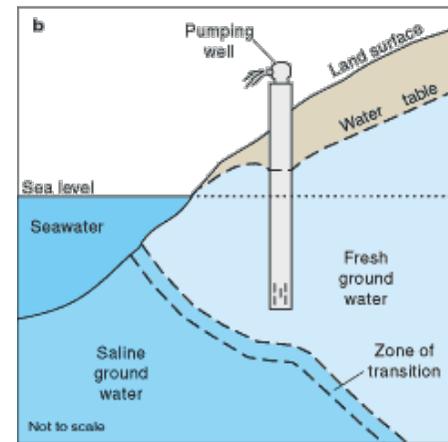
# X. POMPAGE

- Impact sur la relation nappe/eau de surface -

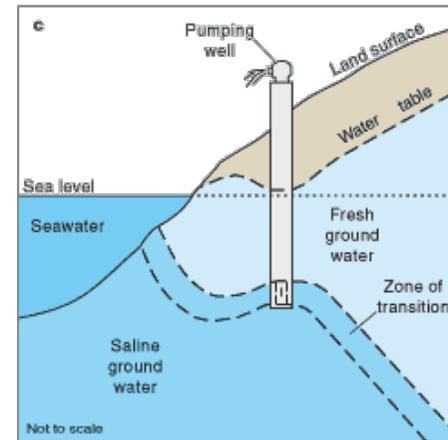
Figure 13. Effects of pumping from a hypothetical ground-water system that discharges to a stream. (Modified from Heath, 1983.)



Nonpumping well in an unconfined (water-table) aquifer under conditions of equilibrium—no intrusion has occurred.



Well pumping from an unconfined (water-table) aquifer—seawater intrusion not affecting salinity of pumped water.



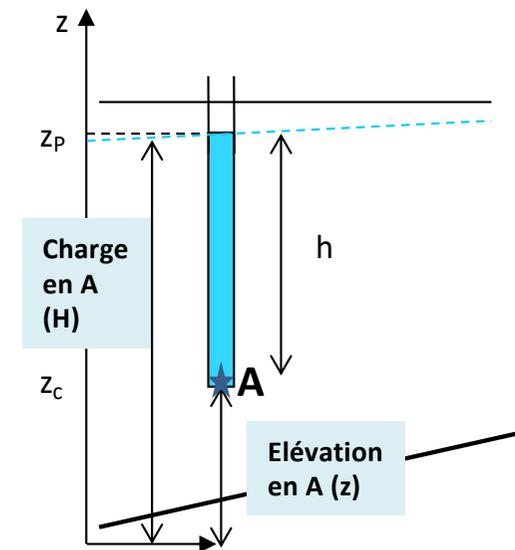
- **Equilibre hydrostatique en milieux poreux saturé**
- **Hydrodynamique en milieux poreux saturé**
  - Charge hydraulique

Hypothèses: fluide incompressible soumis à la seule gravité

$$H = \frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + z \quad \rightarrow \quad H = \frac{P}{\rho g} + z$$

$$\rightarrow \quad H = h + z$$

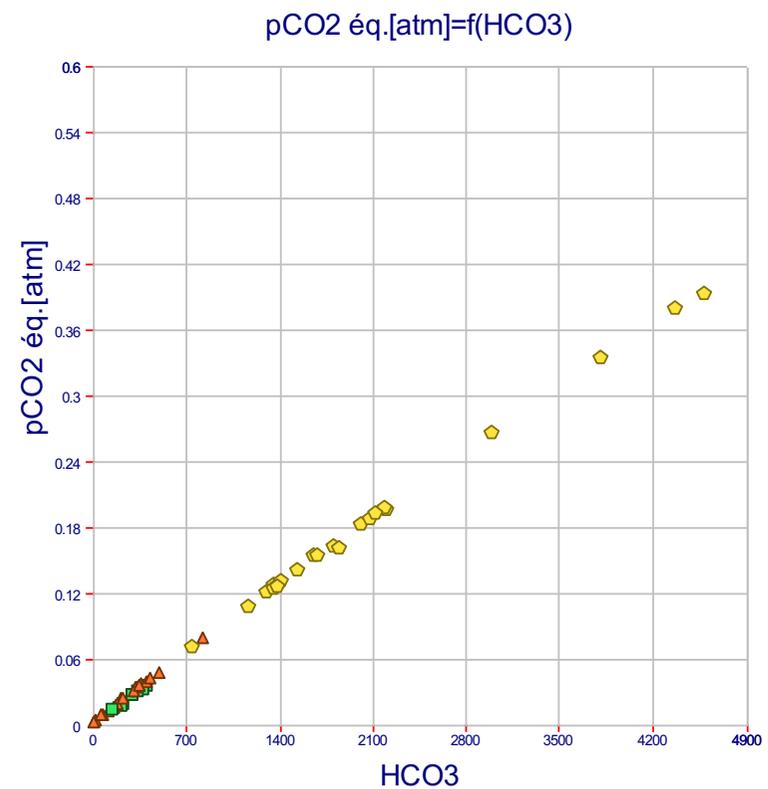
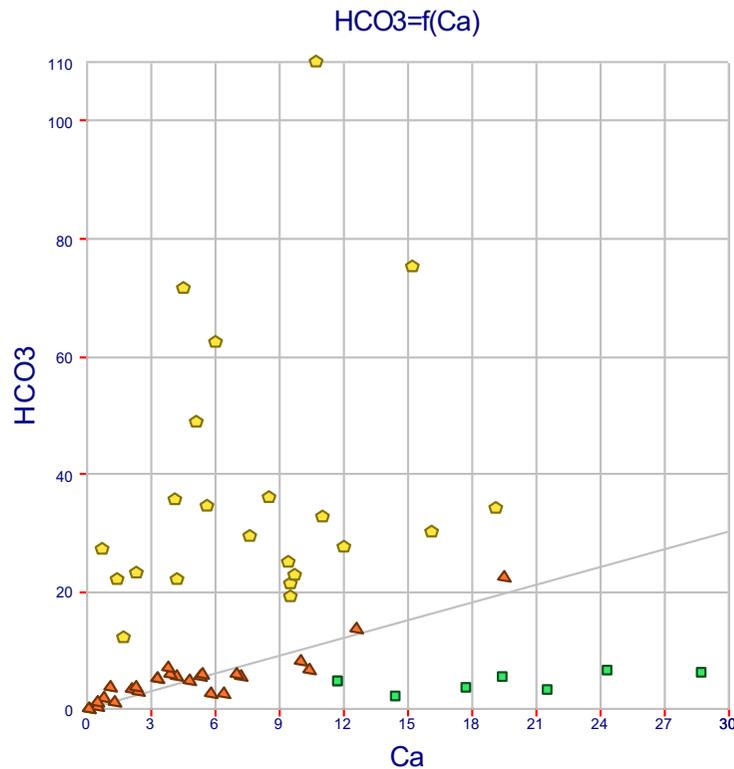
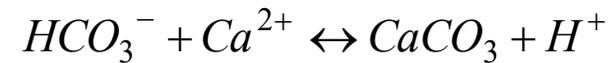
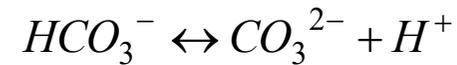
- $v$  : vitesse du fluide
- $z$  : altitude (comptée positivement vers le haut)
- $P$  : pression
- $\rho$  : masse volumique
- $g$  : gravité ( $\approx 9.81 \text{ m.s}^{-2}$ )



## □ Acquisition du chimisme des eaux souterraines

### ► Phénomène de mise en solution (interaction eau/roche)

- Mise en solution des carbonates : équilibres calco-carboniques

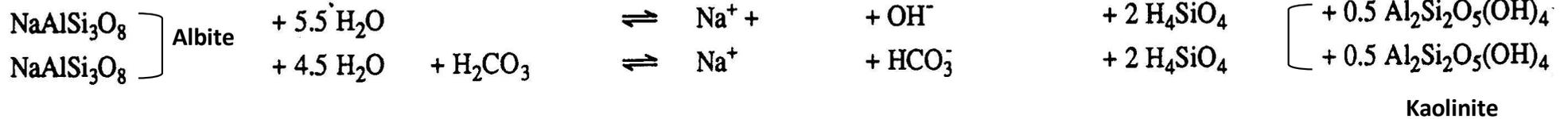


## □ Acquisition du chimisme des eaux souterraines

### ► Phénomène de mise en solution (interaction eau/roche)

- Hydrolyse des silicates

*Feldspath*



Kaolinite

(d'après Sigg et al., 1992)



