



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



WEBINAIRE ZOOM DE LA SHF



Geosciences pour une Terre durable

brgm

COMPRENDRE LA DYNAMIQUE DE REMPLISSAGE DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINE

Transfert de pression et transport de masse, quels processus dans quels contextes ?

Benjamin Lopez - BRGM

Vendredi 14 juin – 11h00 – 12h00



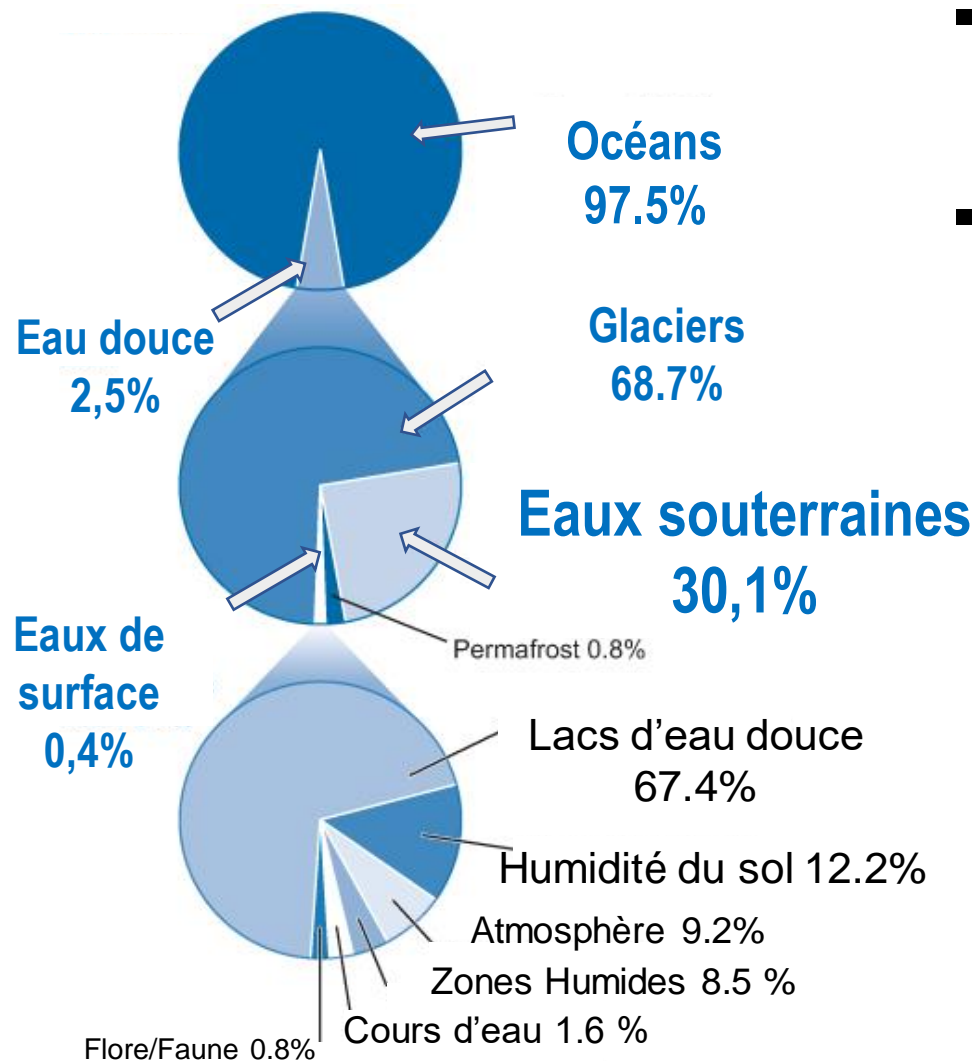
Les eaux souterraines forment un milieu inertiel et capacitif

⇒ Ces propriétés rendent spécifiques leurs gestions quantitative et qualitative

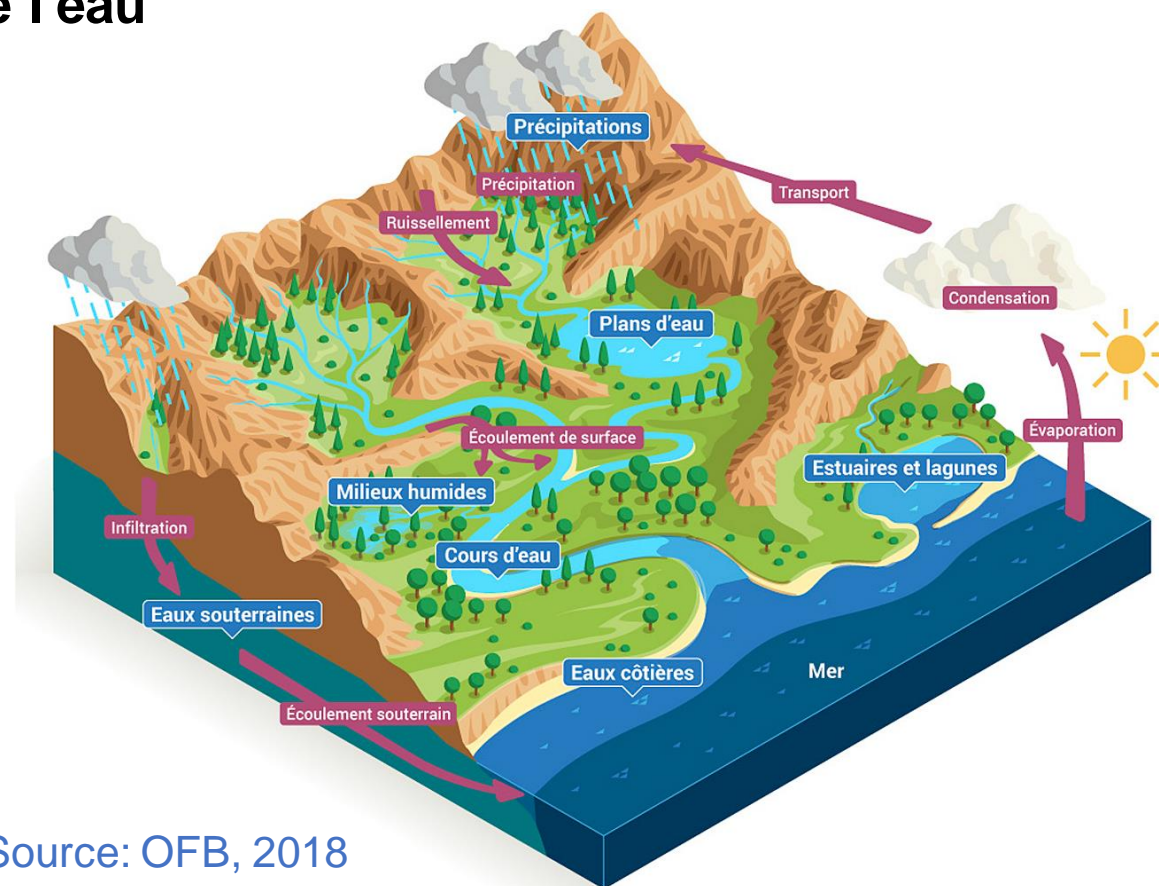
Les vitesses de circulation de l'eau, des pressions et des polluants sont différentes entre elles et selon les contextes hydrogéologiques

« Ce n'est pas directement l'eau de pluie tombée la veille qui se retrouve dans le puits dans lequel le niveau d'eau monte ! »

Répartition de l'eau sur la planète



- **Eaux souterraines** = 30 % des 2,5 % d'eaux douces de la planète bleue : la seconde ressource d'eau douce après les glaciers
- Ressource reconstituée par **l'infiltration** dans le sol des précipitations et/ou des échanges avec les cours d'eau : **cycle de l'eau**



Le cycle de l'eau et les eaux souterraines

Entrées

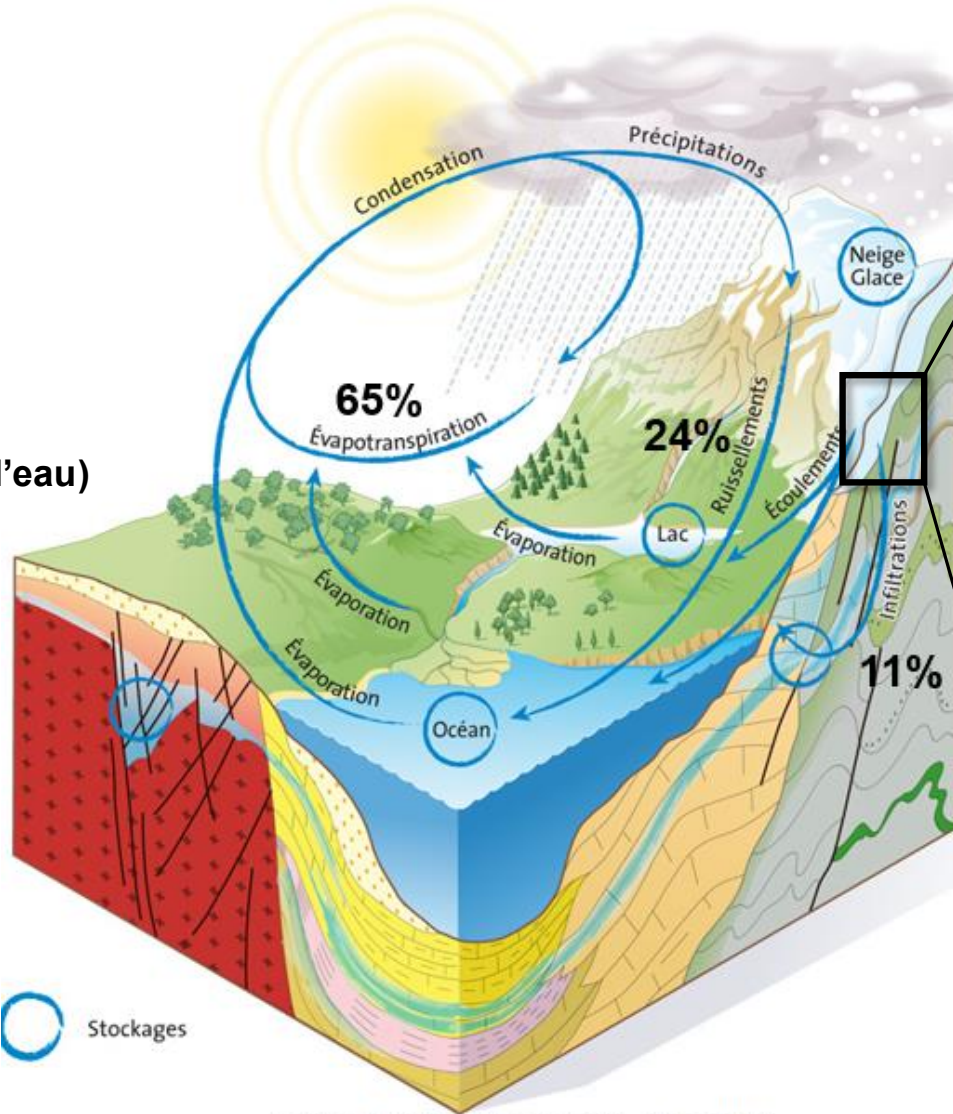
Pluie

Sorties

Evaporation

Ruissellement (cours d'eau)

