

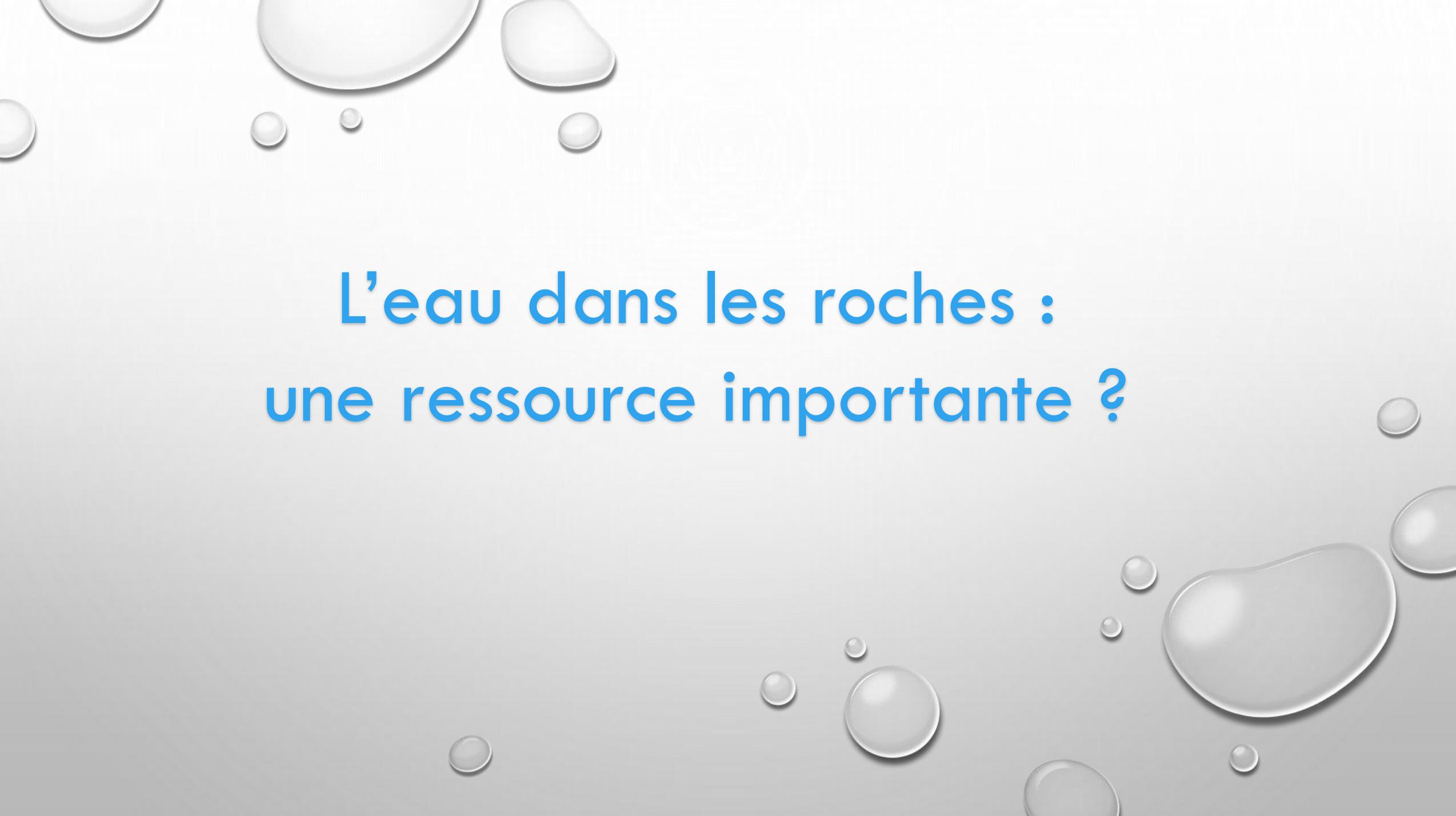


L'eau dans les roches : une ressource exploitable, un pouvoir affaiblissant



Christian DAVID, Professeur



The background features a light gray gradient with several realistic water droplets of various sizes scattered across the surface. A prominent ripple effect is visible in the upper center, consisting of several concentric circles that fade out towards the top edge of the frame.

L'eau dans les roches : une ressource importante ?

LE GRAND INVENTAIRE DE L'EAU

L'eau, sous toutes ses formes, c'est 1 382 285 510 km³. Et pourtant, elle ne représente que 0,023 % de la masse de notre planète.

- EAU SALÉE
- GLACE
- EAU DOUCE
- VAPEUR D'EAU

SOURCES : USGS; KUANG ET AL. (2024); GREENE ET AL. (2024); TEMMINK ET AL. (2022); SHKLOMANOV (1993)

La vapeur d'eau portée par les mouvements aériens se renouvelle en permanence, environ tous les trimestres.

marais et marécages
0,0008 %

C'est très peu en eau, mais 20 % du carbone séquestré dans la biosphère.

rivières
0,0002 %

lacs
0,013 %

Le plus grand lac salé est la mer Caspienne, qui détient à elle seule 43 % de l'eau de tous les lacs du monde.

2 097 799 km de cours d'eau alimentent 769 391 km² de bassins-versants.

0,001 % dans l'air

0,0001 % dans les êtres vivants

La biomasse est en moyenne constituée aux deux tiers d'eau. C'est 60 % pour l'humain, 45 % pour le phoque gris, et plus de 90 % pour les champignons.

96,5 % dans les mers et océans

1,7 % dans le sol

permafrost et glace terrestre
0,022 %

1 400 milliards de tonnes de carbone sont retenues dans ces glaces souterraines, dont l'évolution sous l'effet du réchauffement est difficile à prédire.

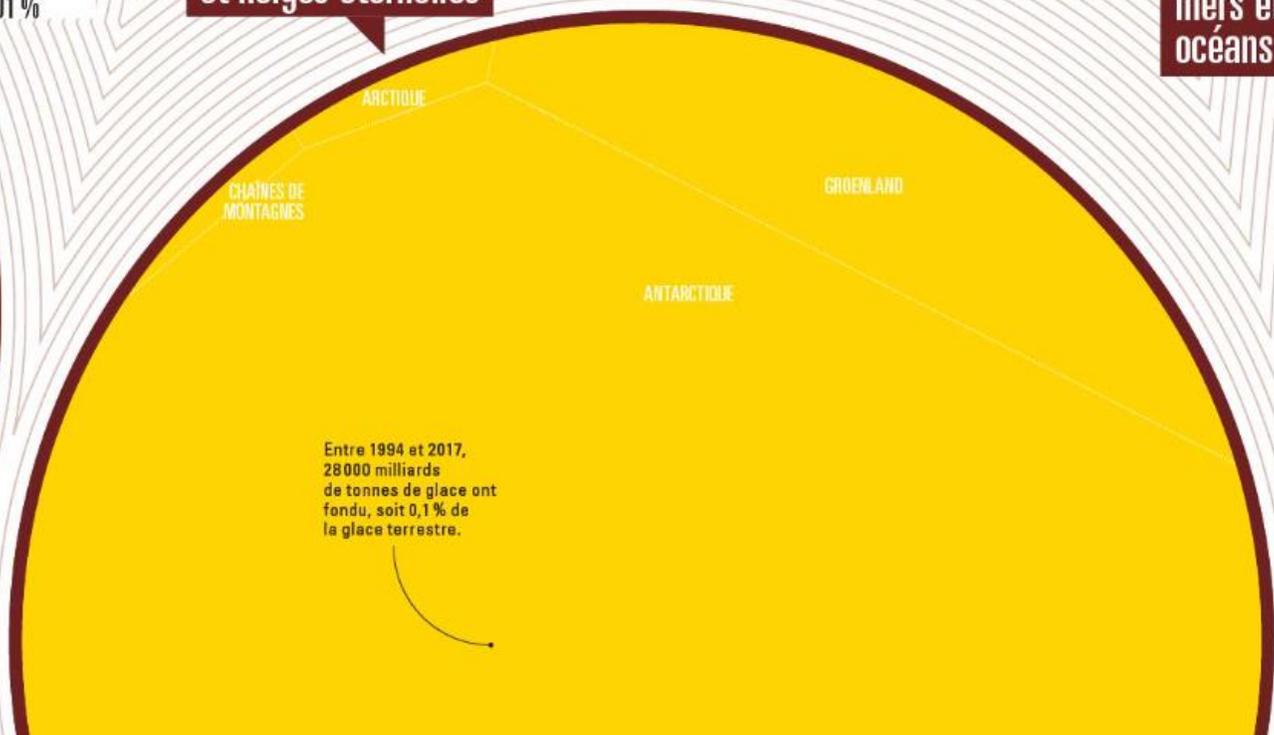
humidité du sol
0,001 %

Autant que dans l'air et avec un rôle là aussi crucial, en particulier pour les écosystèmes et la production agricole.

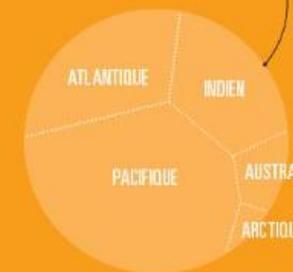
1,7 % dans les glaciers, calottes et neiges éternelles

aquifères nappes phréatiques
1,69 %

Sous l'effet du changement climatique, leur niveau global devrait augmenter de 3 à 4 % d'ici à 2100.



Les océans recouvrent 70,8 % de la surface terrestre et abritent 1 % de la biomasse.