Caractérisée par:

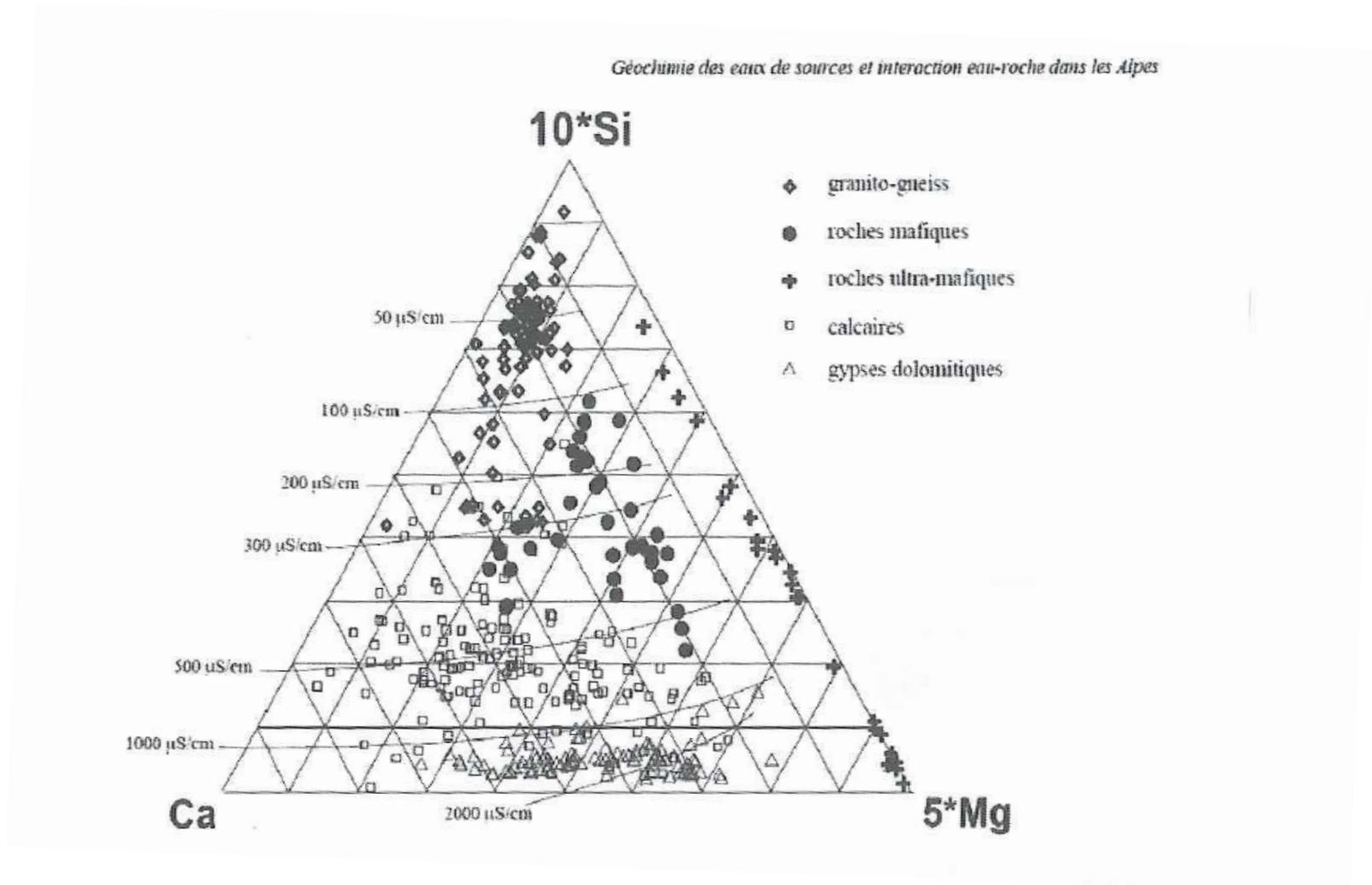
- le produit de solubilité  $K_s$

- l'indice de saturation

IS > 0 : sur saturation

IS < 0 : sous saturation

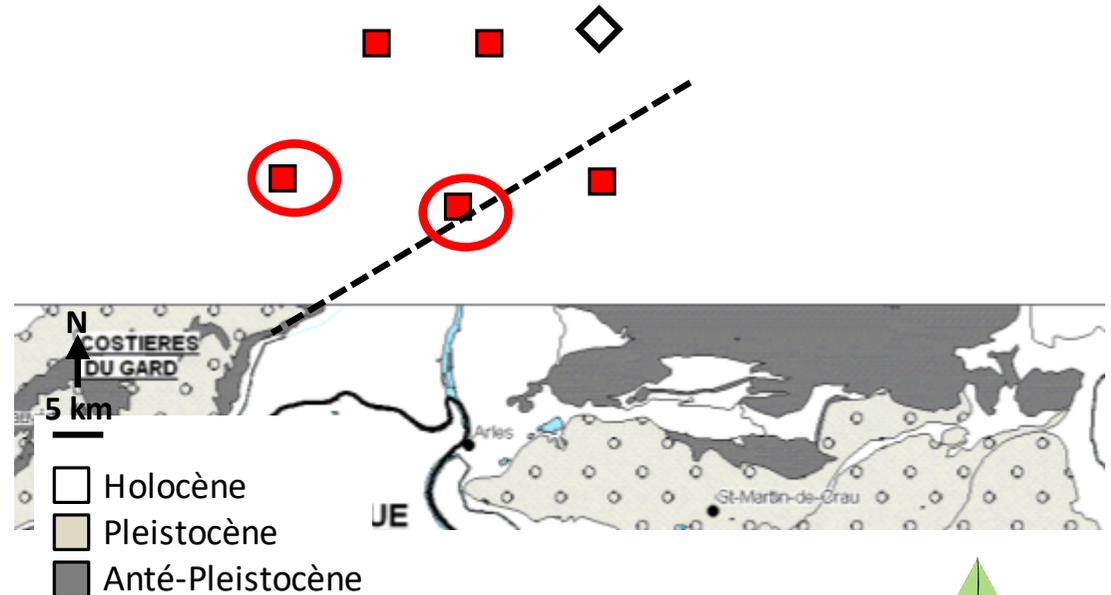
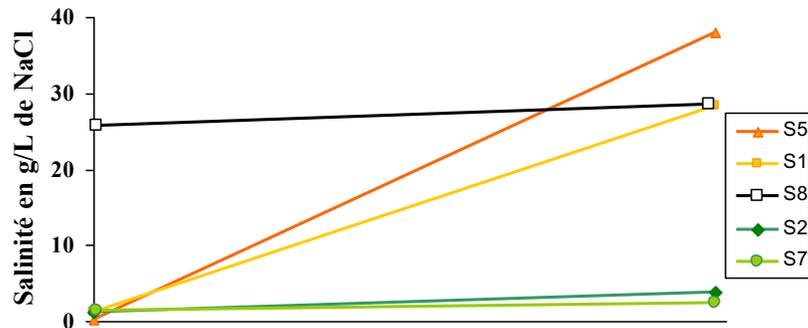
□ Que contient les eaux souterraines?