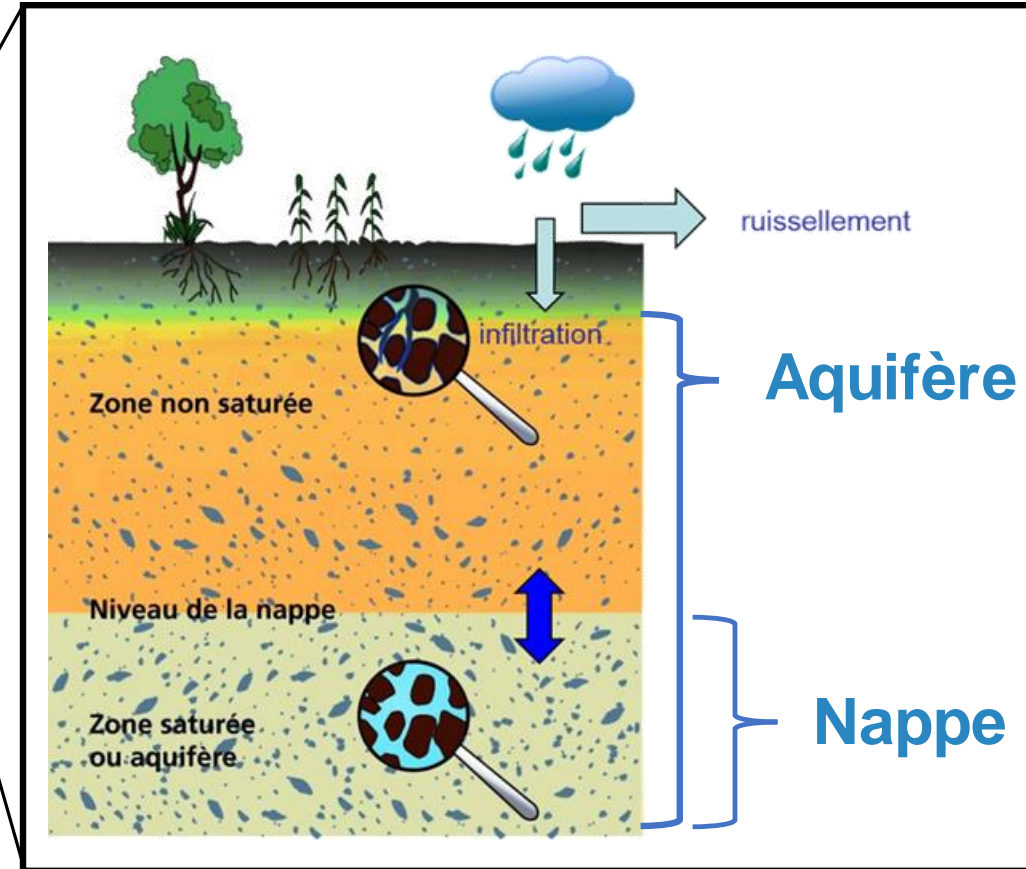
Infiltration (nappes)



Stockages

Le cycle de l'eau terrestre © BRGM - Michel Villey

Définitions



<https://sigessn.brgm.fr/>

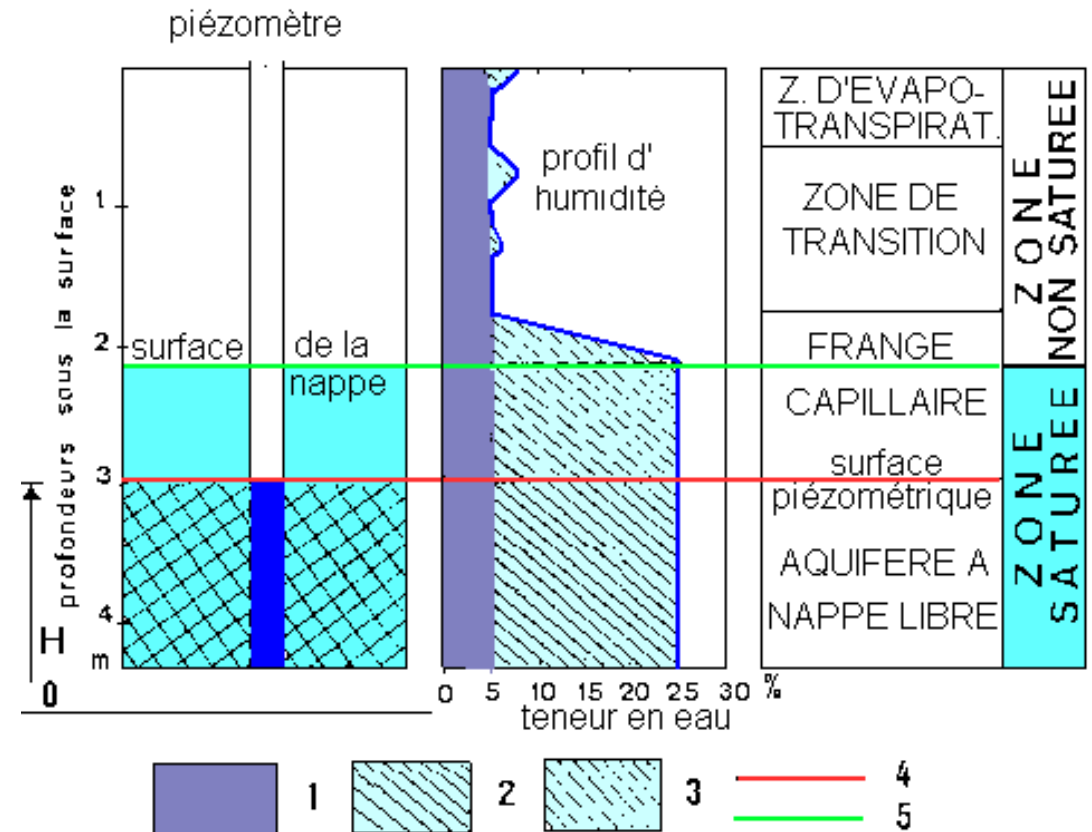
Zone non saturée de l'aquifère

- **La zone non saturée (ZNS)** : zone du sous-sol comprise entre la surface du sol et la surface d'une nappe libre. A cet endroit, la quantité d'eau gravitaire est temporaire, en transit.
- **Zone d'évapotranspiration** : importantes variations de la saturation en eau
- **Zone de transition** : teneur en eau = capacité de rétention du sol
- **Frange capillaire** qui, en plus de la percolation *per descendum* (recharge) correspond à l'eau de la nappe qui remonte par ascension capillaire



Déclenchement de l'écoulement *per descendum* uniquement si continuité hydraulique