epsilon
Le magazine d'actualité scientifique

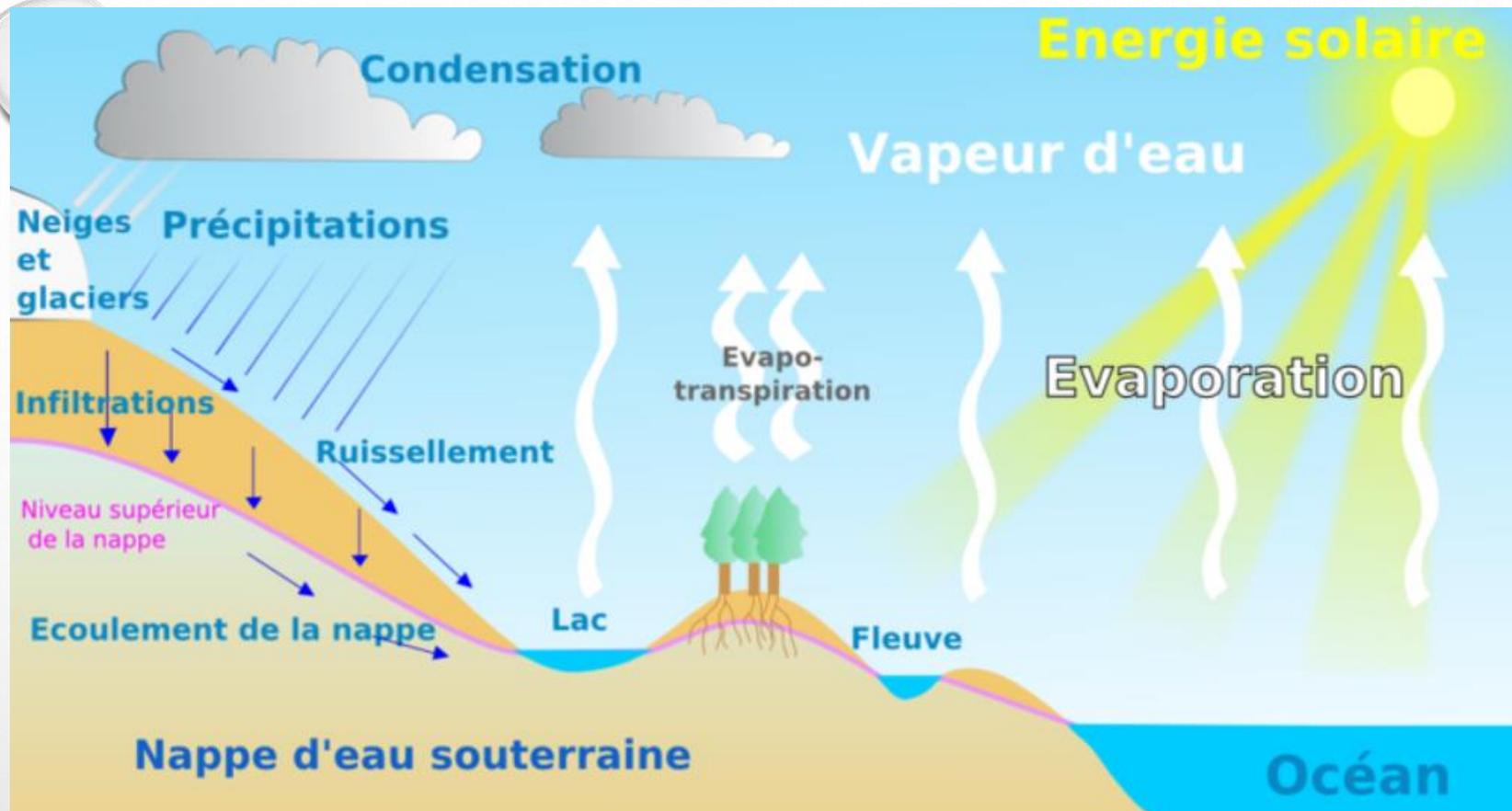
L'eau dans les roches : d'où vient-elle ?

1,7%
dans le sol

**aquifères
nappes
phréatiques**
1,69%

Autant que dans
l'air et avec un rôle
très crucial,
en particulier pour
les écosystèmes
et la production
agricole.

Sous l'effet du changement
climatique, leur niveau
global devrait augmenter
de 3 à 4% d'ici à 2100.



wikipedia

Cycle de l'eau

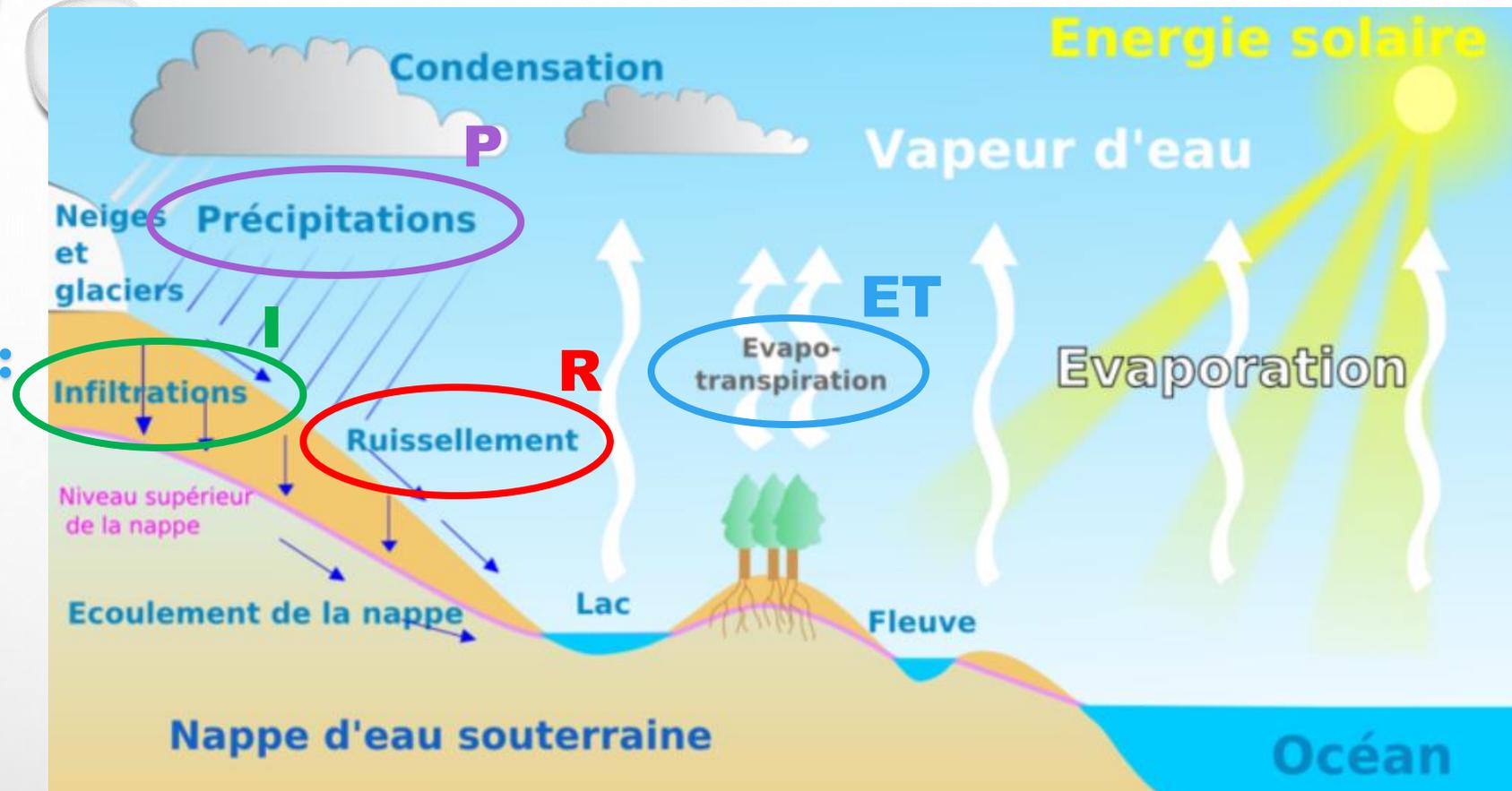
L'eau dans les roches : d'où vient-elle ?

Bilan hydrique

$$P = I + R + ET$$

23% 16% 61%

En France seulement 1/4 de l'eau apportée par la pluie va s'infiltrer dans les roches en profondeur et alimenter les eaux souterraines



wikipedia

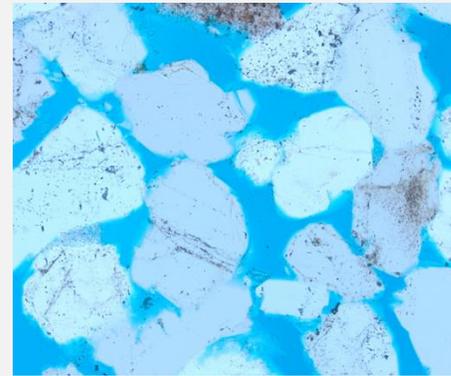
Cycle de l'eau

En France l'infiltration représente 100 millions de mètres cubes par an

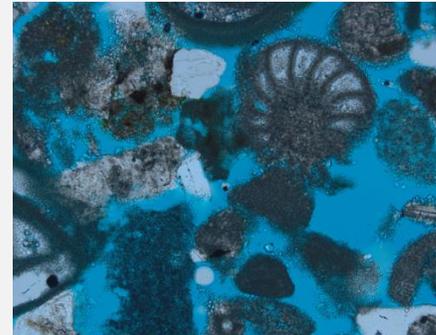
L'eau dans les roches : où se trouve-elle ?

→ dans la porosité des roches, c'est-à-dire dans les espaces vides entre les éléments solides qui forment la roche.

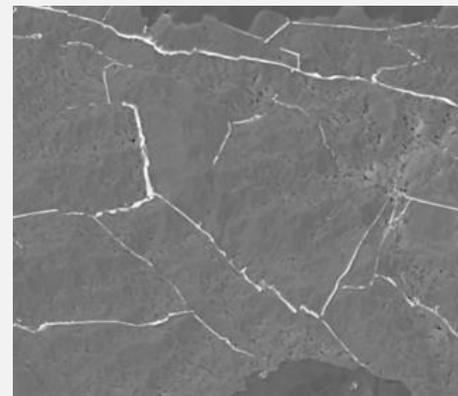
→ Les formations géologiques contenant de l'eau exploitable s'appellent des **aquifères** ou **nappes phréatiques**



Sables et grès
(quartz, feldspath)
pores

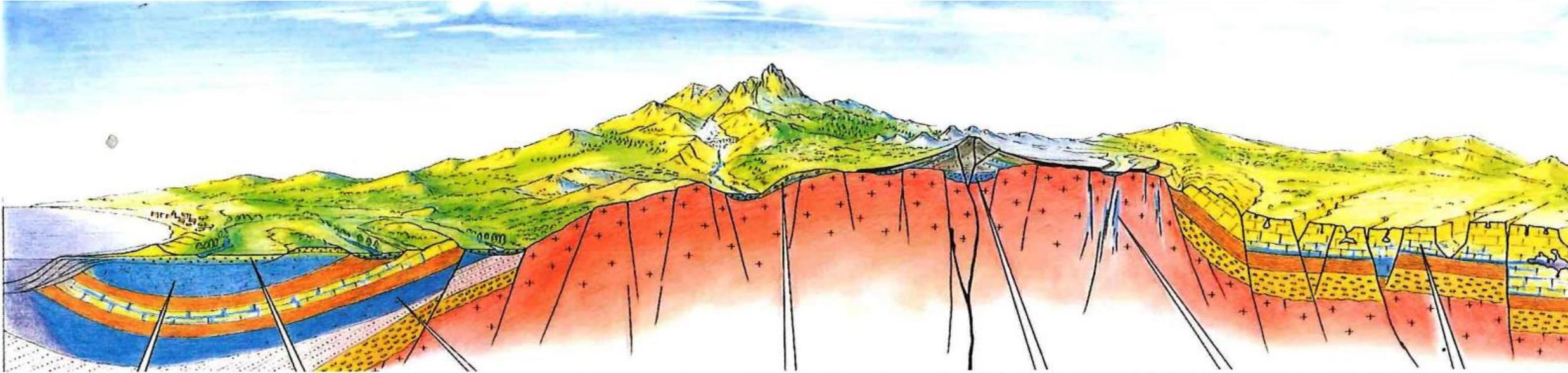


Roches calcaires
(calcite, microfossiles)
pores

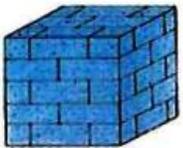


Granite
(minéraux « jointifs »)
fissures, fractures

L'eau dans les roches : les types d'aquifères



Aquifères de roches sédimentaires (libres)



Calcaire, craie, grès

Débit :
moyen à élevé

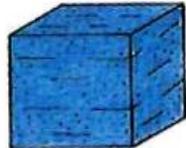
Sables et alluvions des vallées



Graviers et sables

Débit :
bon à élevé

Aquifères sédimentaires profonds (captifs)



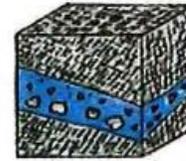
Formations sédimentaires poreuses
Calcaires, craie, grès
Débit : bon à élevé