► Minéralisation des eaux en fonction du type de roche encaissant

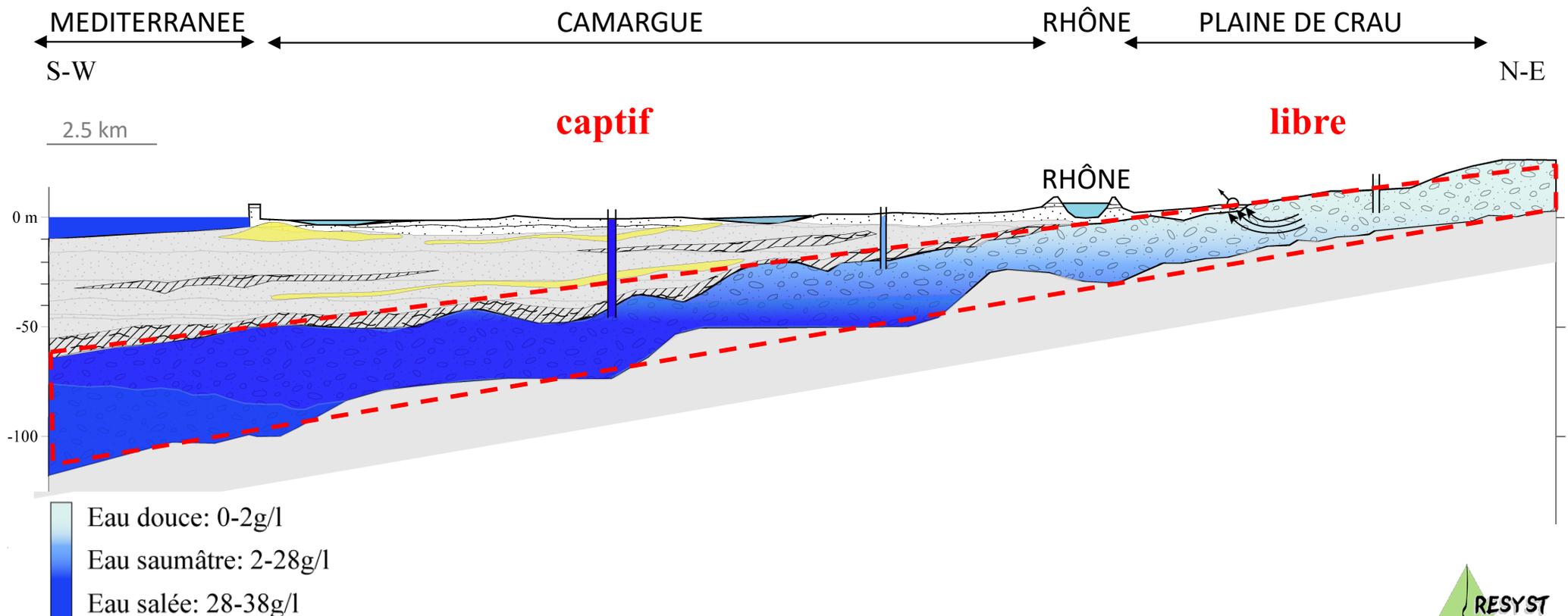
# Exemple de traçage naturel: L'aquifère de Camargue

- Origines de la salinité?
    - Aquifère superficiel sur salé
    - Intrusion marine active : impact anthropique
    - Transgression marine Holocène : salinité héritée
- ⇒ datation  $^{14}\text{C}$



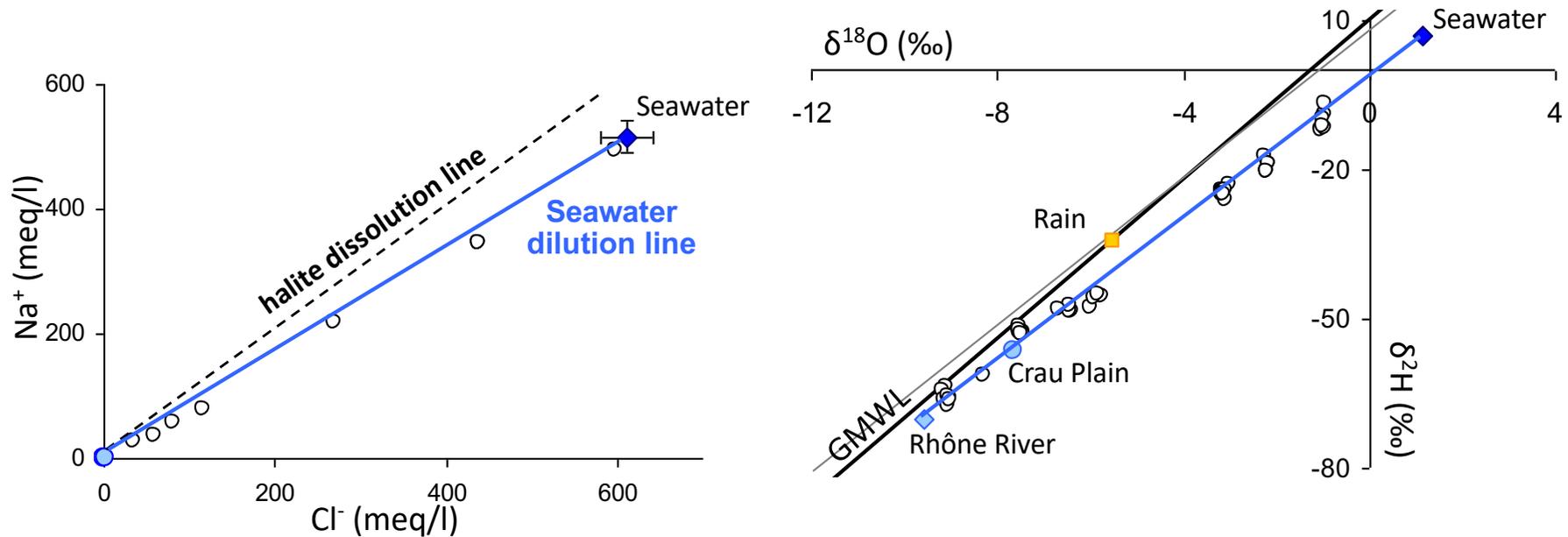
# L'aquifère de Camargue - *Contexte hydrogéologique*

- Structure en 3 unités caractéristique des deltas méditerranéens
  - Cailloutis fluviaux calcaires  $\Rightarrow$  Aquifère étudié
  - Cône transgressif riche en MOS  $\Rightarrow$  Imperméable, source de CO
  - Unité superficielle  $\Rightarrow$  Zones aquifères hétérogènes salées à sur-salées



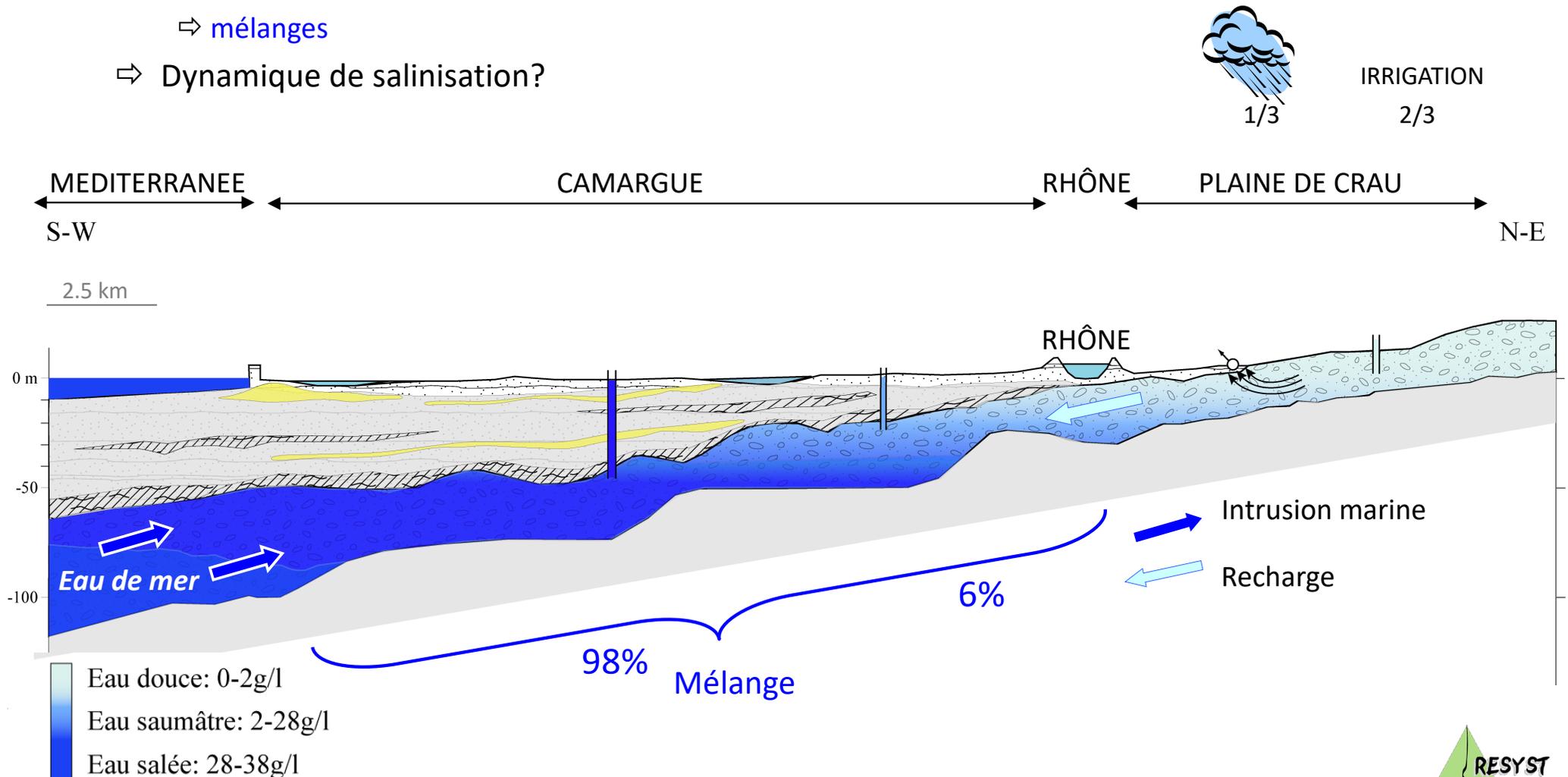
# L'aquifère de Camargue - *Contexte hydrogéologique*