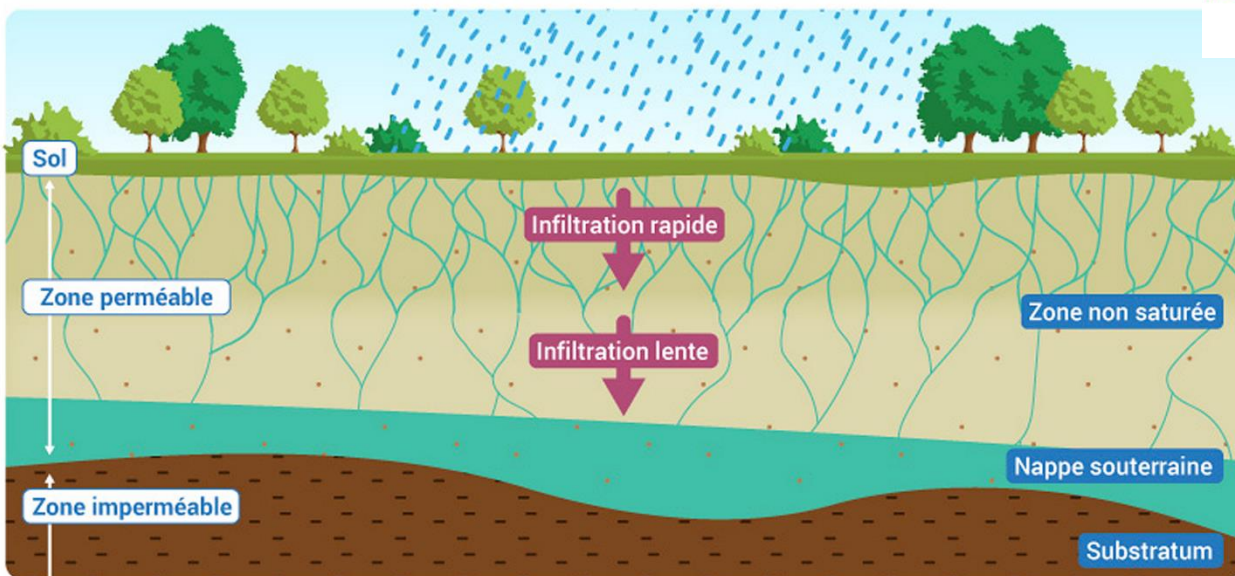
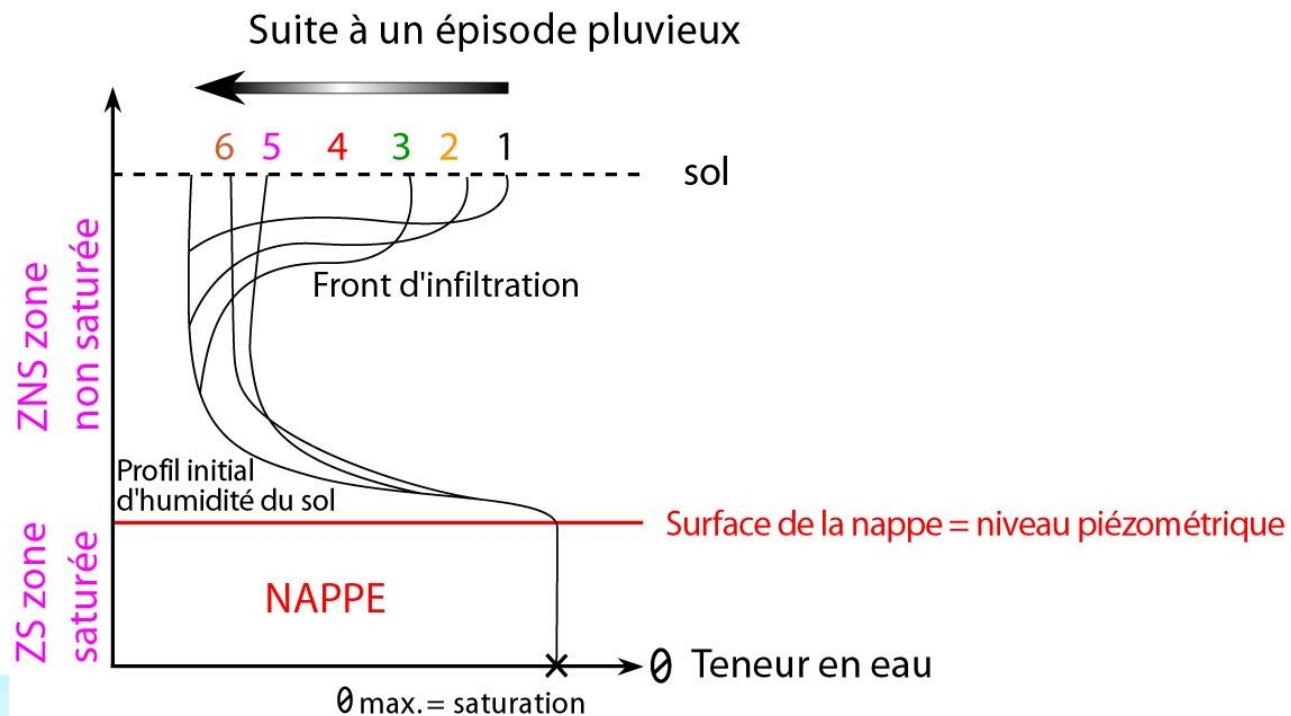
➔ RECHARGE



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

Que se passe-t-il quand l'eau de pluie atteint le sol ?

- L'écoulement par excès d'infiltration apparaît lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité maximale du sol à absorber l'eau
- Descente progressive du front d'infiltration dans la ZNS
- La teneur en eau augmente, des connexions hydrauliques se créent, l'écoulement gravitaire s'installe



Compétition dans le sol et la ZNS entre l'eau qui remonte vers l'atmosphère, l'eau retenue sur la phase solide et l'eau qui descend vers la nappe par gravité



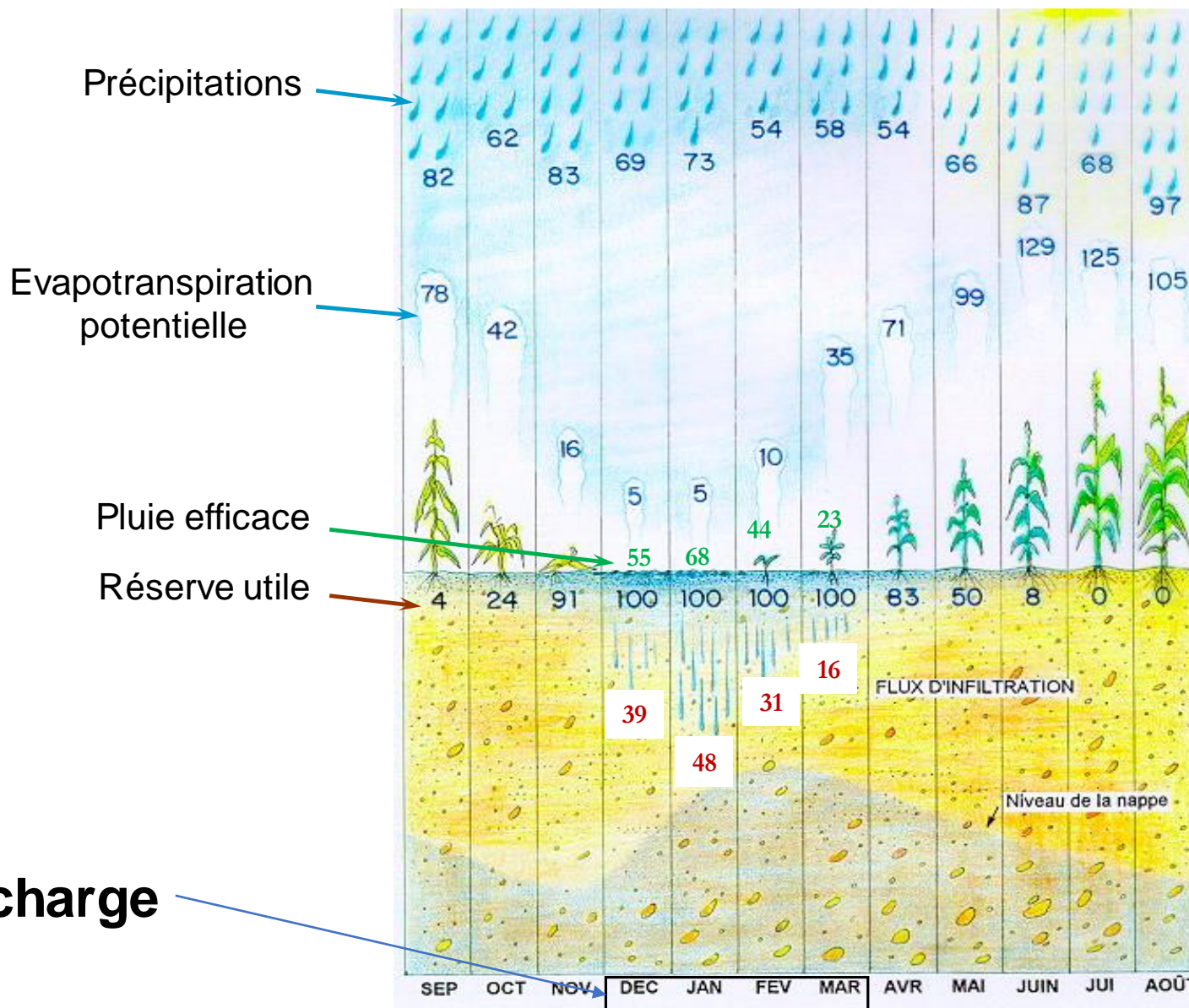
Effet retard

Source : eaufrance.fr

Recharge des nappes

= Flux d'eau qui percole dans la roche pour atteindre un aquifère et constituer un apport au stock d'eau souterraine qu'il contient

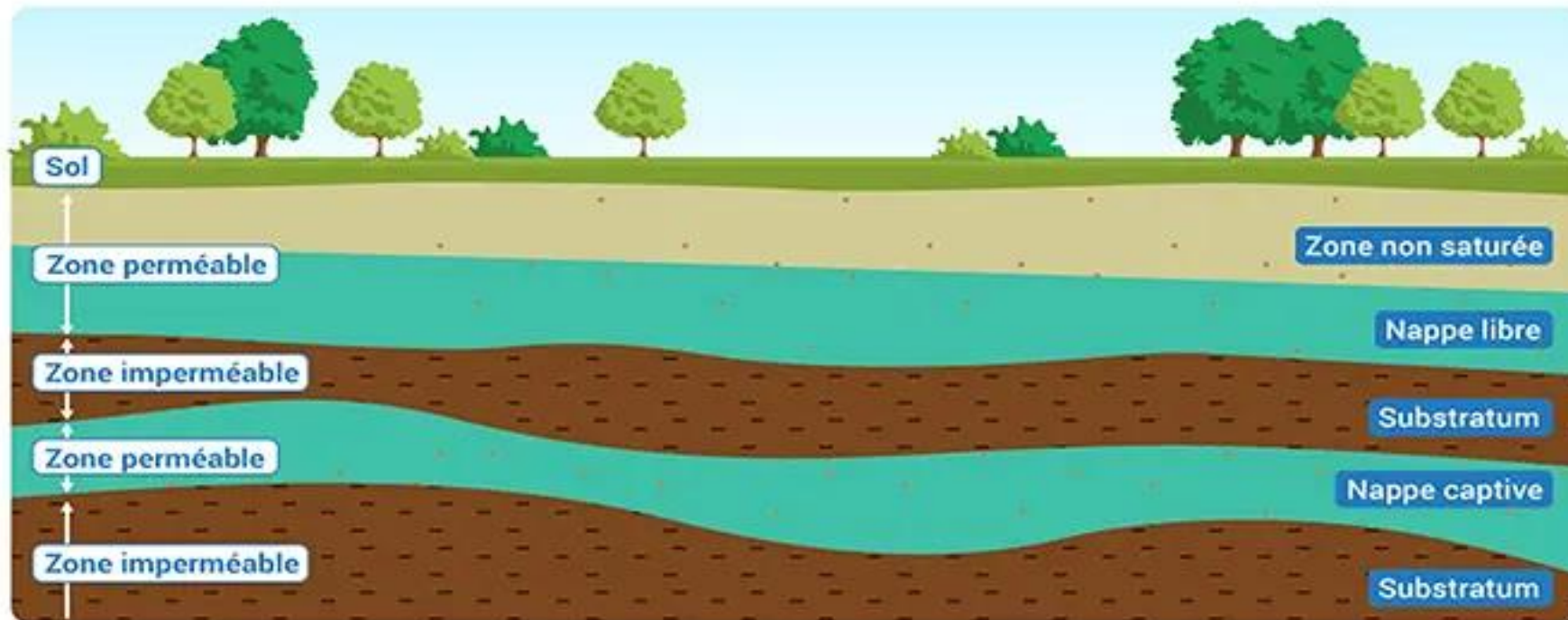
(Vries and Simmers, 2002)