Dépôts glaciaires (moraines)



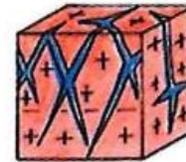
Association de blocs, argiles, graviers, sables
Débit : très variable

Aquifères volcaniques



Laves et scories
Débit :
excellent dans les scories,
faible dans les laves

Roches dures fissurées



Fractures dans le granite ou autres roches cristallines
Débit : faible à moyen

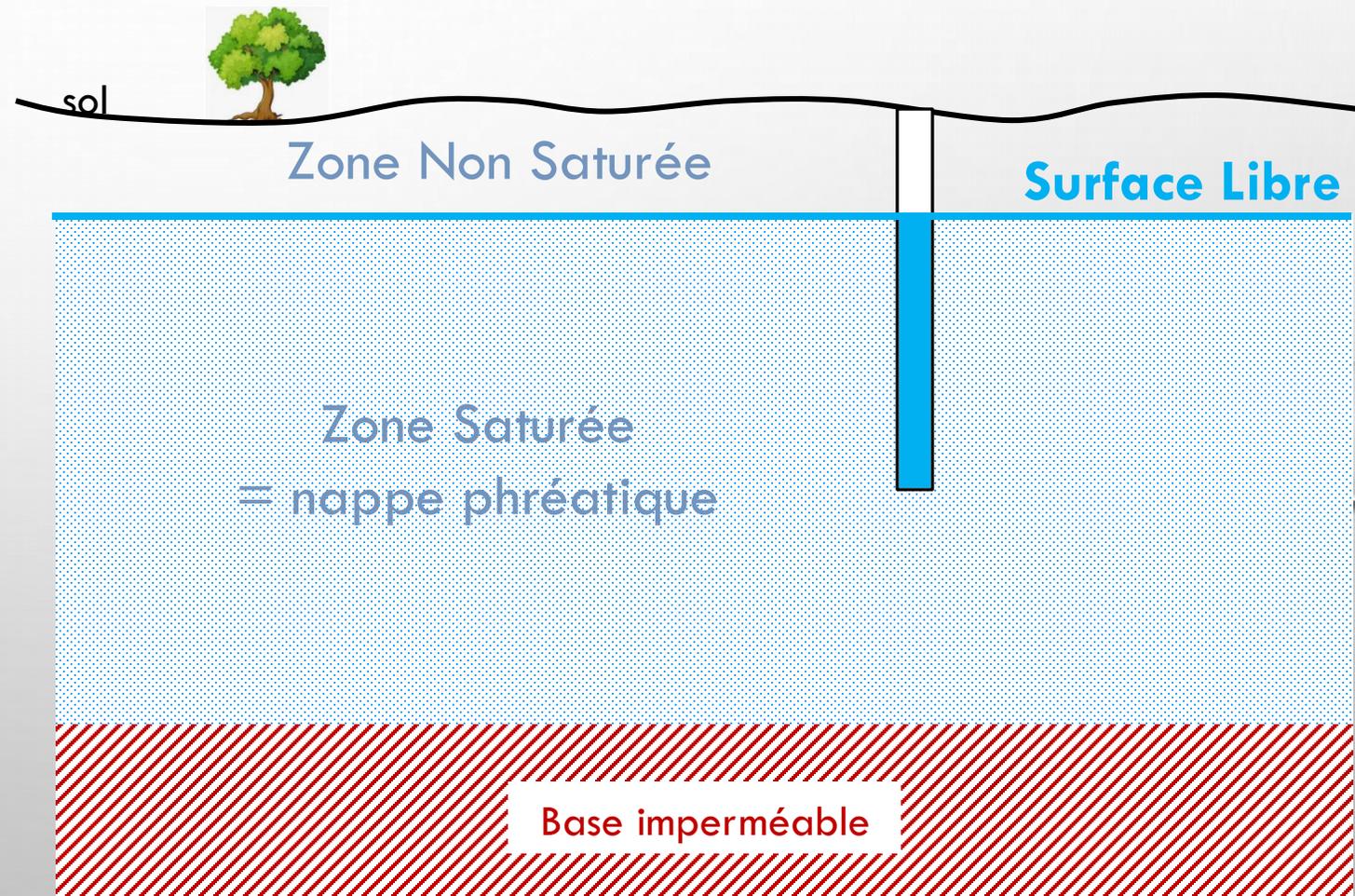
Aquifères karstiques



Cavités dans le calcaire compact
Débit : très variable

L'eau dans les roches : les types d'aquifères

Aquifère libre

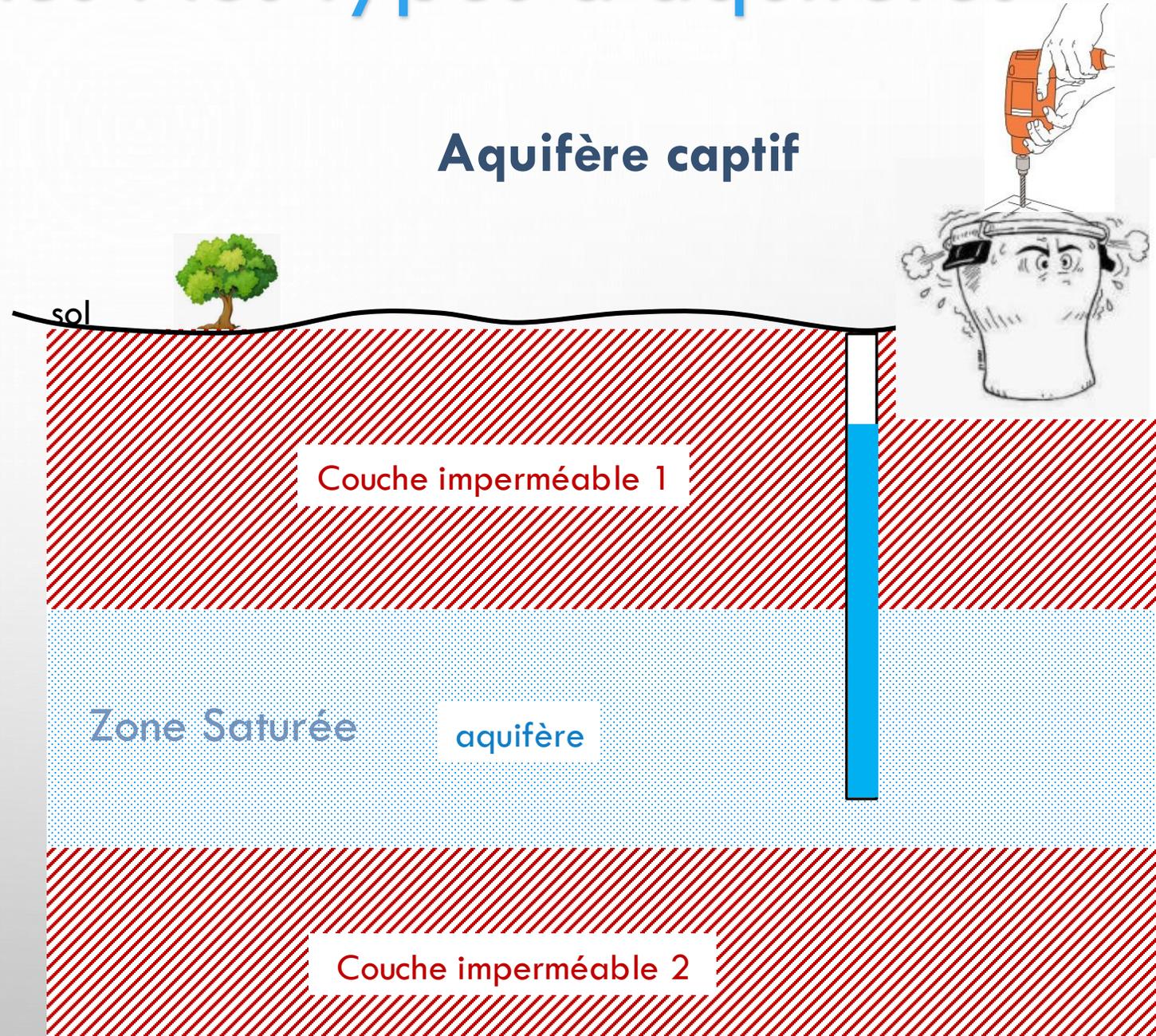


- Recharge par infiltration
- Battement de nappe saisonnier
- Sensible à la pollution en surface

L'eau dans les roches : les types d'aquifères

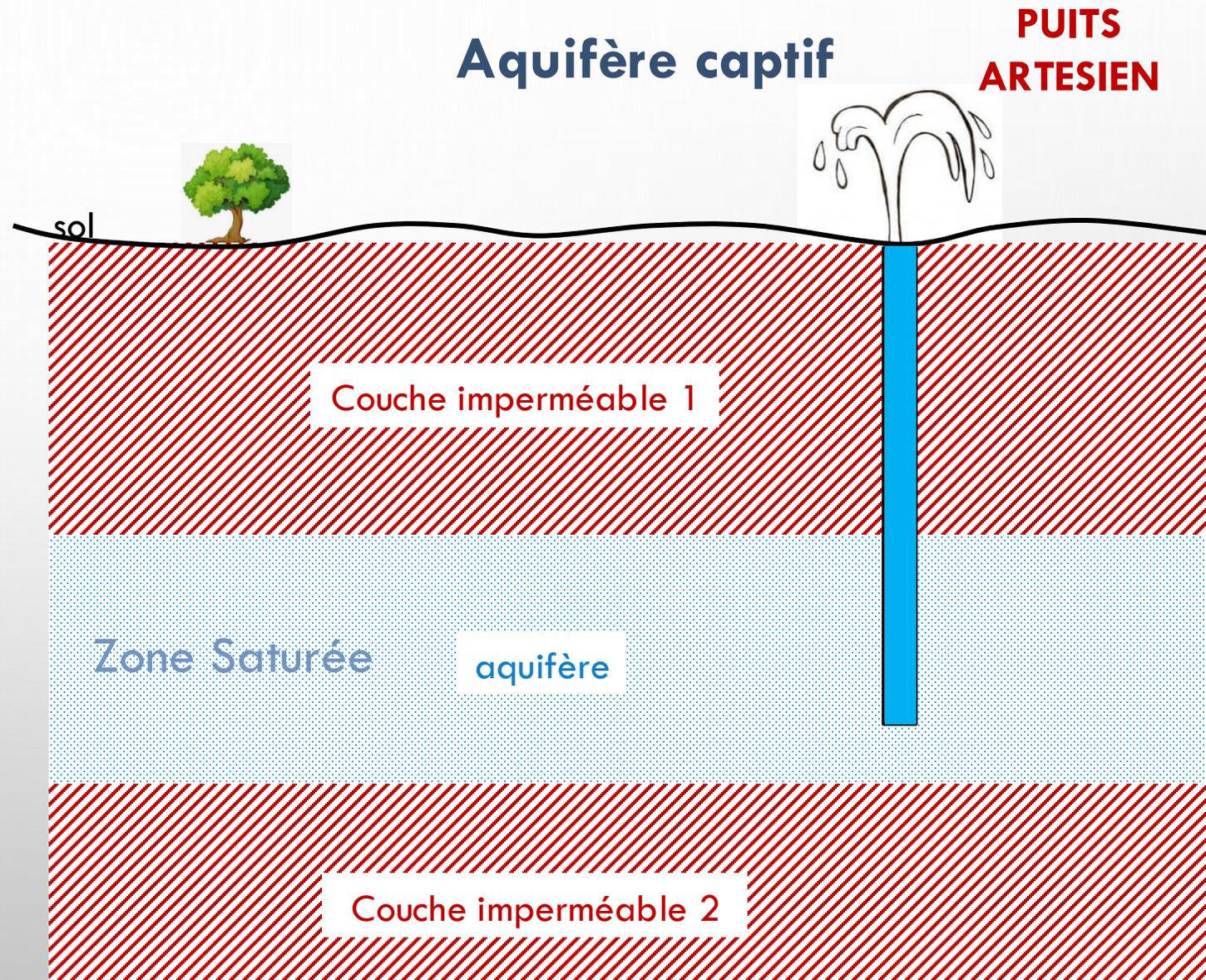
Aquifère captif

- Recharge uniquement aux affleurements
- Peu sensible à la pollution en surface



L'eau dans les roches : les types d'aquifères

- Présence d'un puits artésien lorsque la pression dans l'aquifère est suffisamment forte pour faire jaillir l'eau à la surface