- Caractérisation des écoulements, processus de recharge et mélanges
  - Majeurs,  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$



# L'aquifère de Camargue - Contexte hydrogéologique

- Caractérisation des écoulements, processus de recharge ?
  - Majeurs,  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$
  - ⇒ mélanges
- ⇒ Dynamique de salinisation?



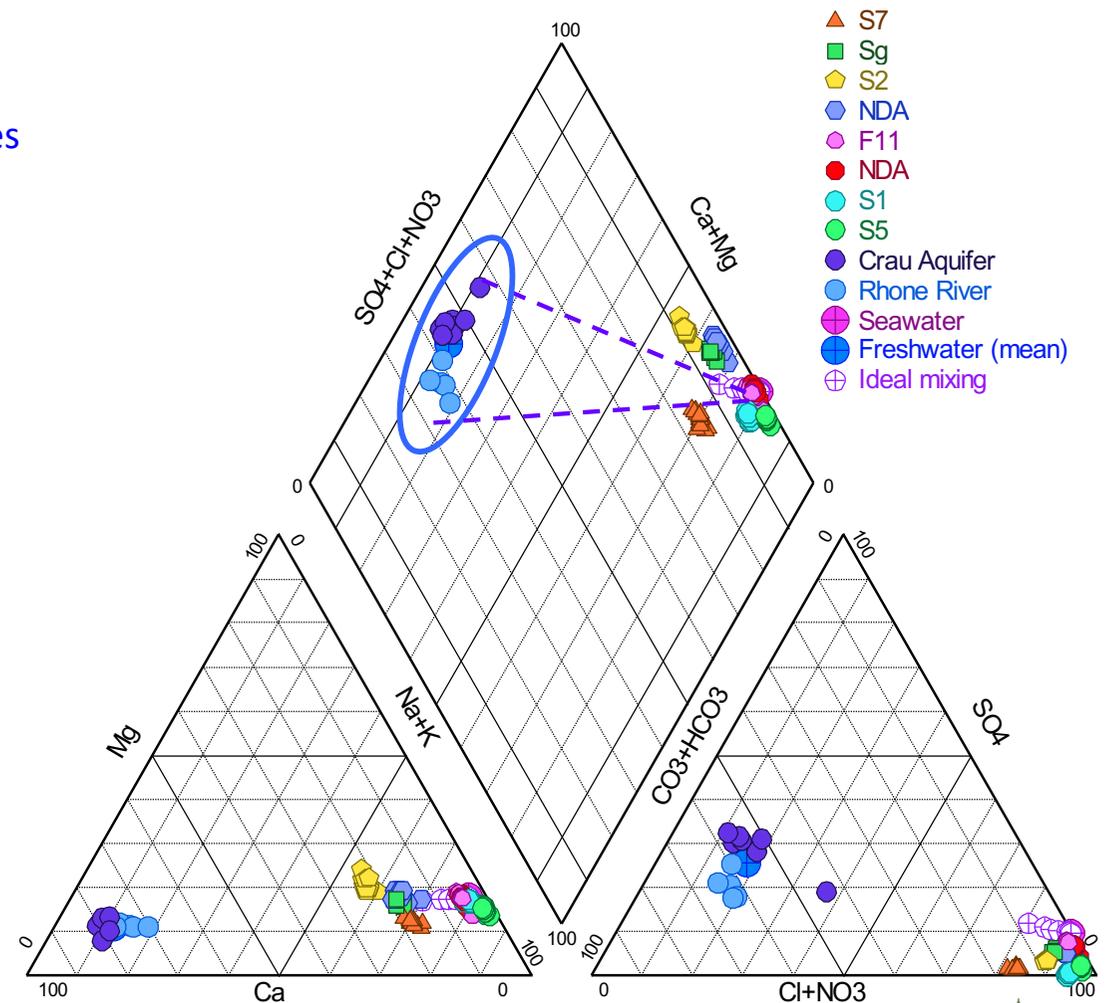
# L'aquifère de Camargue - *Contexte hydrogéologique*

- Caractérisation des écoulements, processus de recharge et mélanges

- Majeurs,  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$

- ⇒ Mélanges

- ⇒ Ecart par rapport à un mélange à 2 pôles



# L'aquifère de Camargue - *Contexte hydro*

- Caractérisation des écoulements, processus de recharge?
  - Majeurs,  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$

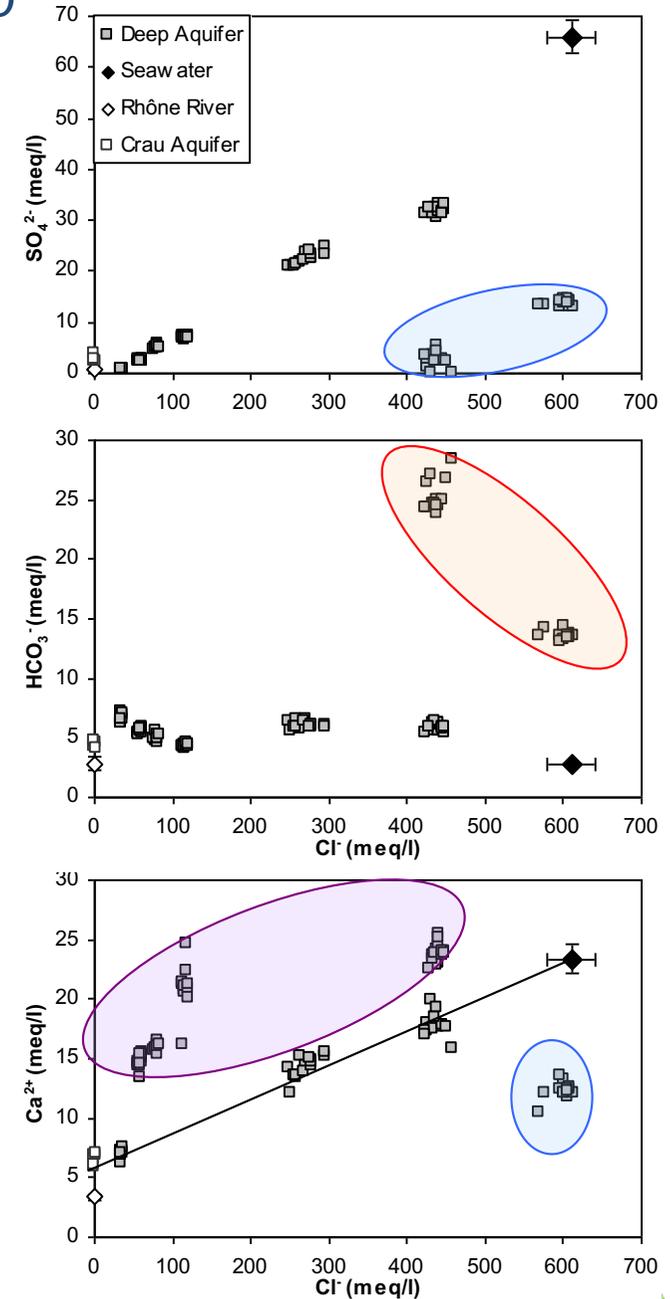
$\text{Cl}^-$   $\Rightarrow$  élément conservatif