Période de recharge

Zone saturée de l'aquifère

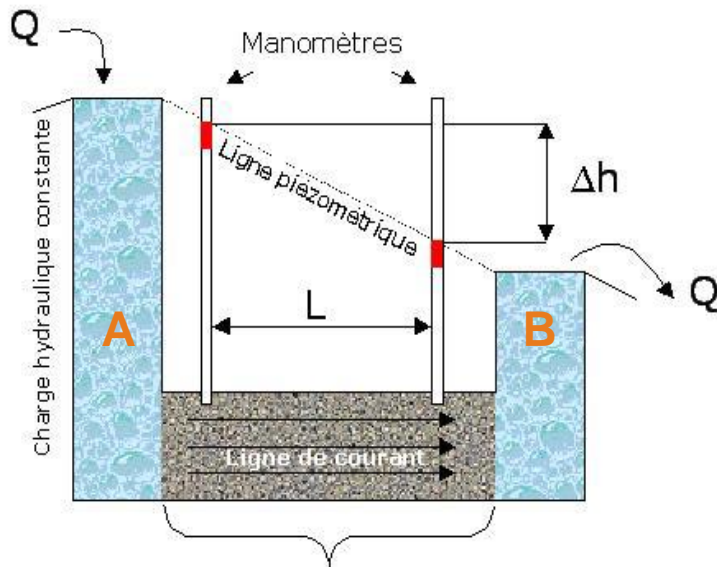
- La **zone saturée (ZS)** de l'aquifère est la nappe d'eau souterraine. C'est la partie de l'aquifère où l'ensemble des vides de la roche perméable est occupé par de l'eau et dont **toutes les parties sont en « liaison hydraulique »** (*Margat et Castany*)
- La zone saturée est suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre **l'écoulement significatif d'une nappe souterraine** et le captage de quantités d'eau appréciables (*G. de Marsily*)



Source : eaufrance.fr

Circulation des eaux souterraines

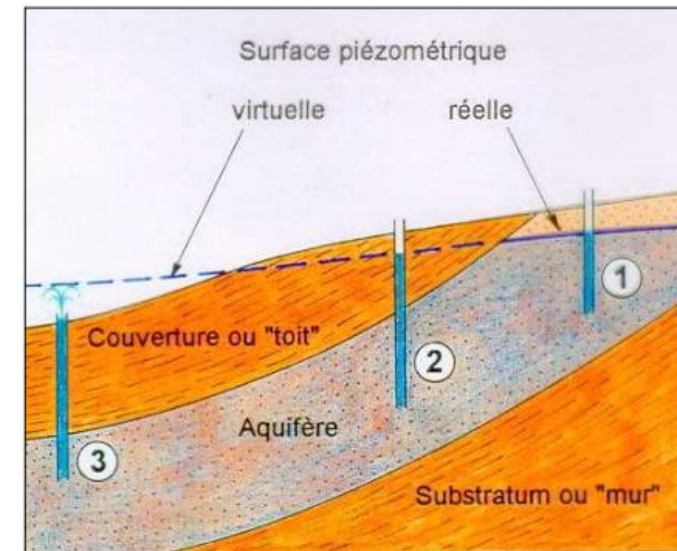
- **Les eaux souterraines s'écoulent** d'une zone de recharge vers un exutoire sous l'effet d'un gradient de pression, appelée **charge hydraulique** => loi de Darcy
- ⇒ La conductivité hydraulique ou **coefficient de perméabilité K** (m/s) est propre à chaque aquifère



K : coefficient de perméabilité du milieu (m/s)
S : section mesurée perpendiculairement à la direction d'écoulement (m²)

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

- **La charge hydraulique (h en m) est mesurée avec un piézomètre**
- ⇒ Niveau d'eau pour une nappe libre
- ⇒ Pression d'eau pour une nappe captive



- En ① la nappe est libre,
- en ② elle est captive,
- en ③ elle est captive et artésienne (jaillissante)

Vitesses de circulation de la molécule d'eau

Vitesses d'infiltration (Baran et al., 2006, Arnaud et al. 2009)

- 1 mètre par an en Craie de Champagne
- 1 mètre par mois dans les Calcaires de Beauce
- 1 mètre par jour dans les alluvions
- plusieurs dizaines de mètres à l'heure dans les terrains très fissurés de type karstique

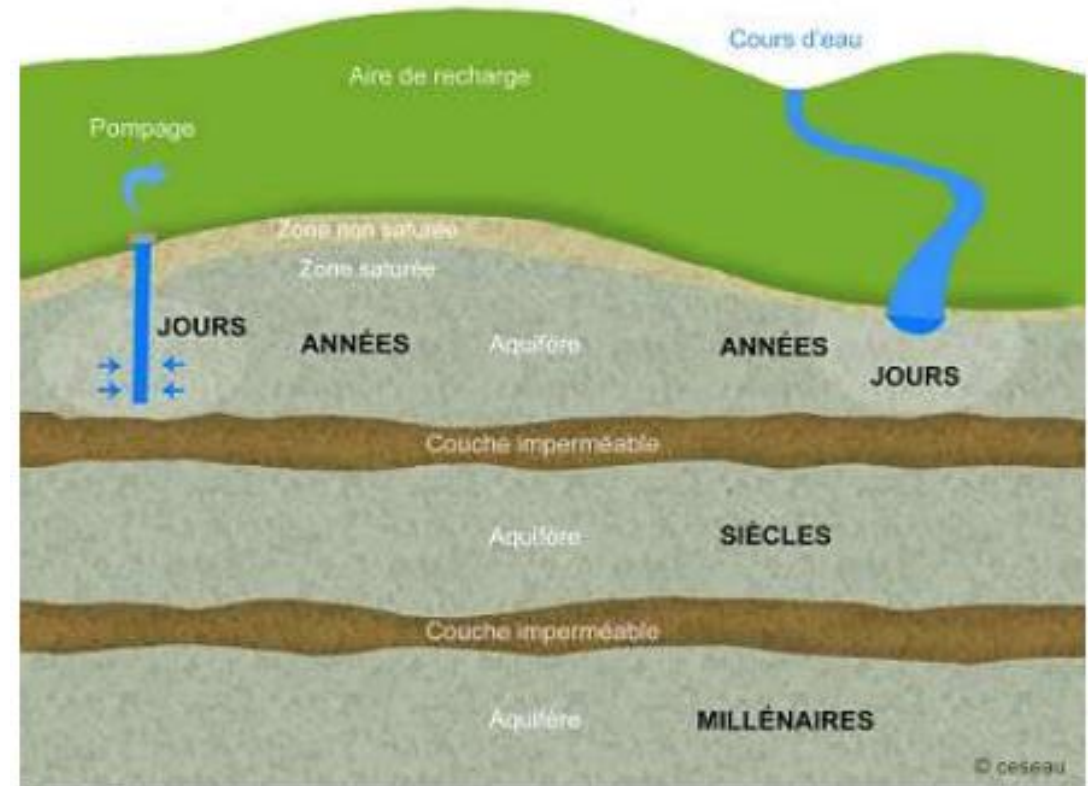
Valeurs du coefficient de perméabilité K propres à chaque aquifère

Type de réservoirs	K (m/s)
Graviers	0,3
Sables	6.10^{-4}
Craie	1.10^{-6}
Limons	$< 3.10^{-8}$



Stockage de l'eau dans le milieu souterrain

« Temps de séjour »

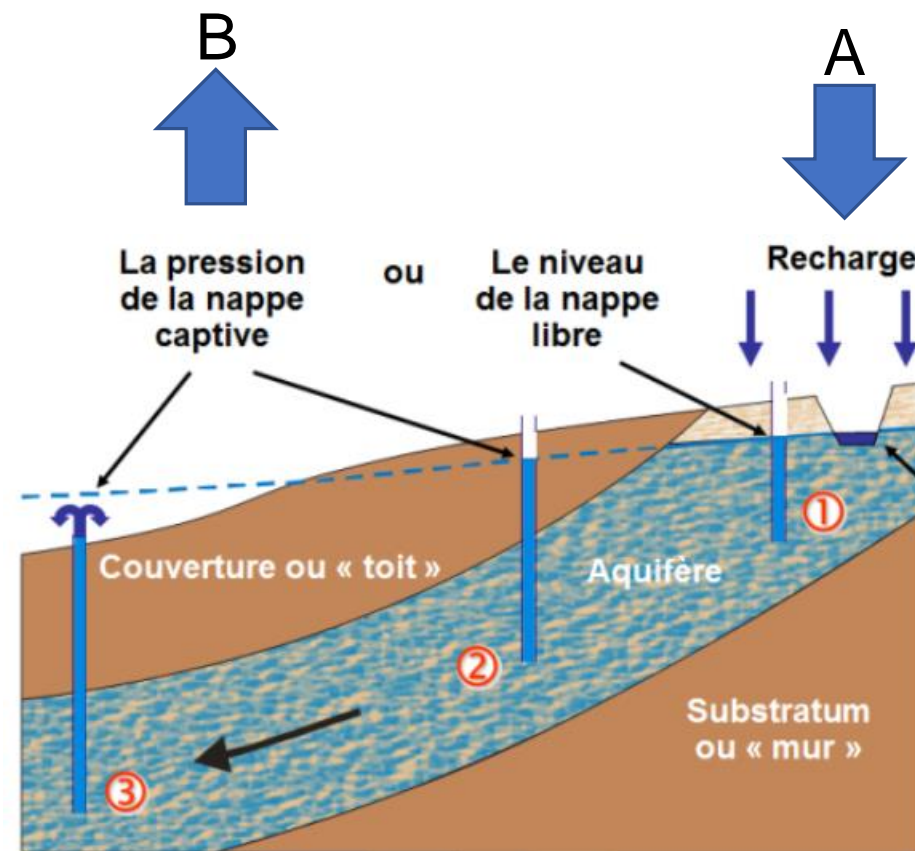
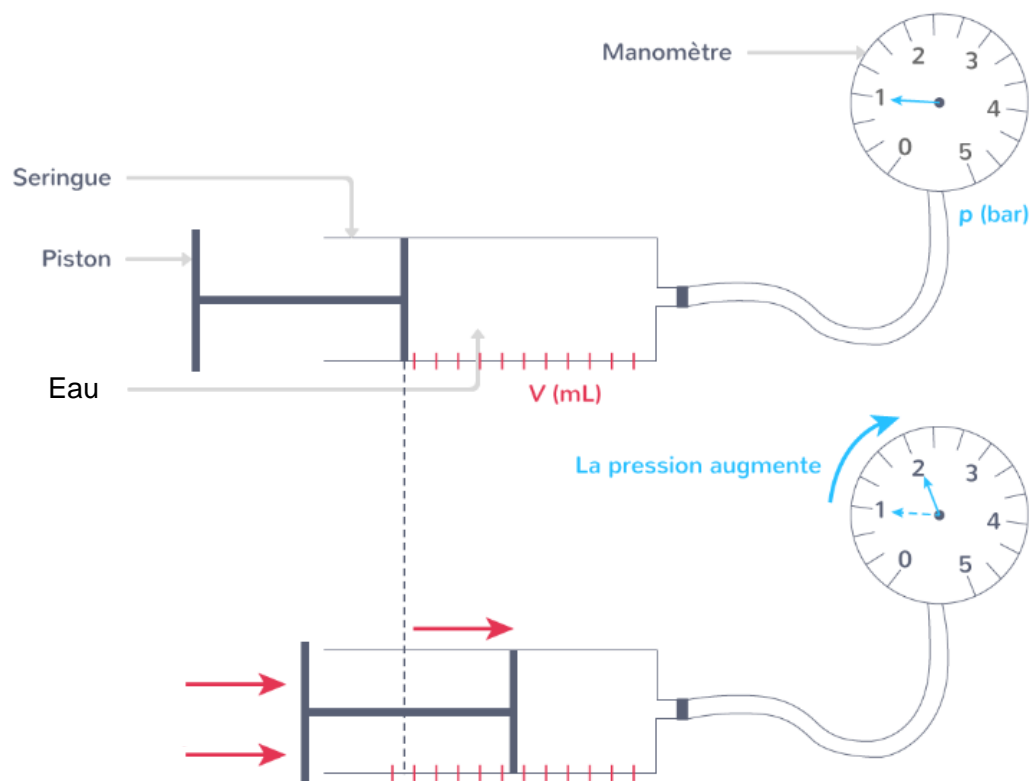