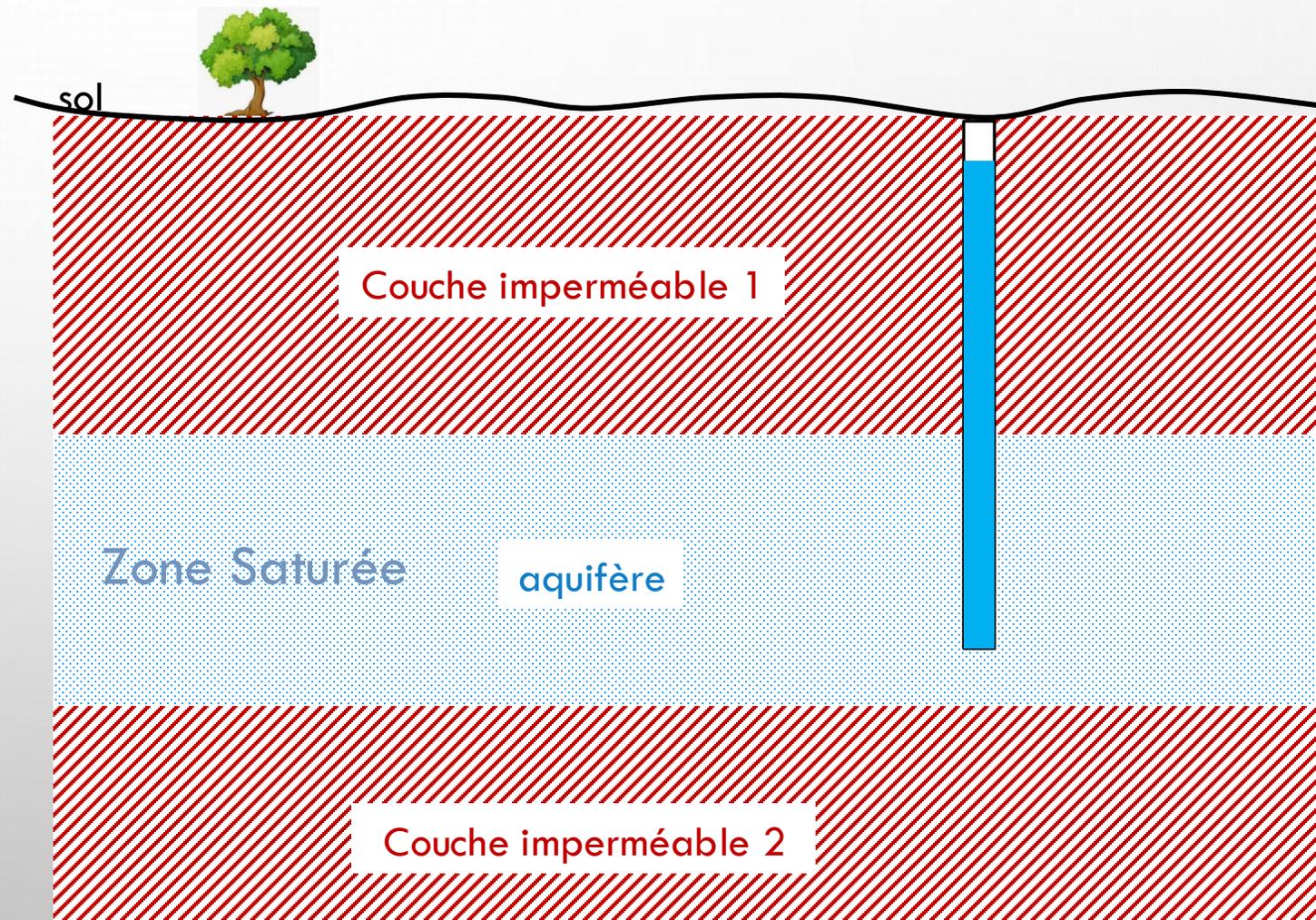


L'eau dans les roches : les types d'aquifères

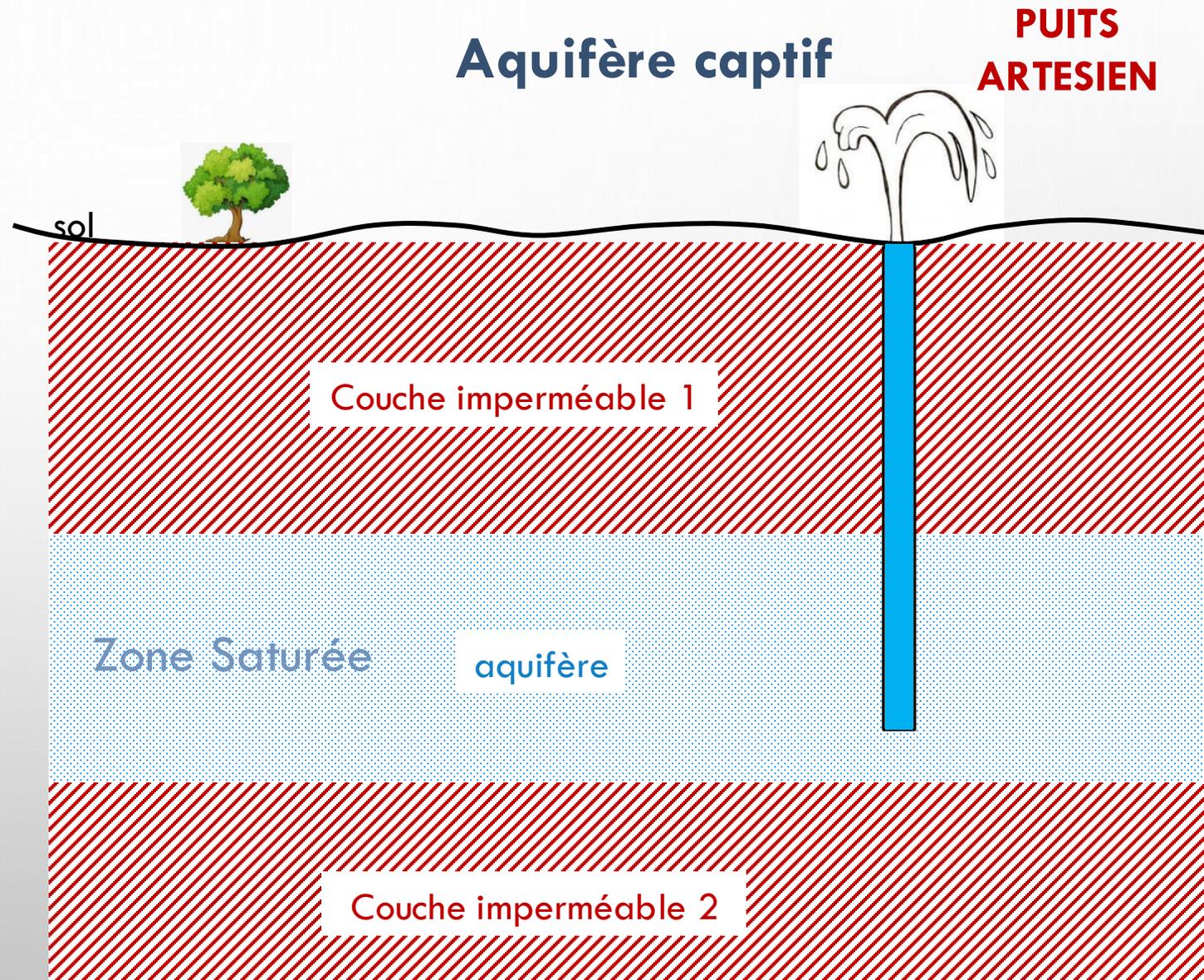
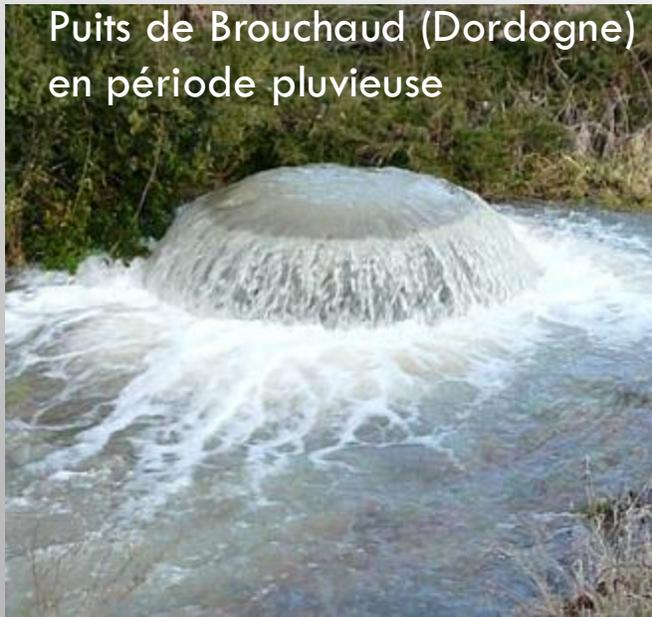


Puits de Brouchaud (Dordogne)
en période sèche....