Rapports ions/ $\text{Cl}^-$   $\Rightarrow$  mise en évidence des interactions eau/roche

Fonction du degré de salinité:

- échange de cations Na/Ca
- sulfato-réduction
- précipitation des carbonates

↓  
salinité  
croissante



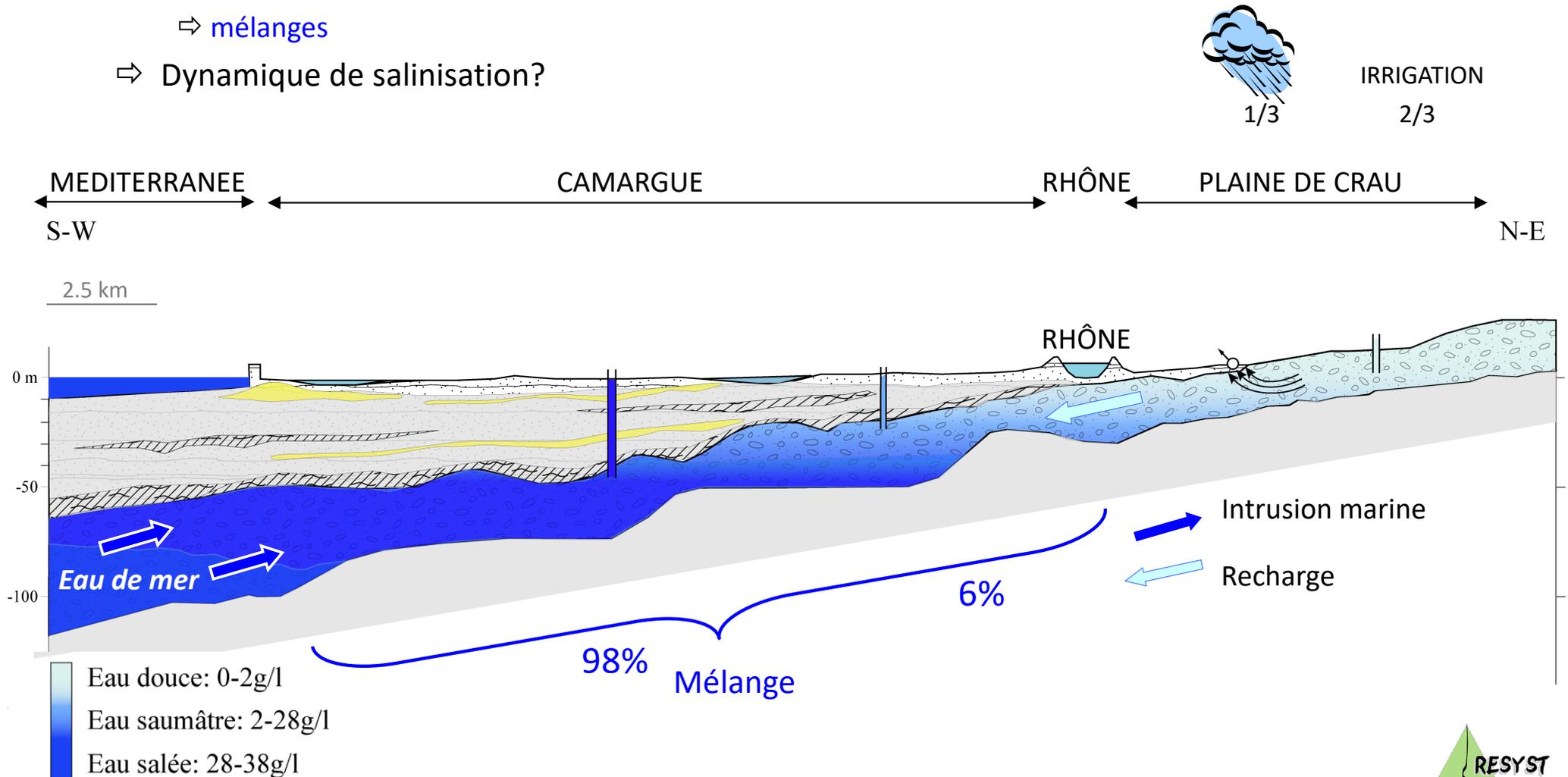
# L'aquifère de Camargue - Contexte hydrogéologique

- Caractérisation des écoulements, processus de recharge ?

- Majeurs,  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$

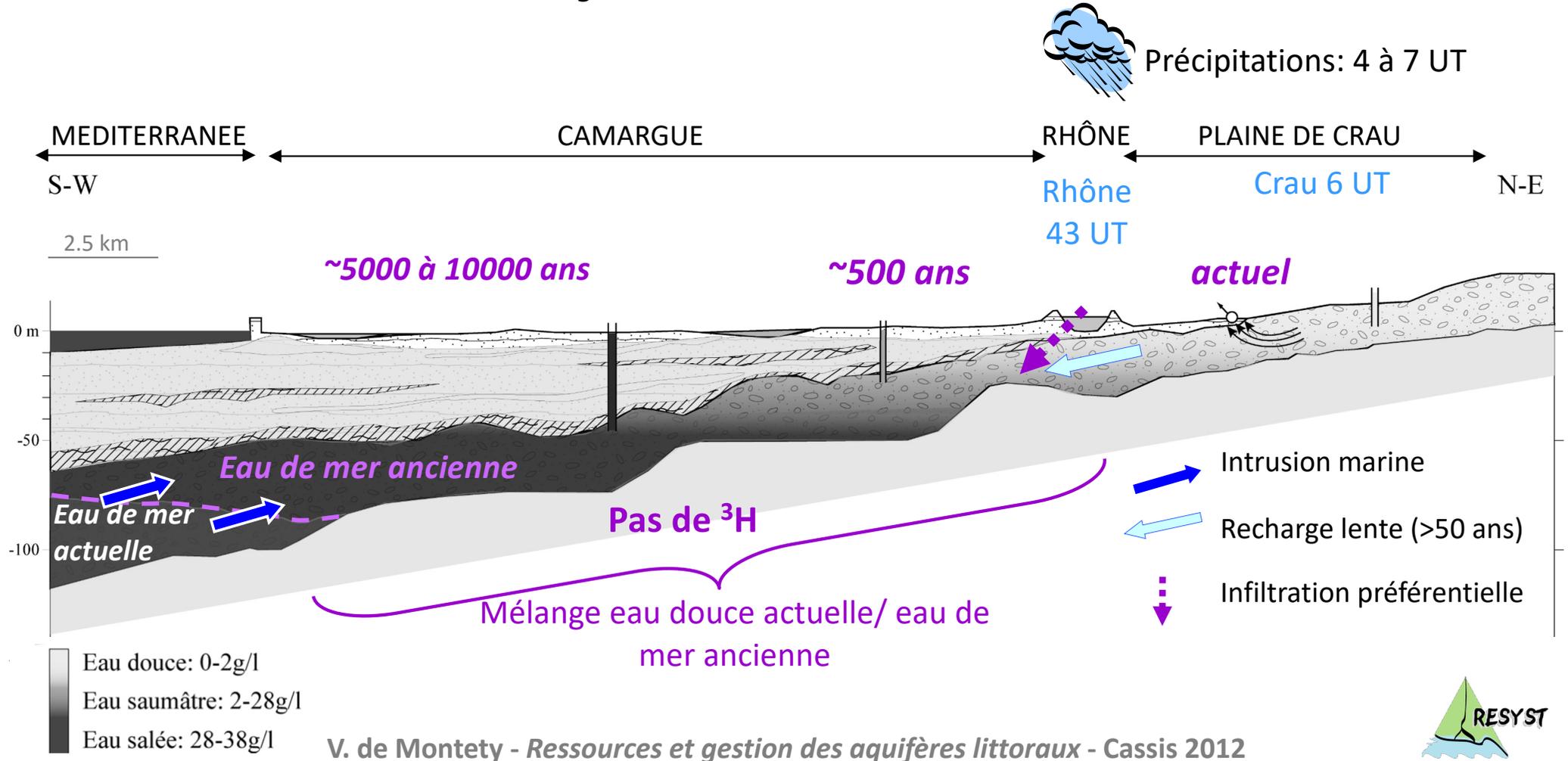
- ⇒ mélanges

- ⇒ Dynamique de salinisation?