Echelle de temps des écoulements dans différents aquifères (d'après Toth, 1995)

La molécule d'eau n'est pas la seule à transiter

➤ Transfert de pression par effet piston

- Principe de la seringue à piston : Une augmentation de pression en A engendre une augmentation de pression en B



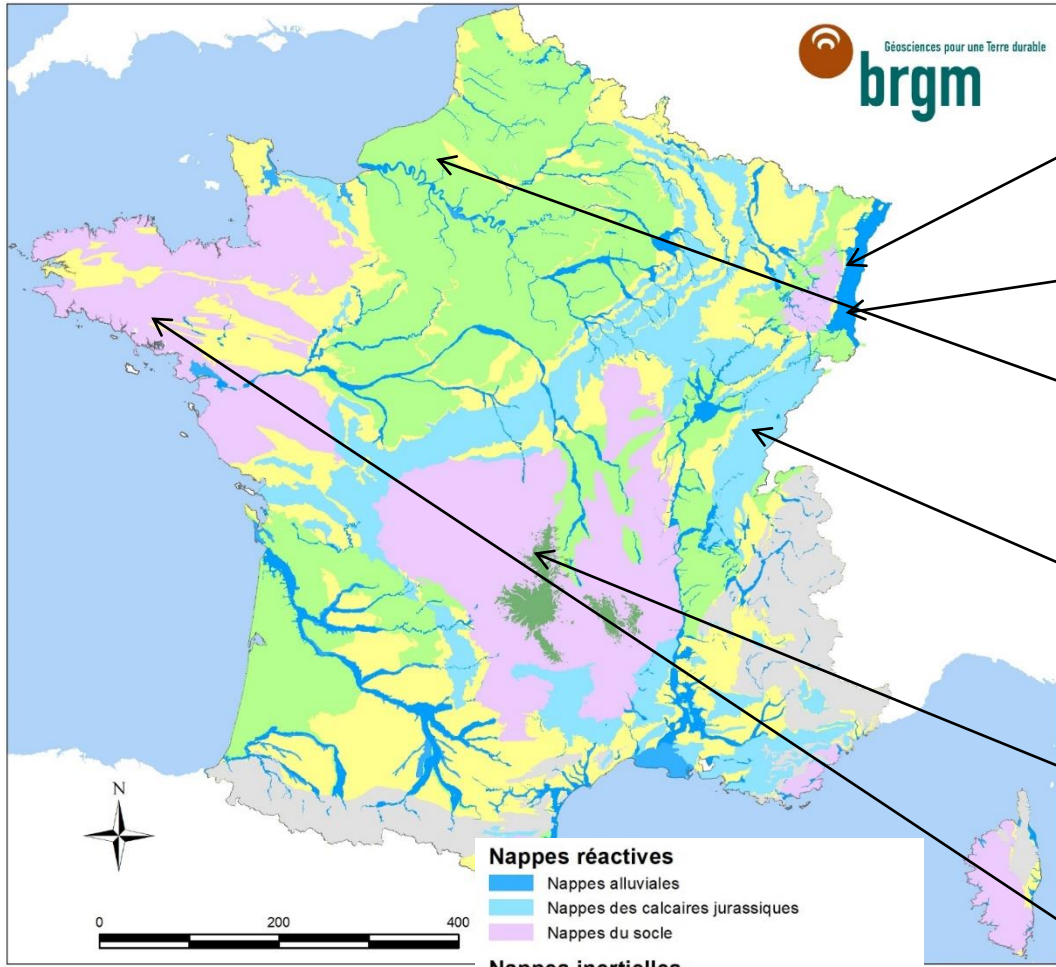
- L'onde de pression se propage rapidement dans l'aquifère (dizaine de m/s)



Effet piston

Différents types d'aquifères en France

De la géologie dépend le fonctionnement des nappes d'eau souterraine



Perméabilité ↑



gravier



sables



craie



Calcaires +/- karstique

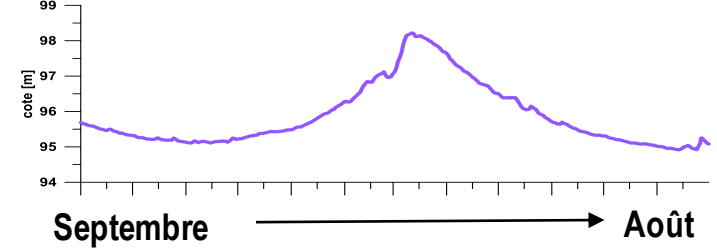


Roches volcaniques

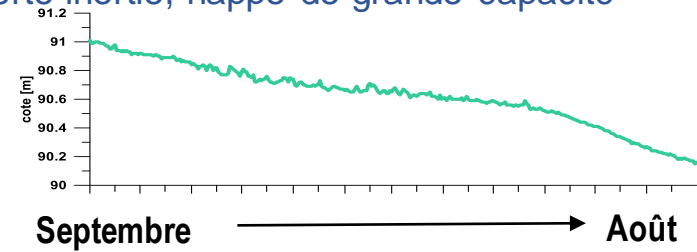


granites

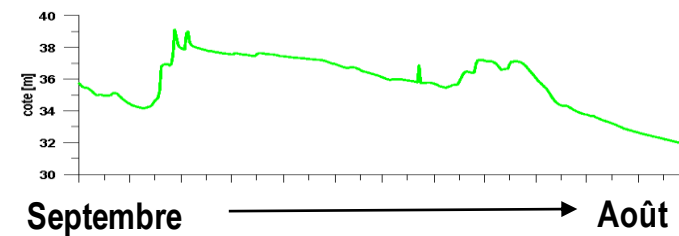
Aquifères sédimentaires :
Double cyclicité : saisonnière et pluriannuelle