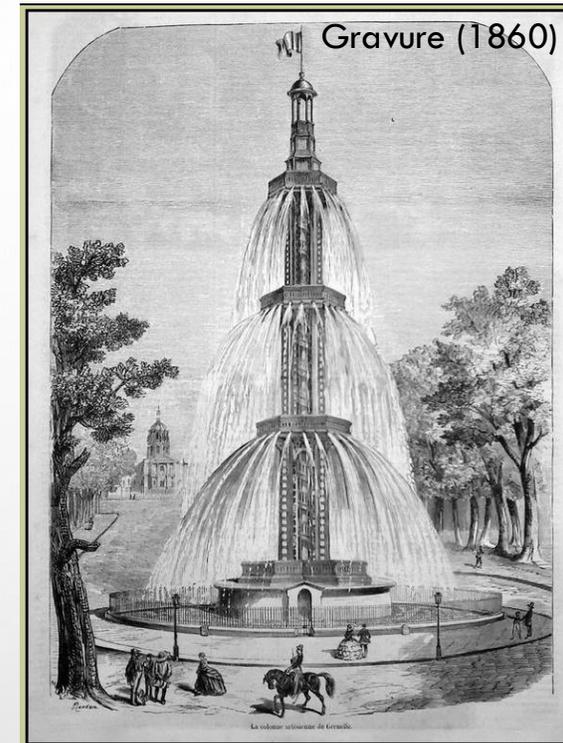
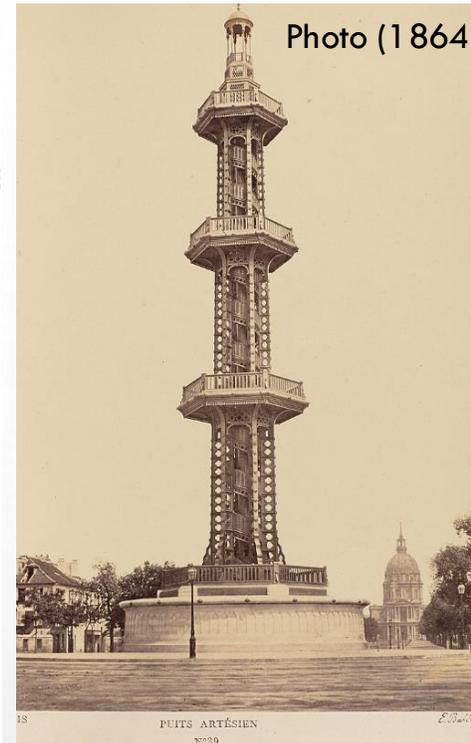
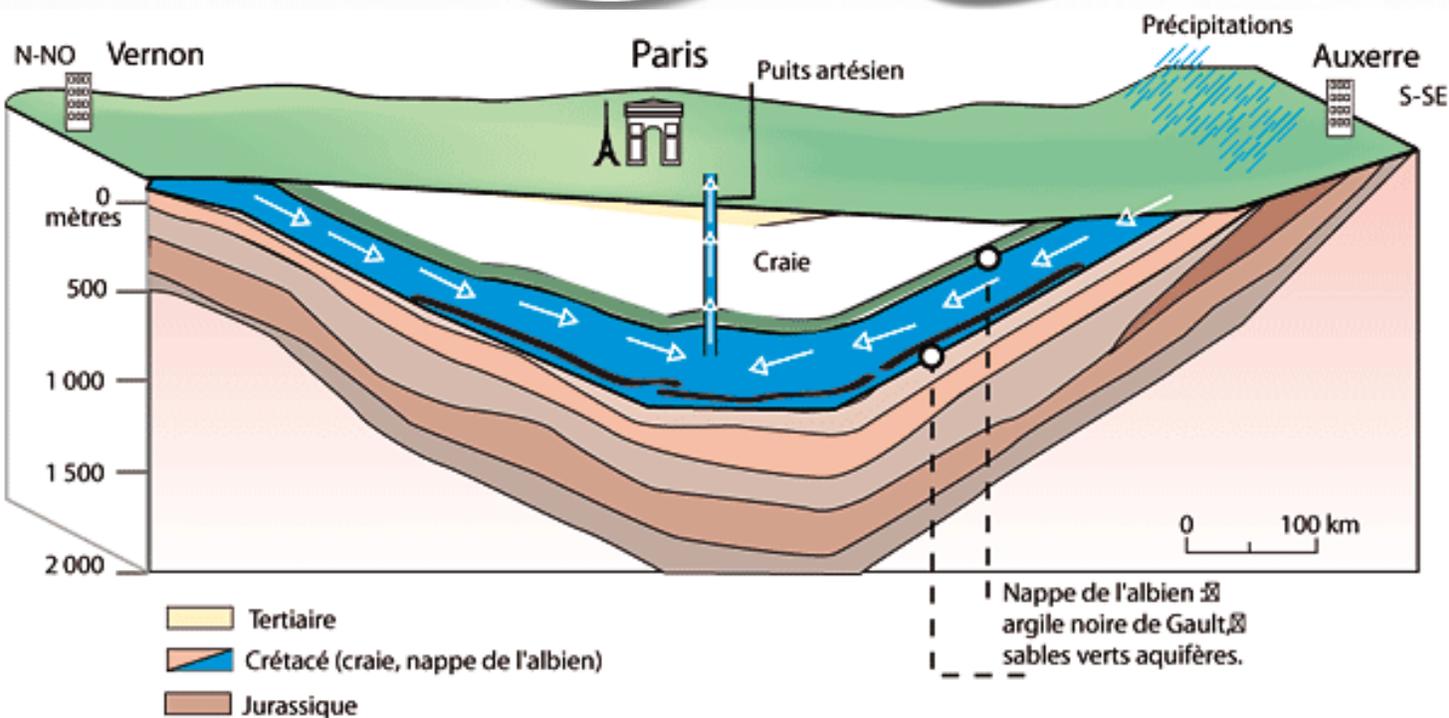
Aquifère captif



L'eau dans les roches : les types d'aquifères



Exemple d'aquifère captif



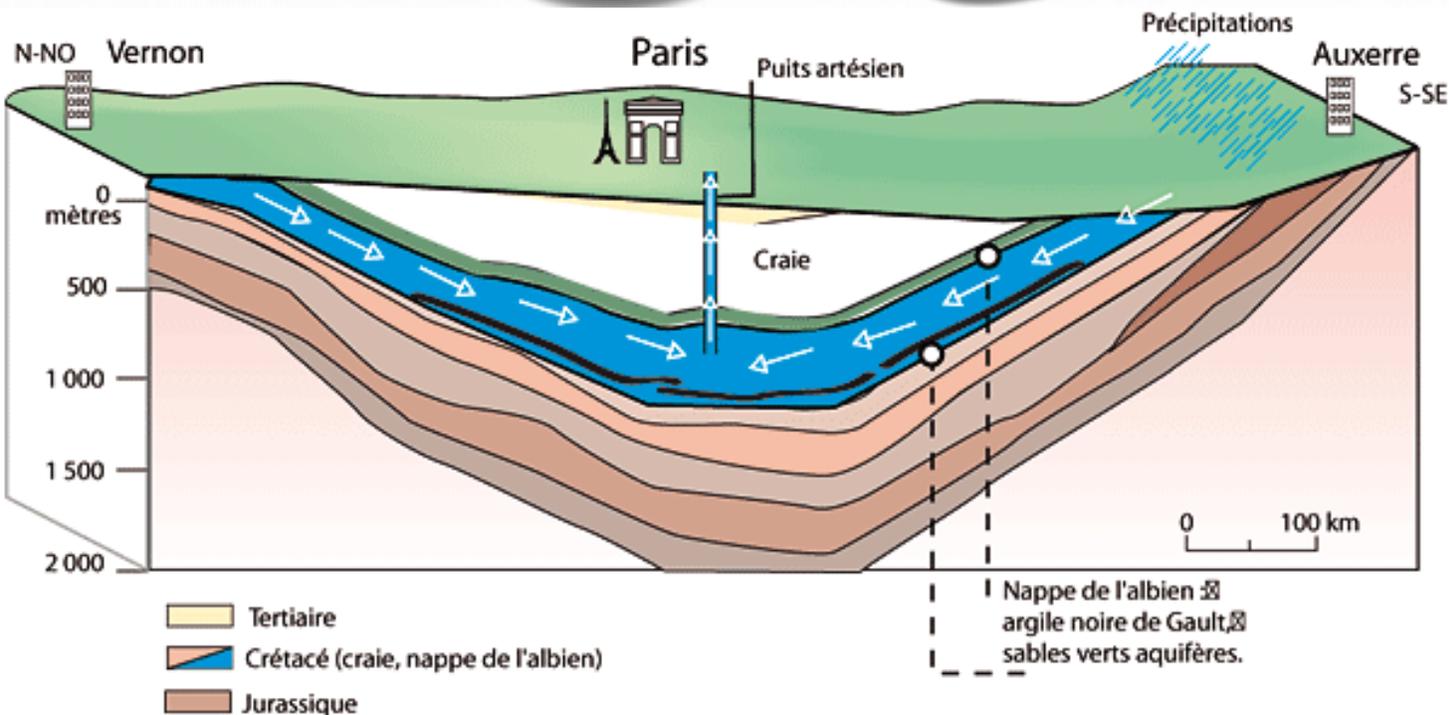
Puits de Grenelle
(1833-1841)
Profondeur 548 m
Creusé en 7 ans
Débit ~10 litres/seconde
Tour détruite en 1904

La nappe des sables de l'Albien sous Paris (profondeur > 500 mètres)

Plusieurs puits artésiens dans Paris

Réserve d'eau « stratégique » non polluée (mais riche en fer...)