# Dynamique de salinisation - 1. Facteur géologique

- Temps moyen de séjour -  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ 
    - Hydrodynamique, absence de  $^3\text{H}$   $\Rightarrow$  circulation lente
- $\Rightarrow$  Salinisation héritée de la transgression marine Holocène

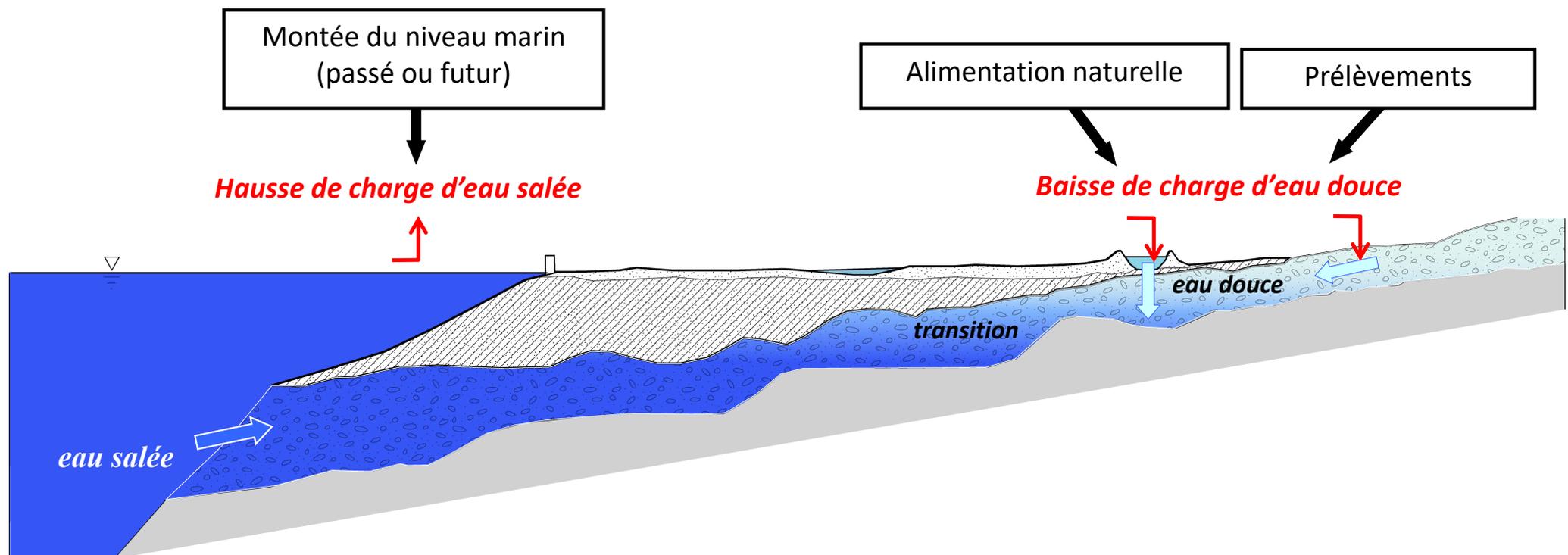


## II. Protection des eaux souterraines

### 1. Origine des contaminants des eaux souterraines

#### ► Naturelle

- Dissolution d'évaporites (plusieurs g/l de  $\text{SO}_4^{2-}$ )
- Mise en solution de métaux indésirables en milieu réducteur
- Intrusion marine



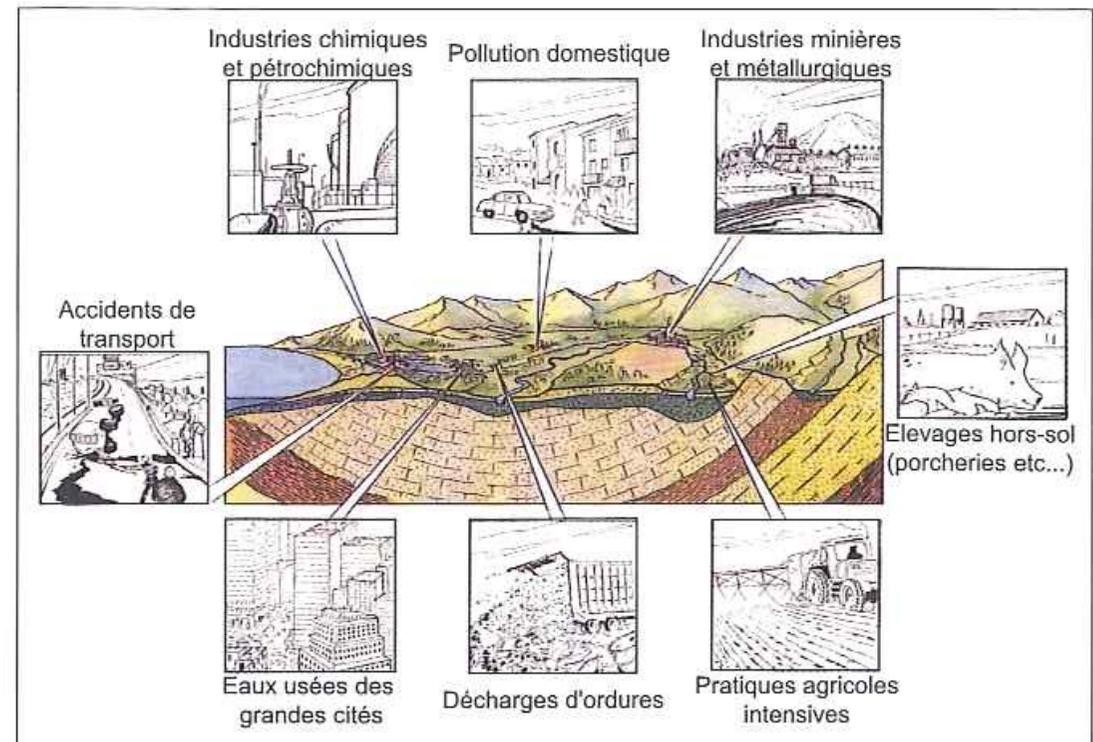
## 1. Origine des contaminants des eaux souterraines

### ► Naturelle

- Dissolution d'évaporites (plusieurs g/l de  $\text{SO}_4^{2-}$ )
- Mise en solution de métaux indésirables en milieu réducteur
- Intrusion marine