Craie, calcaires de Beauce :
Forte inertie, nappe de grande capacité

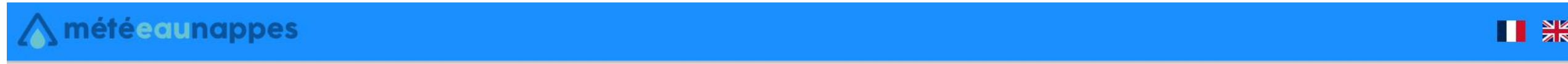


Karst :
Réactions rapides + tendance saisonnière, secteurs sans grandes nappes

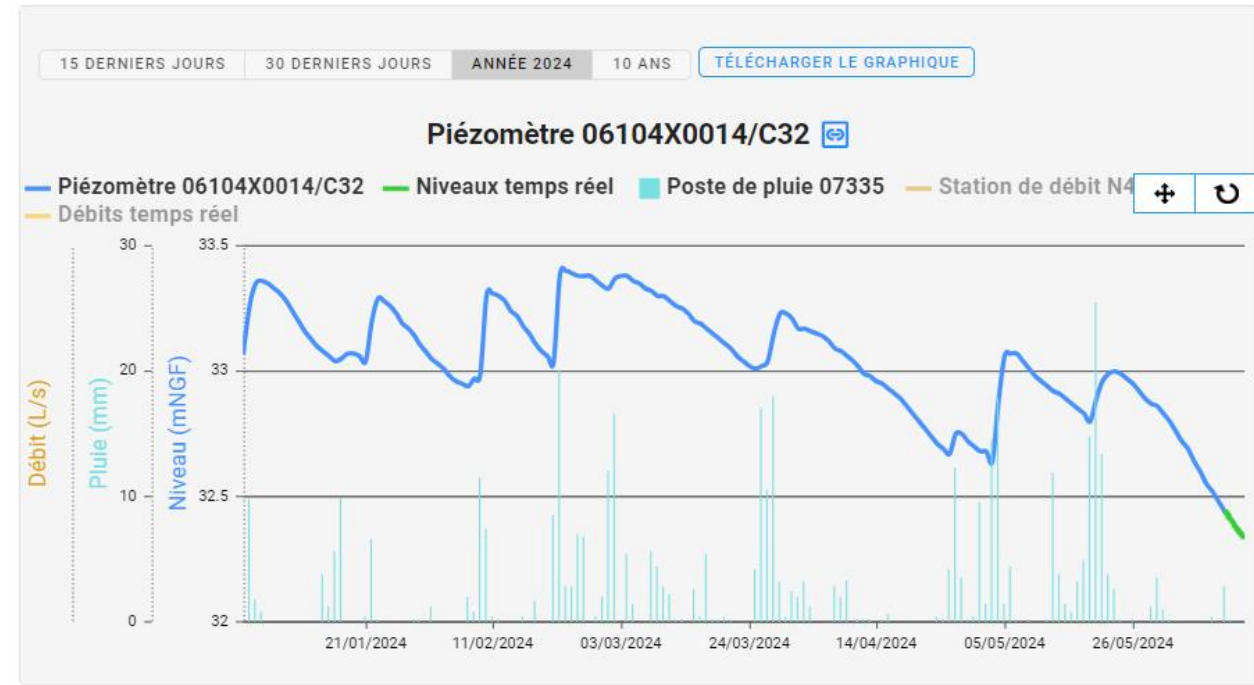
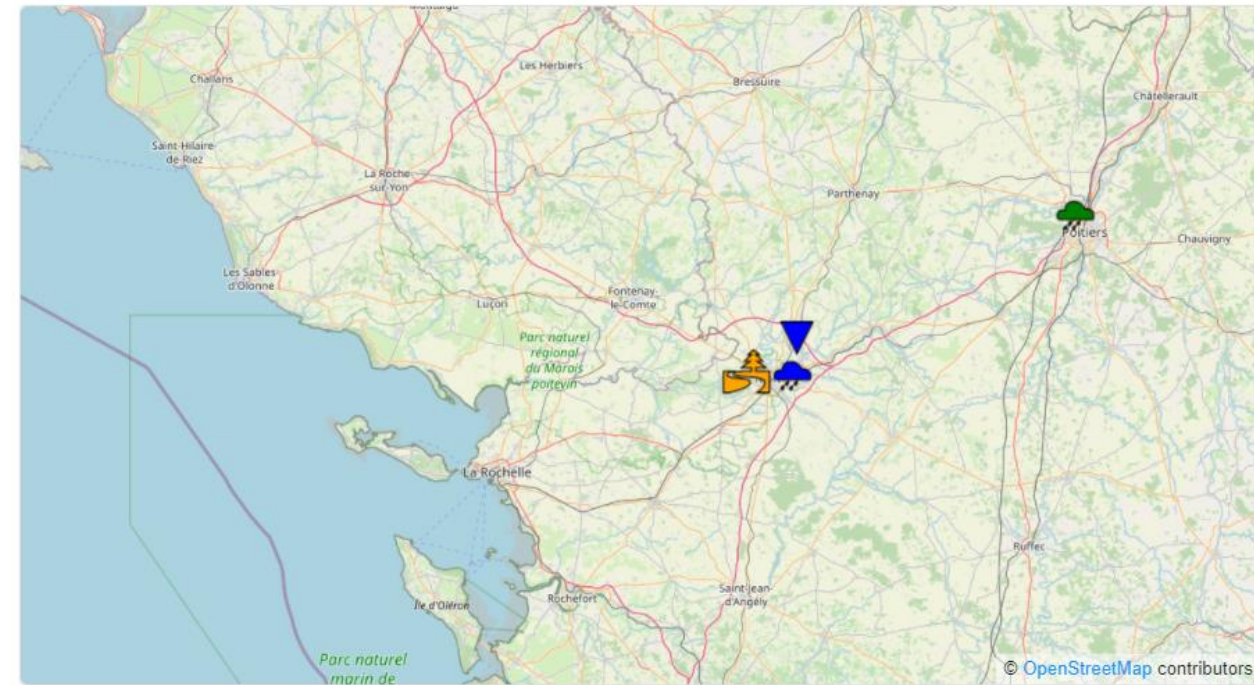


Différents types d'aquifères en France

De la géologie dépend le fonctionnement des nappes d'eau souterraine



DÉPARTEMENT DES DEUX-SÈVRES, COMMUNE DE SAINT-GELAIS, PIÉZOMÈTRE 06104X0014/C32 (BSS001PGUQ)



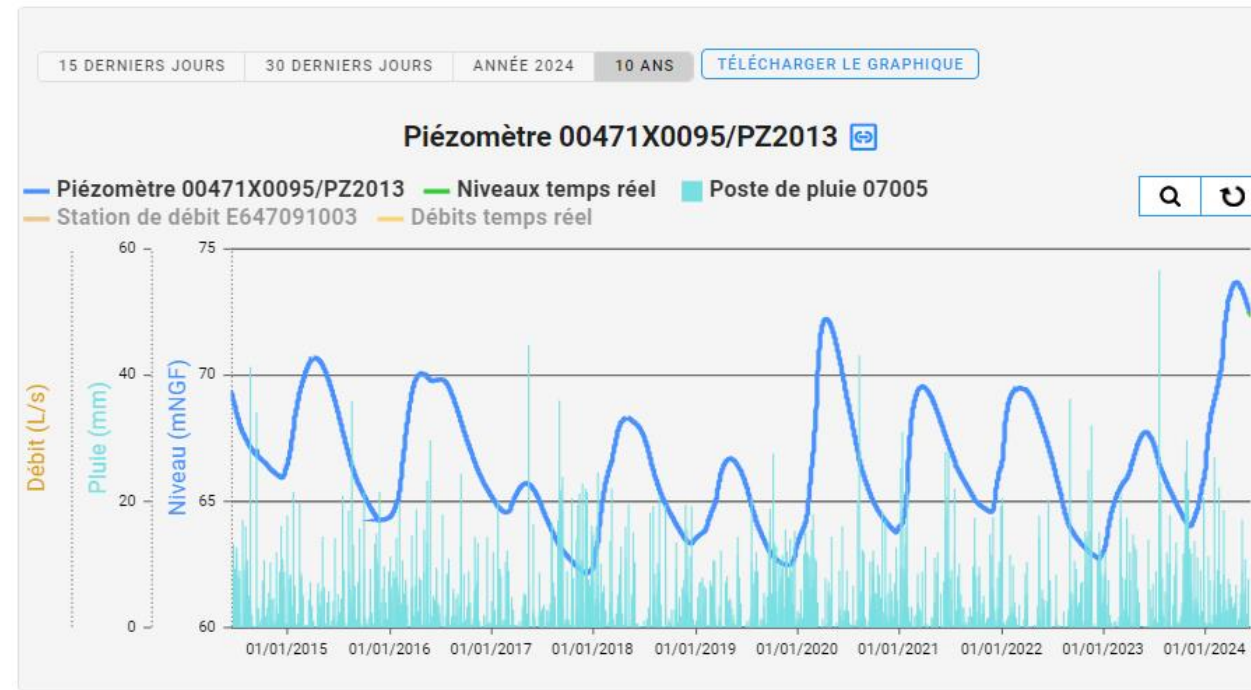
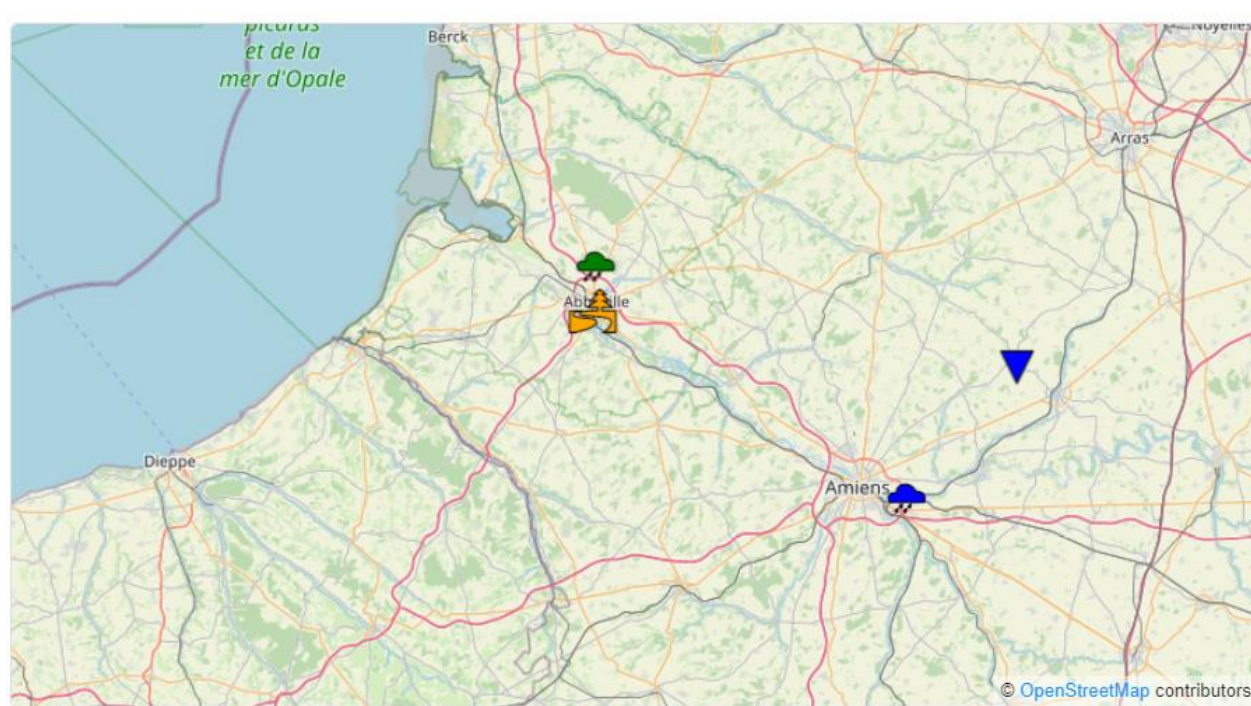
Source : <https://app.meteeaunappes.brgm.fr/>

Calcaires et dolomies et calcaires à Oolites de l'Infra-Toarcien dans le bassin versant de la Sèvre Niortaise, nord du Bassin aquitain