Exemple d'aquifère captif

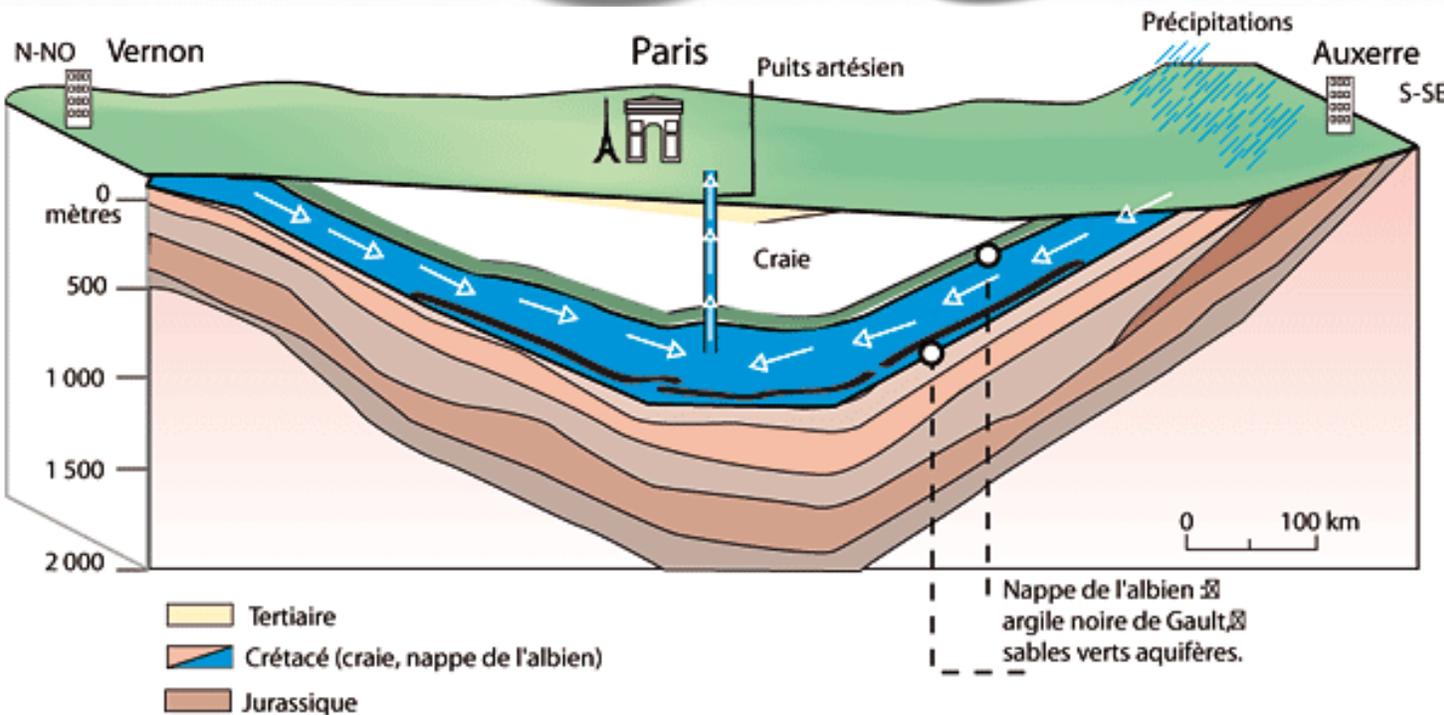


Actuellement trois puits artésiens fonctionnent à Paris

Les Parisiens peuvent s'y approvisionner gratuitement en eau



Exemple d'aquifère captif



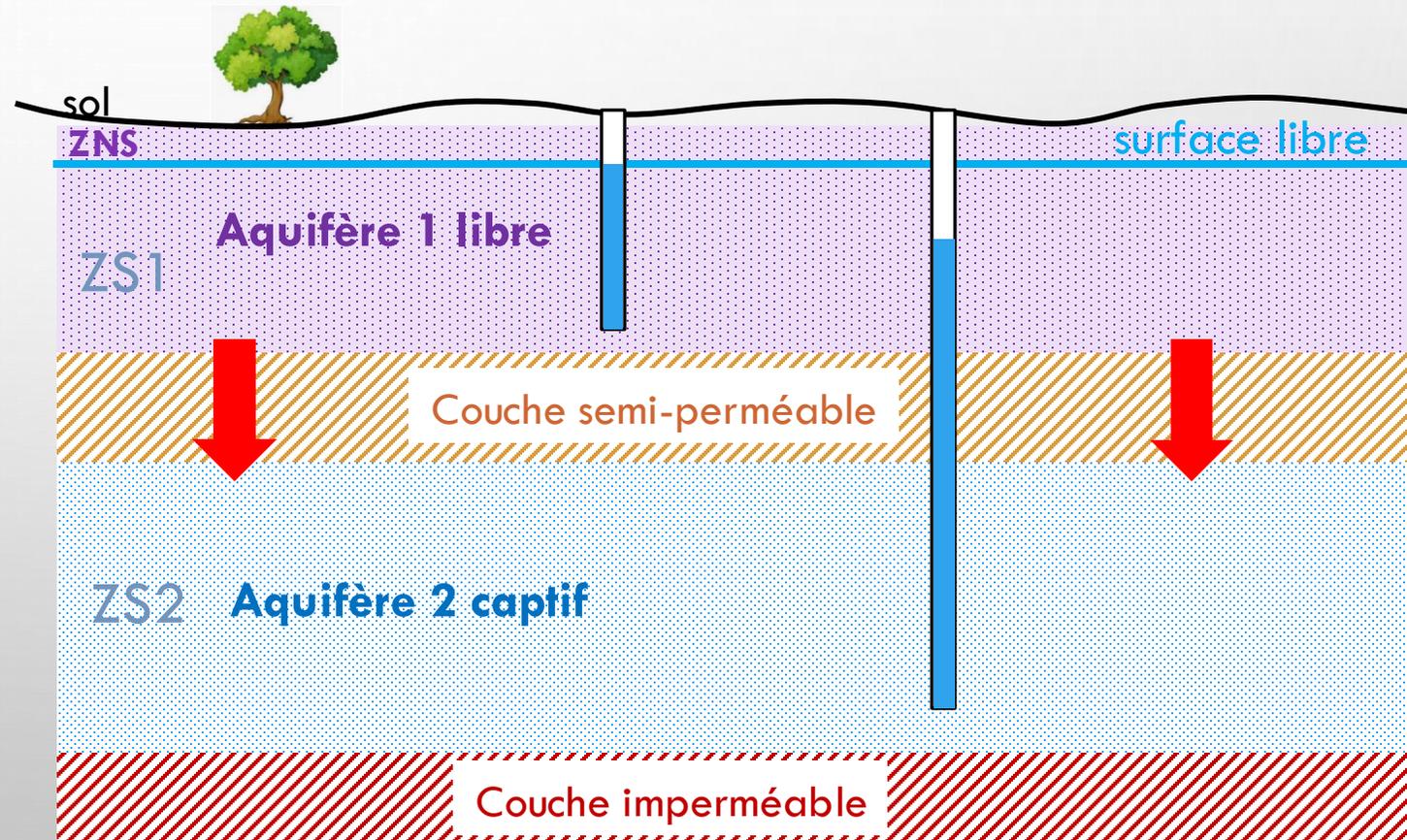
Depuis 1964 la Maison de Radio France est chauffée grâce à la géothermie

L'eau à 27° fournie par un puits artésien atteignant la nappe de l'Albien sert à chauffer le bâtiment

L'eau dans les roches : les types d'aquifères

- Superposition d'un aquifère libre et d'un aquifère captif
- Échange possible entre les deux aquifères par drainance

Aquifère multicouches



L'eau dans les roches :
une ressource exploitable



L'eau dans les roches :

une ressource
exploitable

Les aquifères en France

450 aquifères

dont 200 d'extension régionale

parmi lesquels

175 aquifères **libres**

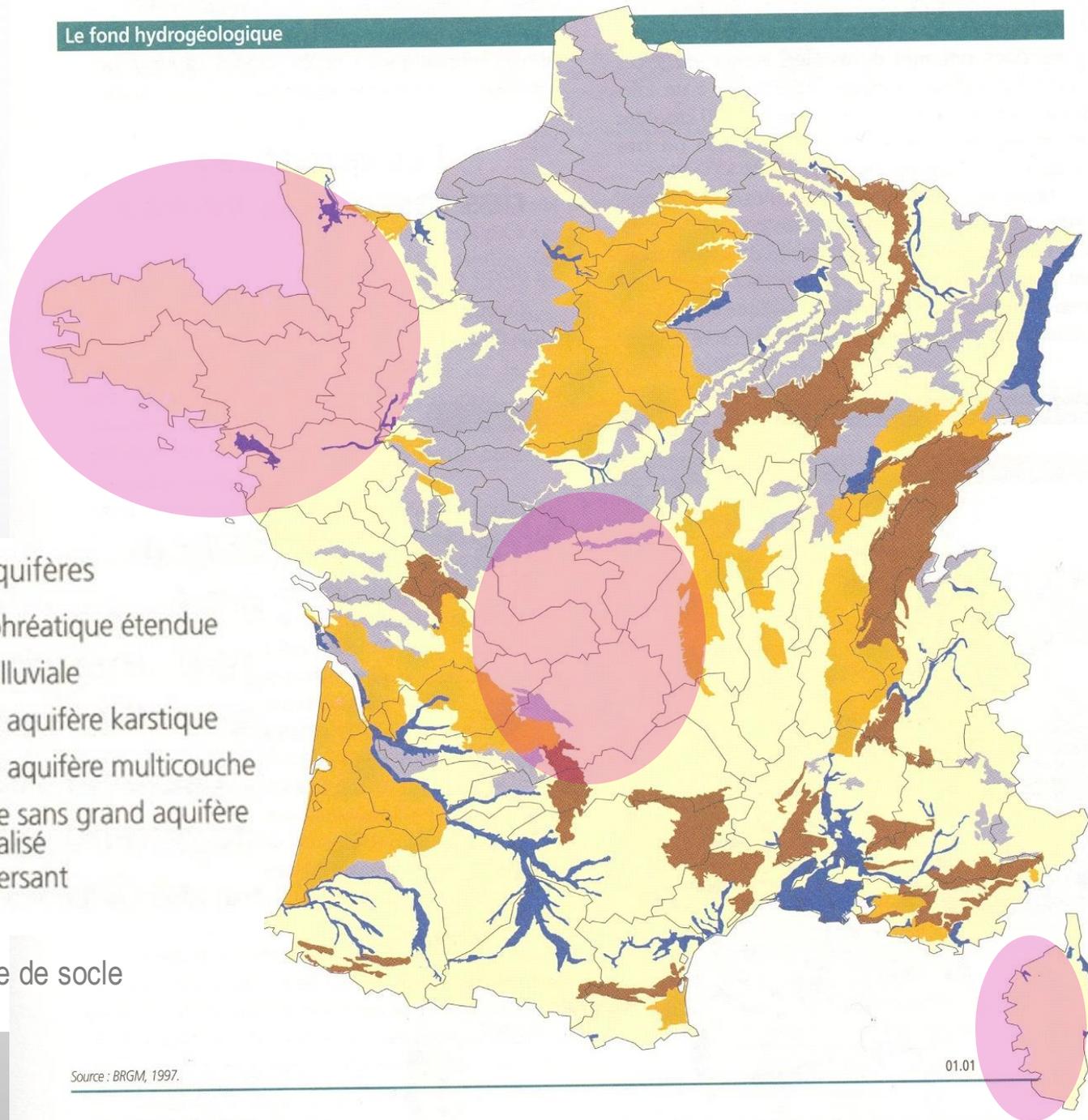
25 aquifères **captifs**

qui couvrent les 2/3
du territoire français

Le fond hydrogéologique

Systèmes aquifères

- Nappe phréatique étendue
- Nappe alluviale
- Système aquifère karstique
- Système aquifère multicouche
- Domaine sans grand aquifère individualisé
- Bassin versant
- Aquifère de socle



Source : BRGM, 1997.

01.01

L'eau dans les roches :