### ► Anthropique

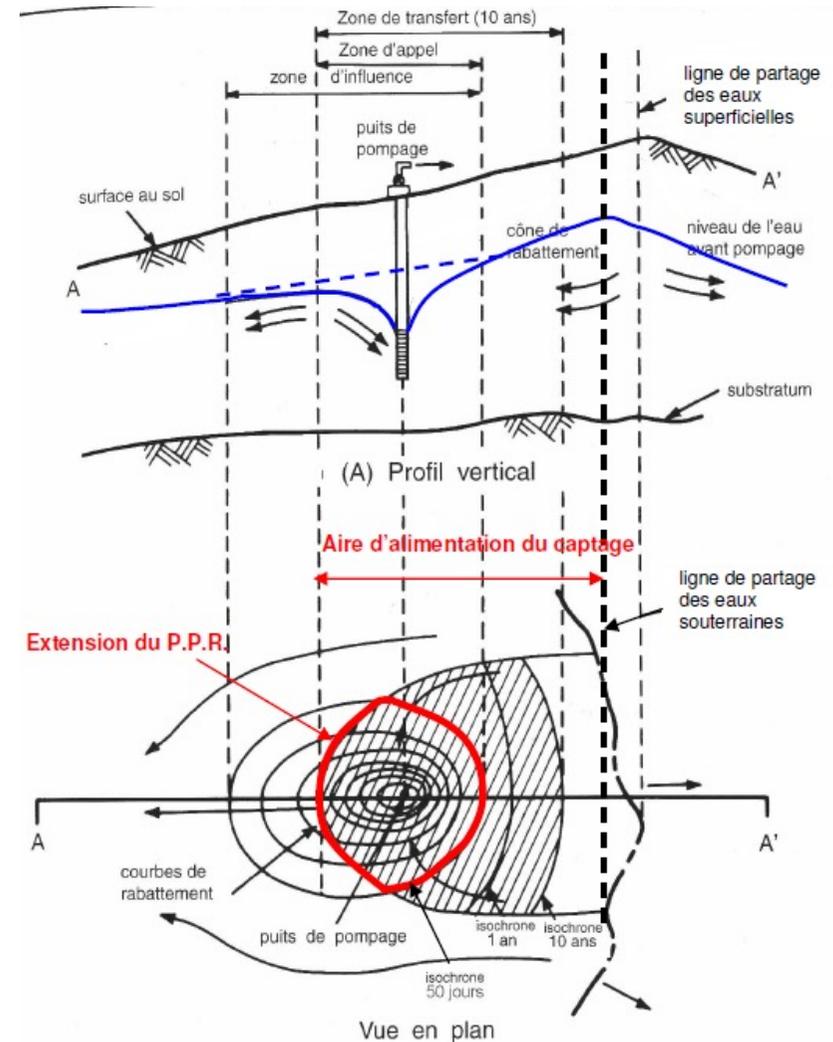
- Domestique/Urbaire/Industrielle/agricole
- Ponctuelle/Diffuse



► Cartographie de la vulnérabilité

**a.1. Délimitation de la portion de nappe alimentant le captage (PNAC)**

- Source = BV souterrain
- Forage = AAC
  - Zone d'influence
  - Zone d'appel
  - Aire d'Alimentation du Captage



LEGENDE

- ▨ Zone de transfert de 10 ans
- ▽ Surface de la nappe
- Direction d'écoulement
- Puits de pompage

Le schéma n'est pas à l'échelle

Exemple d'une nappe alluviale homogène (Manuel et méthodes, n° 33, BRGM, 1999)

► Cartographie de la vulnérabilité

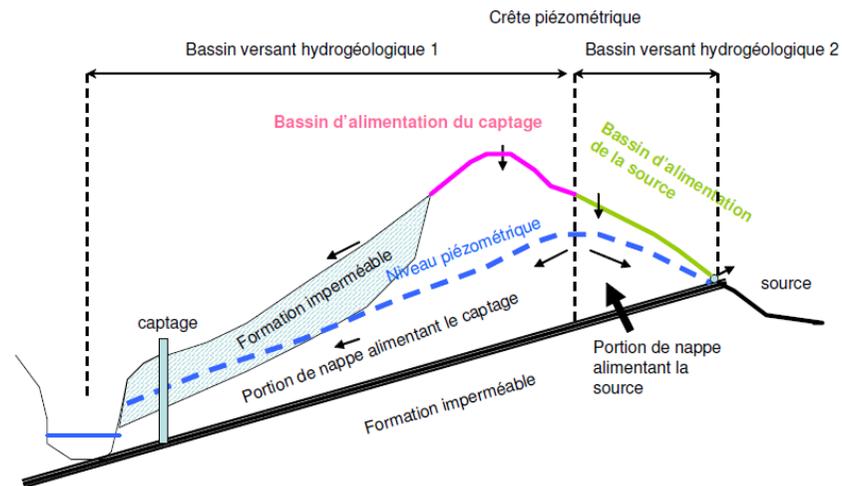
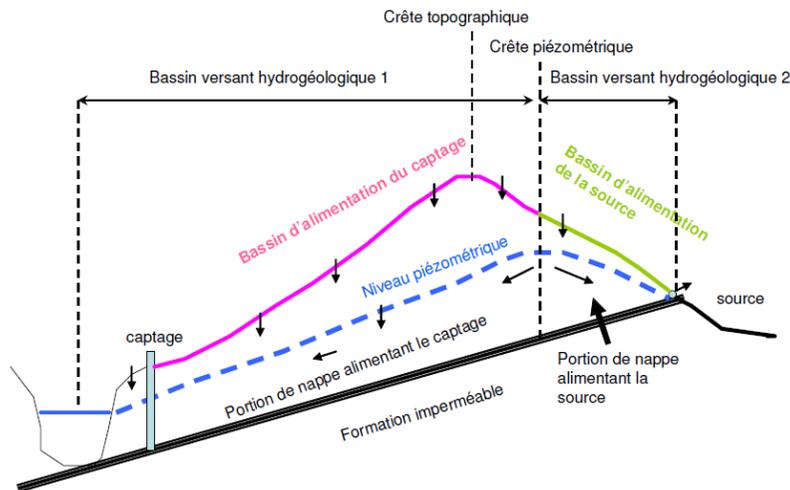
**a.2. Délimitation du BAC**

Identification de la zone en surface susceptible d'influer sur la qualité de l'eau du captage

+/- la projection en surface de la PNAC

Dépend:

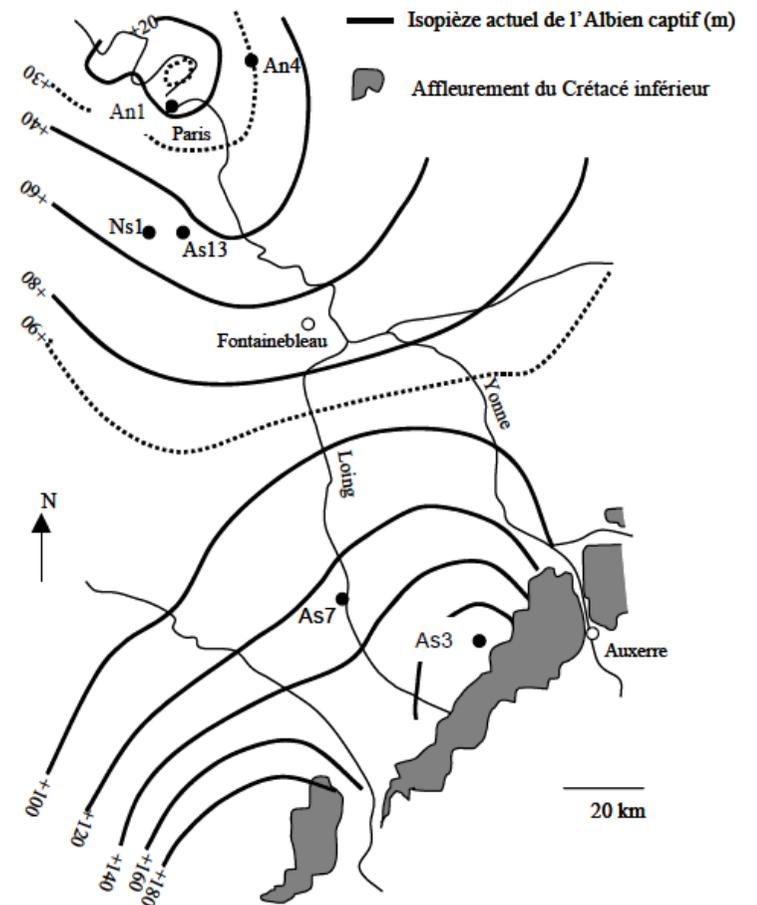
- Du type de nappe
- Des conditions aux limites



## ❑ Facteurs influençant la composition chimique de l'eau

- ▶ Fonction du temps de contact

Combien de temps l'eau met pour aller de la zone de recharge à Paris?