Différents types d'aquifères en France

De la géologie dépend le fonctionnement des nappes d'eau souterraine

DÉPARTEMENT DE LA SOMME, COMMUNE DE SENLIS-LE-SEC, PIÉZOMÈTRE 00471X0095/PZ2013 (BSS000EBLL)



Source : <https://app.meteeaunappes.brgm.fr/>

Craie du Séno-Turonien du bassin versant de la Somme (bassin Artois-Picardie)

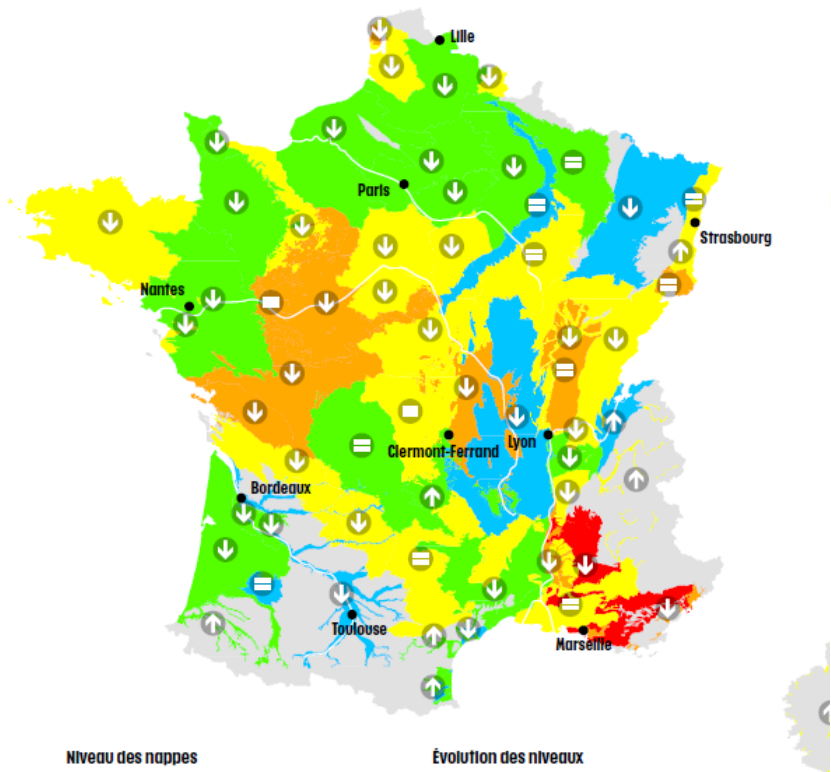
Différents types d'aquifères en France

De la géologie dépend le fonctionnement des nappes d'eau souterraine

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

brgm
Géosciences pour une Terre durable

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
Situation des nappes
au 1^{er} mai 2022



Niveau des nappes

- Niveau très haut
- Niveau haut
- Niveau modérément haut
- Niveau autour de la moyenne
- Niveau modérément bas
- Niveau bas
- Niveau très bas
- Sans nappe libre étendue / Absence de points de suivi

Évolution des niveaux

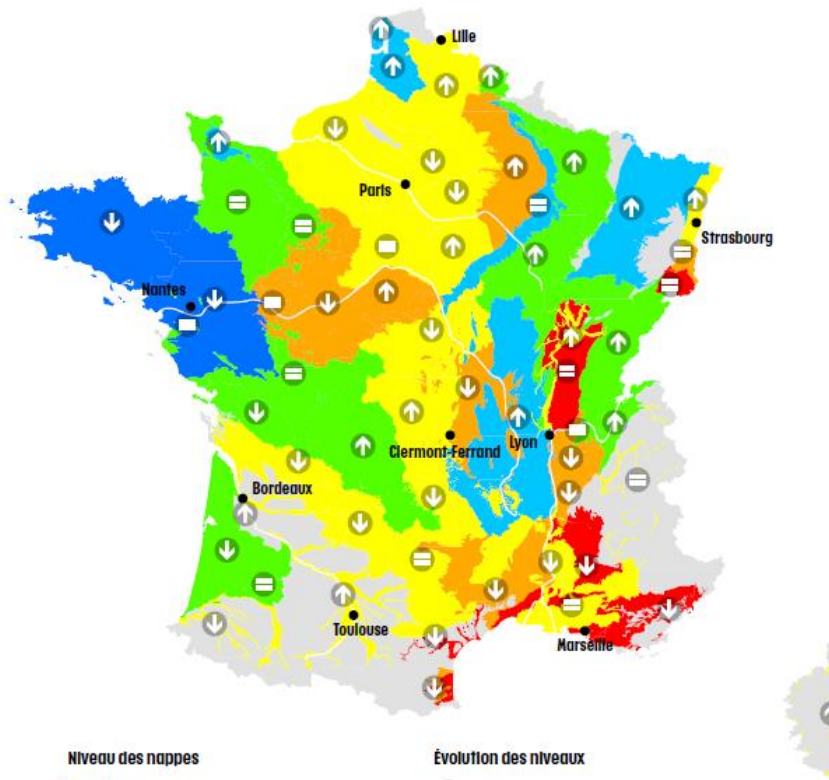
- ↑ En hausse
- ▬ Stable
- ↓ En baisse

© BRGM / www.brgm.fr

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

brgm
Géosciences pour une Terre durable

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
Situation des nappes
au 1^{er} mai 2023



Niveau des nappes

- Niveau très haut
- Niveau haut
- Niveau modérément haut
- Niveau autour de la moyenne
- Niveau modérément bas
- Niveau bas
- Niveau très bas
- Sans nappe libre étendue / Absence de points de suivi

Évolution des niveaux

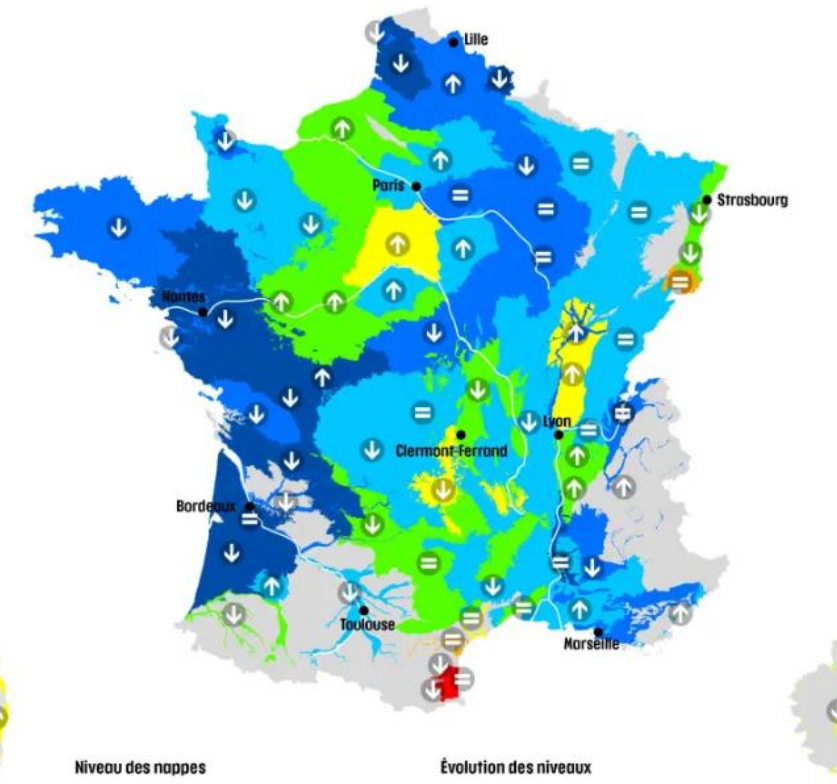
- ↑ En hausse
- ▬ Stable
- ↓ En baisse

© BRGM / www.brgm.fr

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

brgm
Géosciences pour une Terre durable

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
Situation des nappes
au 1^{er} mai 2024



Niveau des nappes

- Niveau très haut
- Niveau haut
- Niveau modérément haut
- Niveau autour de la moyenne
- Niveau modérément bas
- Niveau bas
- Niveau très bas
- Sans nappe libre étendue / Absence de points de suivi

Évolution des niveaux

- ↑ En hausse
- ▬ Stable
- ↓ En baisse

© BRGM / www.brgm.fr

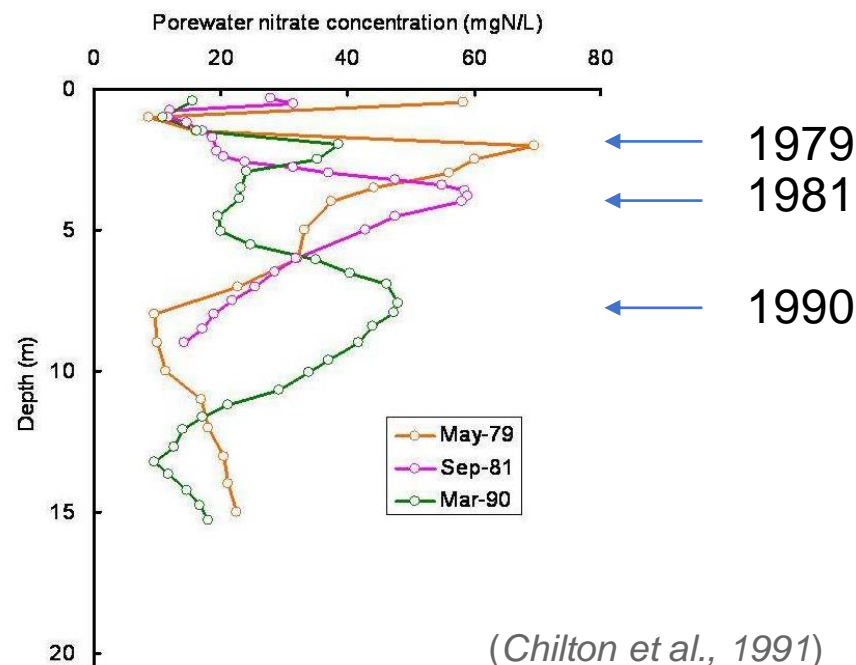
La molécule d'eau n'est pas la seule à transiter

➤ Transfert de polluants = transport de masse (réactif ou non)