une ressource
exploitable

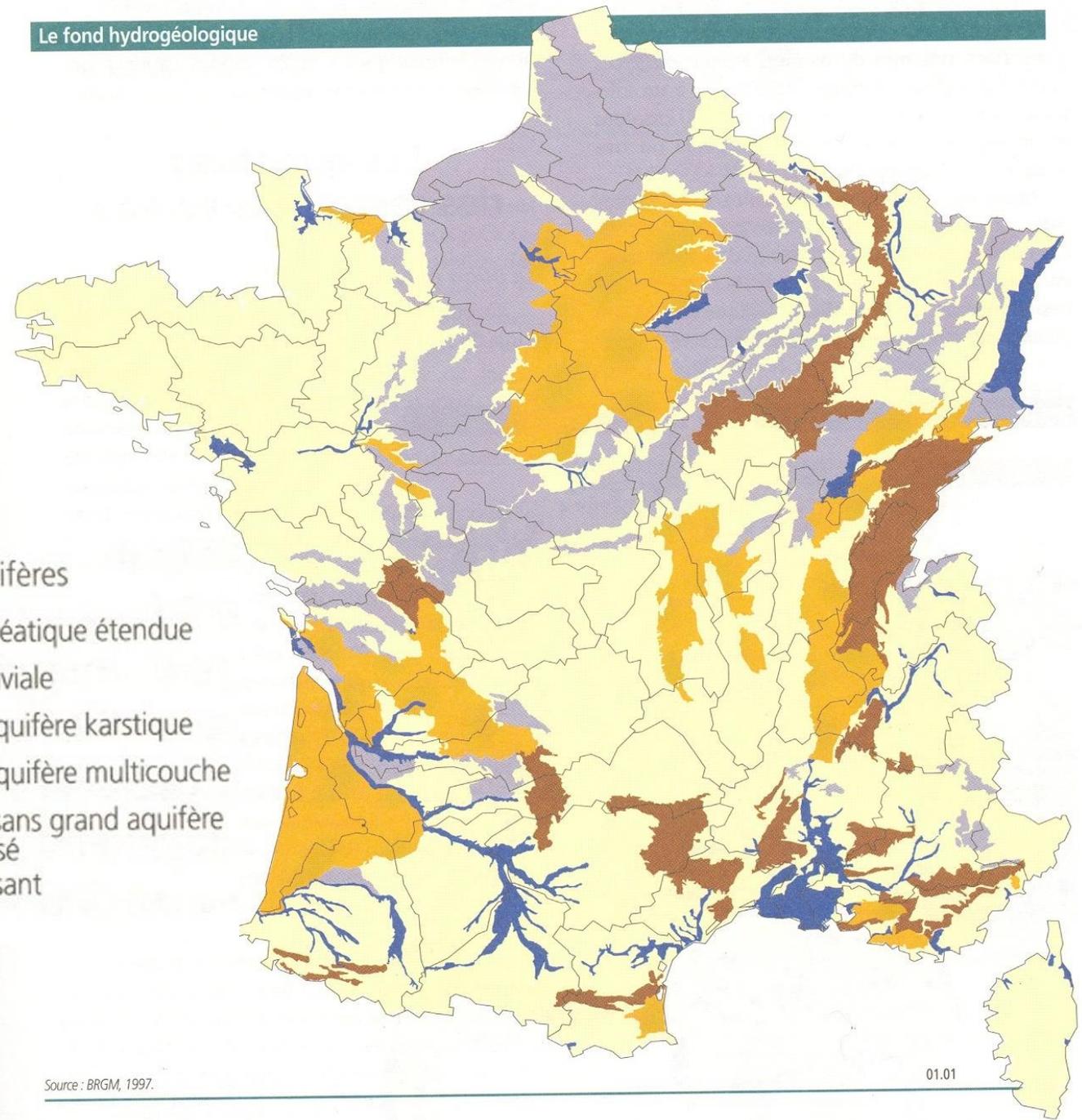
Les aquifères en France

Tous usages confondus, **46%** des eaux exploitées proviennent des nappes phréatiques (hors usage pour l'énergie - refroidissement des centrales)

L'usage domestique de l'eau provient pour **60 %** des nappes phréatiques.

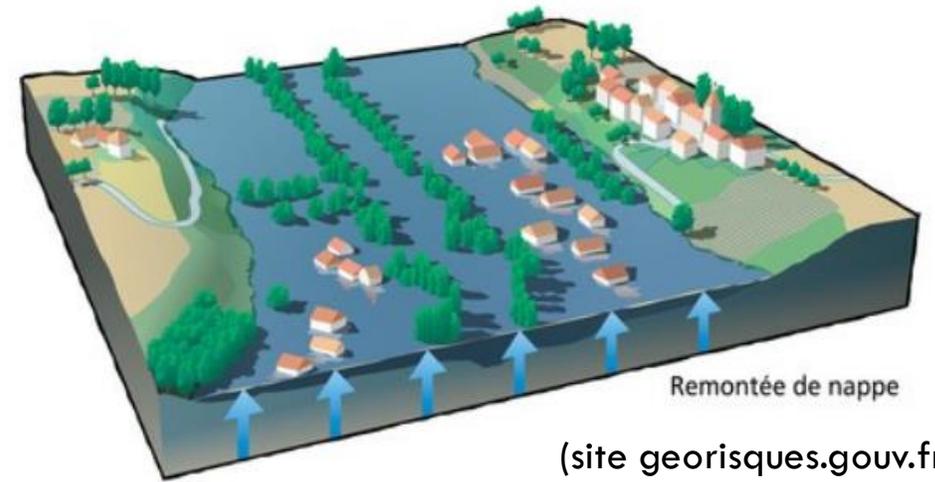
Systèmes aquifères

-  Nappe phréatique étendue
-  Nappe alluviale
-  Système aquifère karstique
-  Système aquifère multicouche
-  Domaine sans grand aquifère individualisé
-  Bassin versant



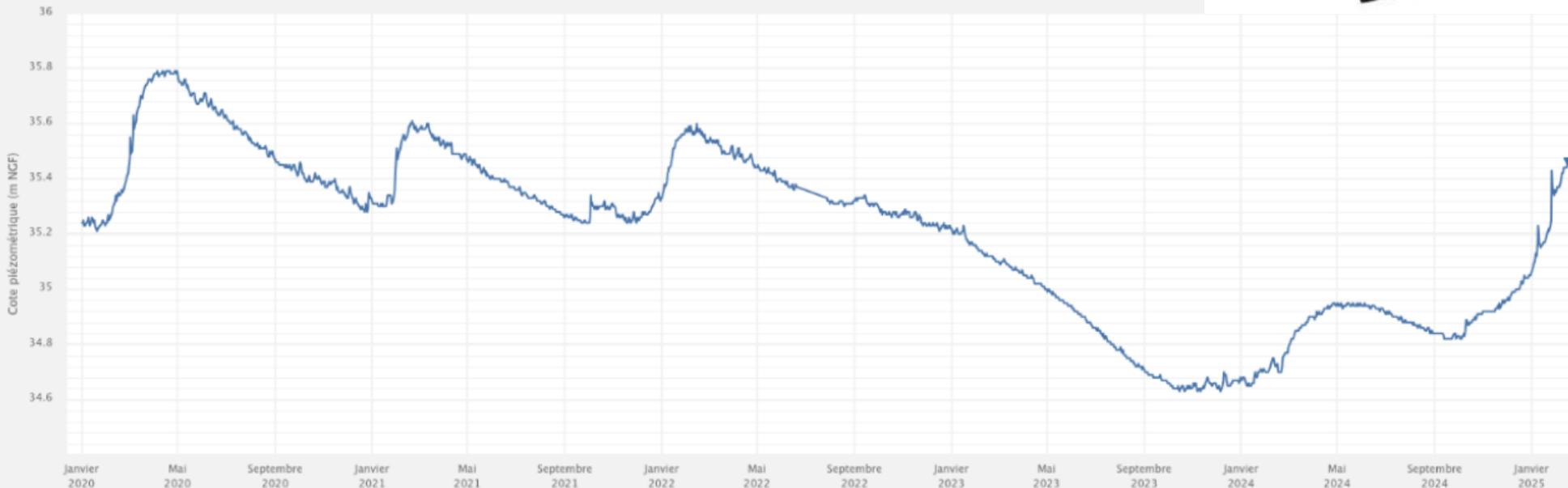
L'eau dans les roches : une ressource exploitable

...à surveiller



Piezomètre - BSS000LETA (01516X0004/S1) - Piézomètre du hameau d'Apremont (Perdreauville)
du 01/01/2020 au 17/02/2025 - Uniquement les données validées correctes et en cours de validation

(site georisques.gouv.fr)



L'eau dans les roches : une ressource exploitable

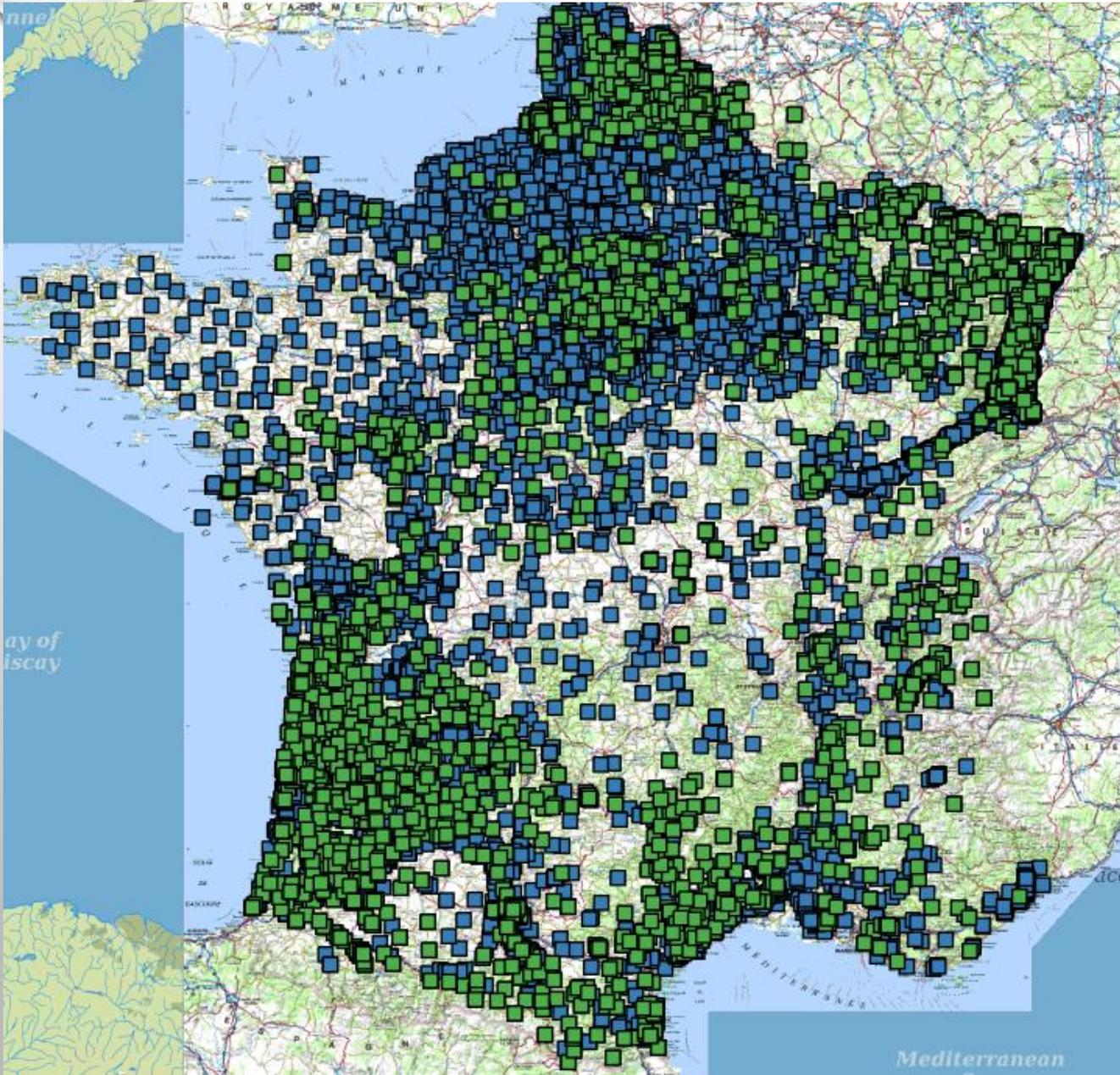
...à surveiller

Réseau de piézomètres en France

Toutes les données acquises par ces piézomètres sont centralisées sur le site ADES = Accès aux Données sur les Eaux Souterraines