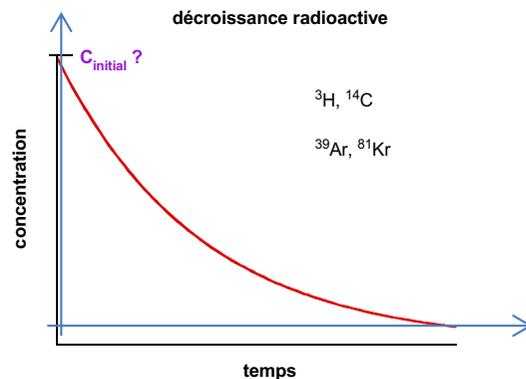
## □ Facteurs influençant la composition chimique de l'eau

### ► Fonction du temps de contact

#### Traceurs isotopiques

Combien de temps l'eau met pour aller de la zone de recharge à Paris?

Estimation du temps moyen de séjour par le  $^{14}\text{C}$



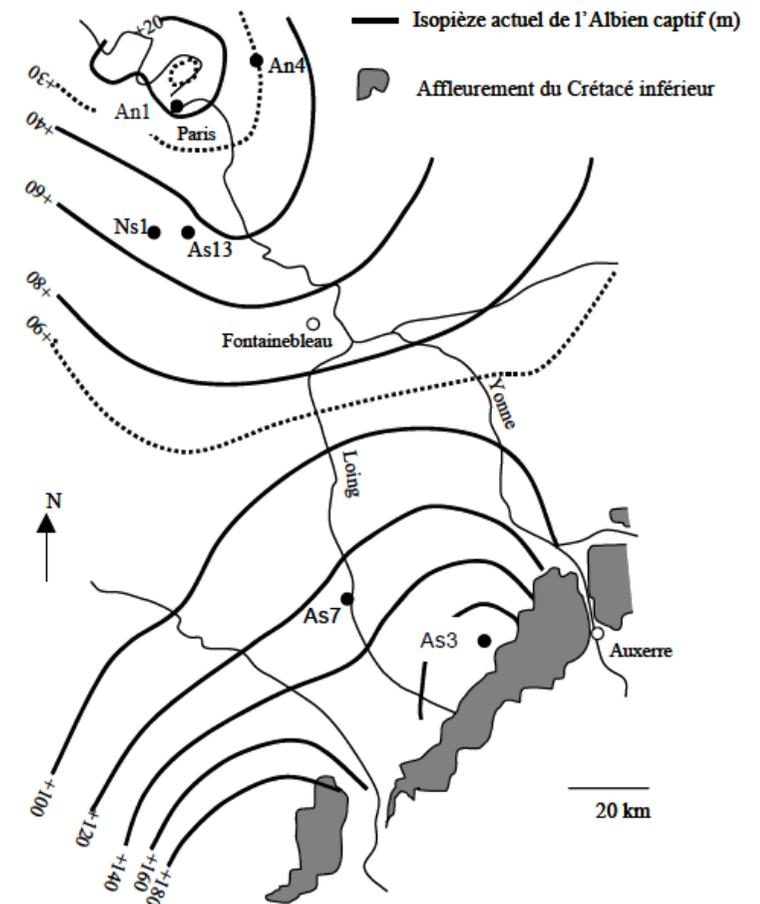
$$^{14}\text{C}_t = ^{14}\text{C}_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T}t} \Leftrightarrow t = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \ln \left( \frac{^{14}\text{C}_0}{^{14}\text{C}_t} \right)$$

Avec  $t$  : temps moyen de séjour de l'eau ou **Age apparent**

$T_{1/2}$  : période de demi-vie = 5730 ans

$a_0$  : activité initiale

$a_t$  : activité résiduelle i.e. activité mesurée



Facteurs influençant la composition chimique de l'eau

Fonction du temps de contact

Estimation du temps moyen de séjour par le <sup>14</sup>C

Traceurs isotopiques

$$^{14}C_t = ^{14}C_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T}t} \Leftrightarrow t = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \ln \left( \frac{^{14}C_0}{^{14}C_t} \right)$$

Avec t : temps moyen de séjour de l'eau ou **Age apparent**

T<sub>1/2</sub> : période de demi-vie

a<sub>0</sub> : activité initiale

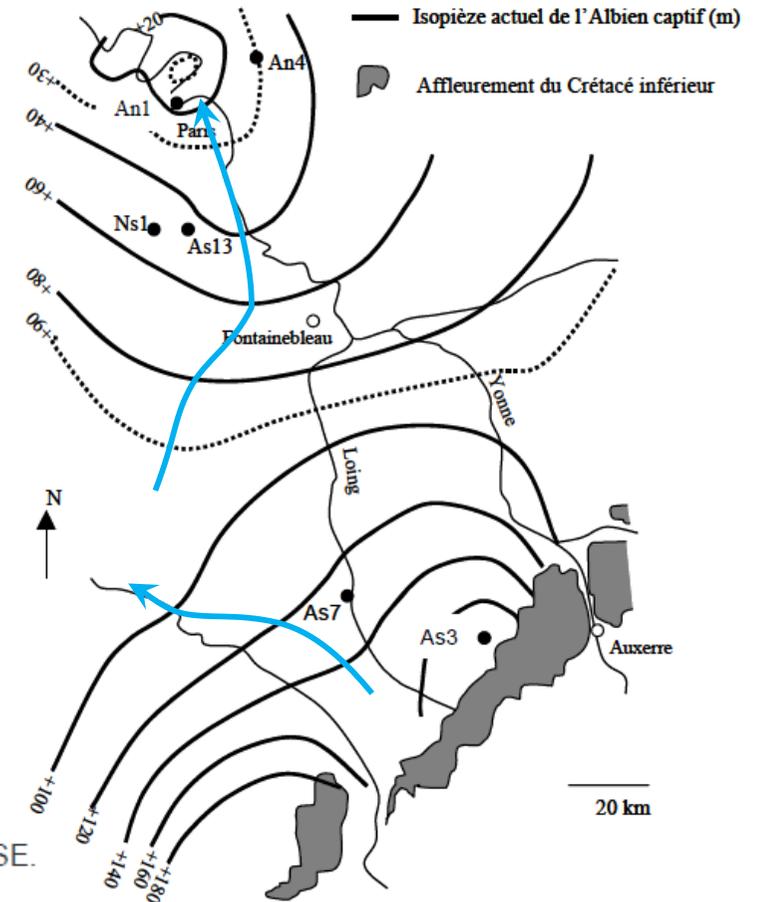
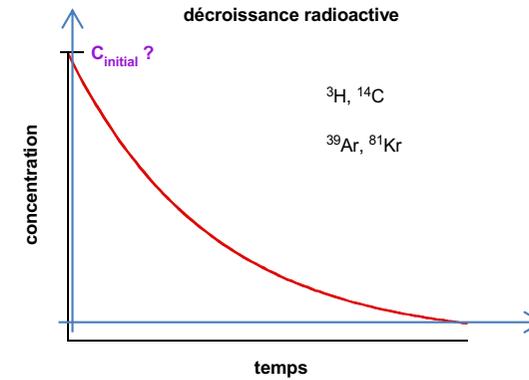
a<sub>t</sub> : activité résiduelle i.e. activité mesurée

On doit corriger les âges obtenus :

- Interaction avec les carbonates  
CaCO<sub>3</sub> ↔ Ca<sup>2+</sup> + 2HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> : **activité <sup>14</sup>C = 0 pcm**
- Remontée de CO<sub>2</sub> : **a<sub>CO2-magmatique</sub> = 0 pcm**

Utilisation du <sup>13</sup>C

Puits	At	t	T corrigé
As3	72,4 pcm	2 600 ans	<b>500 +/- 900 ans</b>
As7	21,6 pcm	12 600 ans	<b>10 800 +/-1000 ans</b>
As13	1,3 pcm	35 800 ans	<b>30 500 +/- 5200 ans</b>



Il existe donc une recharge de la nappe à partir des affleurements des sables albiens du SE.