- Lorsque l'eau s'infiltré vers les eaux souterraines, elle peut entraîner avec elle des molécules solubles ou adsorbées sur des particules => transfert de polluants
- Si la molécule ne réagit pas avec la phase solide de l'aquifère ni ne se dégrade = **transport non réactif**, la molécule se déplace plus ou moins à la vitesse de la molécule d'eau (ex. NO_3 , ClO_4 , CDC)
- Certaines molécules s'adsorbent sur les phases solides et/ou se dégradent plus ou moins complètement = **transport réactif**, le polluant se déplace plus lentement que la molécule d'eau (ex. polluants organiques type pesticides, médicaments)

Ex. Profil des teneurs en nitrate dans la ZNS de la craie et des grès permo-triasique anglais (travaux BGS)

⇒ Vitesses de transfert des nitrates dans la ZNS = 0,7 à 2 m par an



(Chilton et al., 1991)

Quelles conséquences pour la gestion des ressources

○ Gestion QUANTITATIVE

⇒ Prendre en compte **l'inertie des nappes** pour anticiper les sécheresses / inondations
(transfert de pression – effet piston)

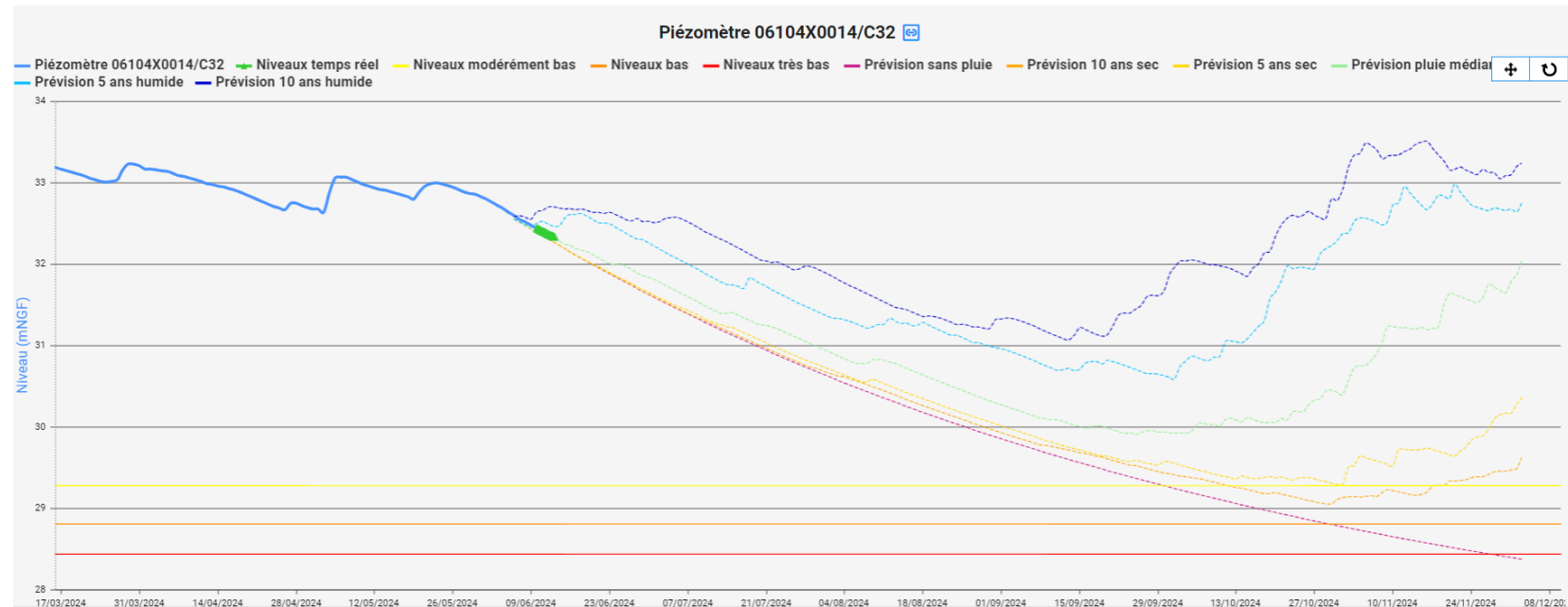
Ex. Anticipation sécheresses / impact du changement climatique

⇒ Distinguer **charge hydraulique** au piézomètres et volumes d'eau dans l'aquifère

Ex. Etudes Volumes prélevables

⇒ Bénéficier de **l'inertie et de la capacité de stockage des nappes** pour fournir de l'eau pendant les périodes d'étiage et de sécheresse

Ex. Recharge maîtrisée des aquifères



Source : <https://app.meteeanappes.brgm.fr/>



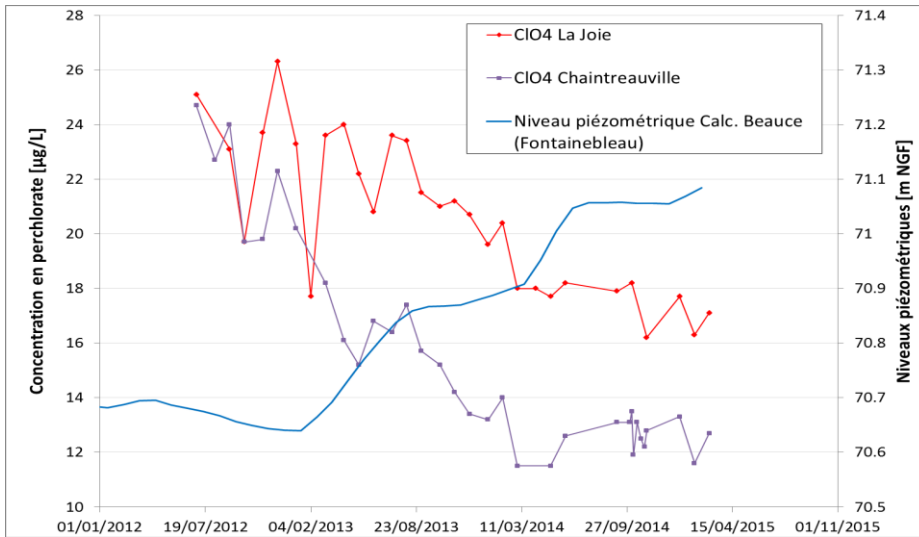
Gestion actuelle par comparaison des niveaux piézométriques à des seuils => gestion des transferts de pression mais pas de prise en compte des temps de séjour de l'eau

Quelles conséquences pour la gestion des ressources

○ Gestion de la QUALITE des eaux souterraines

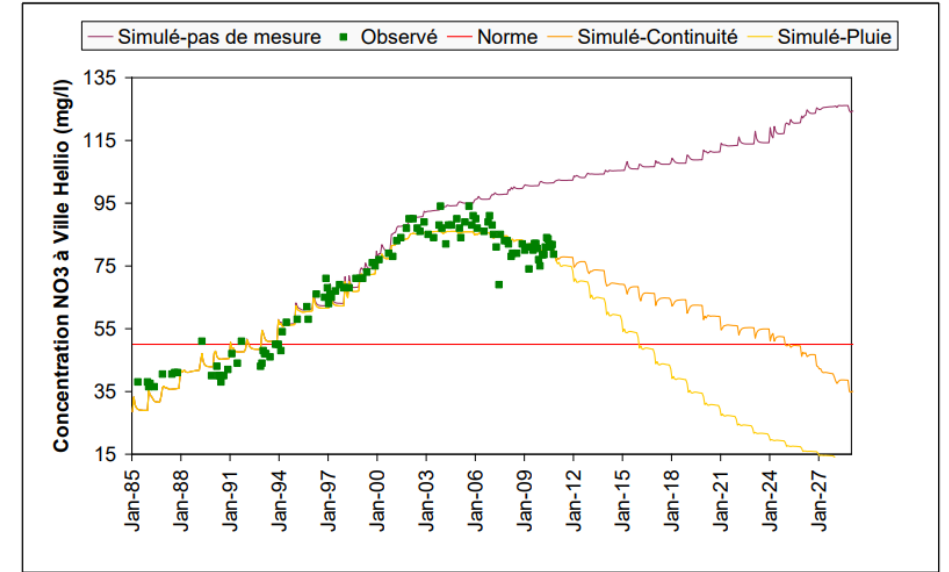
⇒ Prendre en compte **le temps de transfert des polluants** dans la nappe des lieux d'émission vers les captages (transfert de masse)

Ex. PoDiff / Polluants interdits et historiques (atrazine, perchlorates) / Métabolites



Chroniques d'évolution des niveaux piézométriques et des concentrations en perchlorates en nappe de Beauce (77)

(Ollivier et Lopez, à paraître)



Simulation de l'évolution des concentrations en nitrate à Ville-Hellio (22) selon différents scénarios de prise de mesures

(Baran et al. 2012)

⇒ Comprendre les liens entre **les évolutions de charges hydrauliques et la qualité des eaux souterraines** pour modéliser le transfert des polluants

Ex. Etude perchlorates en nappe de Beauce (77)



Les eaux souterraines forment un milieu inertiel et capacitif

⇒ Ces propriétés rendent spécifiques leurs gestions quantitative et qualitative

Les vitesses de circulation de l'eau, des pressions et des polluants sont différentes entre elles et selon les contextes hydrogéologiques

« Gardons en tête ces processus dans nos opérations de recherche, d'expertise, de gestion et de législation »

Je vous remercie pour votre attention



Benjamin Lopez
b.lopez@brgm.fr



Les liens utiles

<https://ades.eaufrance.fr/> **ADES** – Portail d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines

<https://naiades.eaufrance.fr/> **NAIADES** – Données sur la qualité des eaux de surface

<https://hubeau.eaufrance.fr/> **HUB'EAU** – API Rest favorisant l'accès aux données du SIE dans des formats simples d'emploi et propices à la réutilisation (CSV, JSON, GeoJSON)

<https://bnpe.eaufrance.fr/> **BNPE** – Données sur les prélèvements en eau

<https://propluvia.developpement-durable.gouv.fr/propluviapublic/> **PROPLUVIA** – Site de l'information sécheresse du Gouvernement

<https://sigessn.brgm.fr/> **SIGES** – Les Systèmes d'Informations de Gestion des Eaux Souterraines

<https://app.meteeaunappes.brgm.fr/> **MétéEAU Nappes** – Outil de suivi en temps réel et de prévision du niveau des nappes