<https://ades.eaufrance.fr>

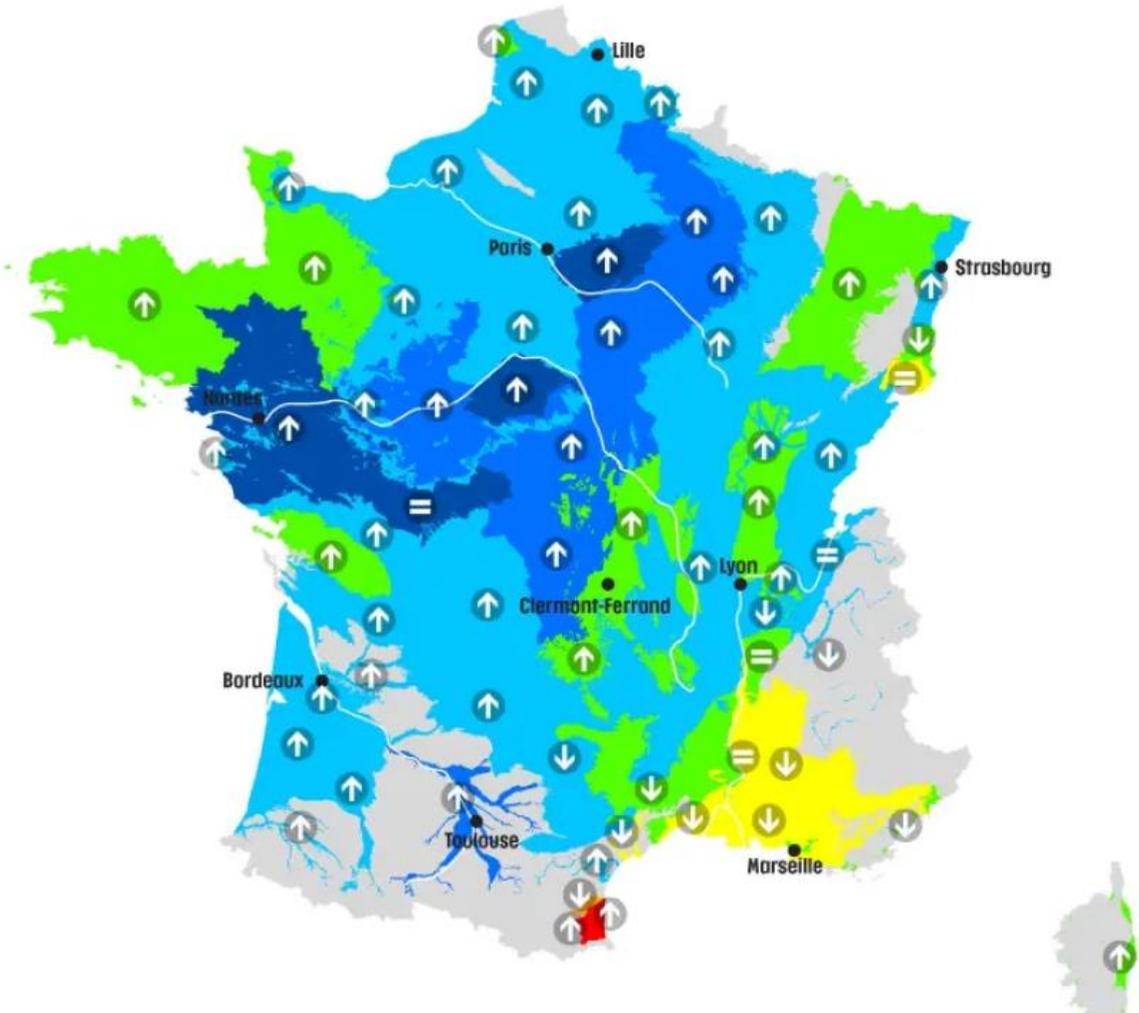
- piézomètres
- piézomètres et qualimètres



L'eau dans les roches : une ressource exploitable

...à surveiller

Situation des nappes au 1^{er} janvier 2025



Bulletin mensuel du BRGM

(<https://www.brgm.fr/fr/tag/communiqu\u00e9-presse>)

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

L'eau dans les roches : une ressource exploitable



SERVICE
GÉOLOGIQUE
NATIONAL

...à surveiller

i-InfoTerre : l'application d'accès aux cartes géologiques

L'accès nomade aux données géoscientifiques du BRGM



InfoNappe : l'application d'accès aux données sur les eaux souterraines

InfoNappe permet d'accéder depuis un mobile aux données sur les nappes d'eau souterraine accessibles sur le portail d'accès aux données sur les eaux souterraines (ADES).



InfoNappe permet d'accéder depuis un smartphone aux données sur les niveaux d'eau dans les nappes, via le portail d'accès aux données sur les eaux souterraines ADES : niveaux d'eau, qualité des eaux souterraines, etc.

Des données géoréférencées sur les eaux souterraines

L'eau dans les roches : une ressource exploitable

...à surveiller

I-InfoNappe

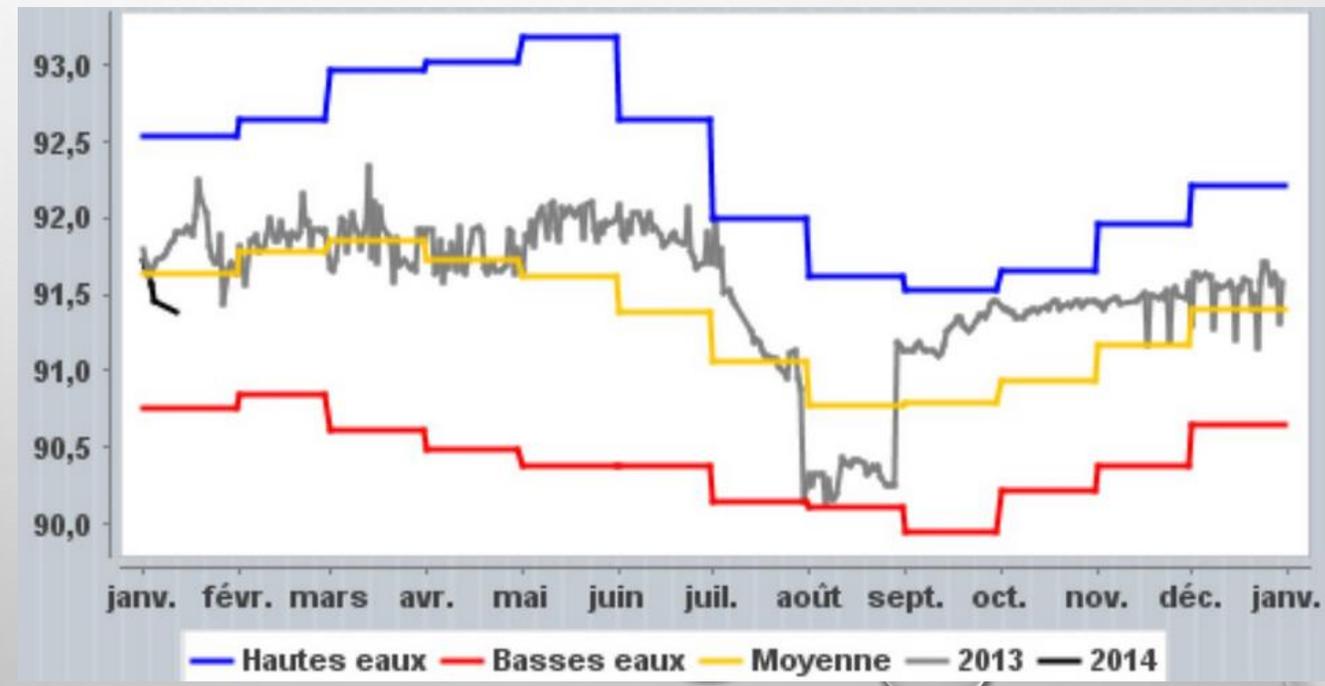
Position choisie

GPS : 47,829665°N 1,93844°E
Altitude : environ 110m
Proche Avenue Claude Guillemin, La Source

Masse d'eau sous jacente 4094 :
Sables et argiles miocènes de Sologne

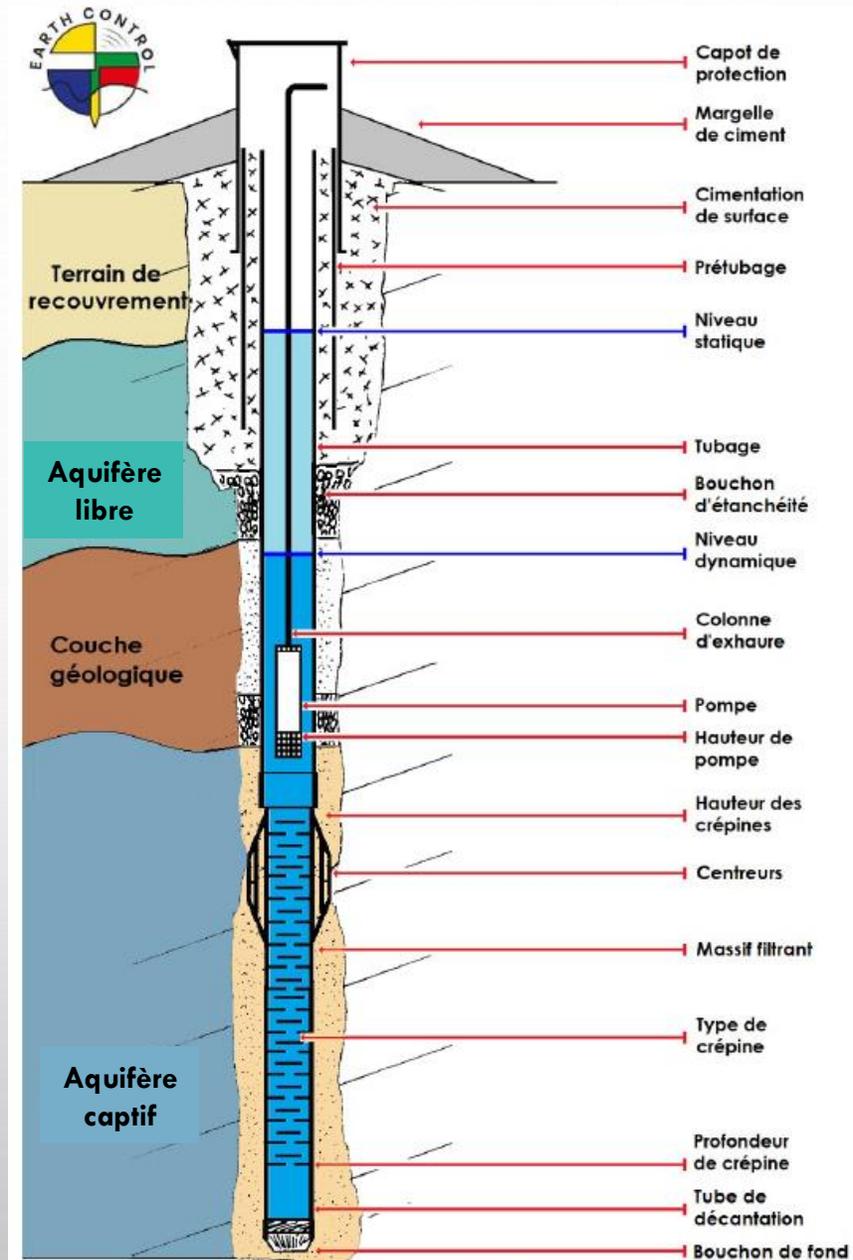
5 stations de mesure à ≈20kms

- à 4,2km, Saint-cyr-en-val
le 12 janv. 2014 (il y a 4 jours)
Code masse 03983X0267/PZ3
- à 17,5km, Gidy
le 12 janv. 2014 (il y a 4 jours)
Code masse 03631X0099/F
- à 18,3km, Chaumont-sur-tharonne
le 12 janv. 2014 (il y a 4 jours)
Code masse 04302X0101/F
- à 19km, Trainou
le 12 janv. 2014 (il y a 4 jours)
Code masse 03634X0093/F
- à 23,5km, Gemigny
le 12 janv. 2014 (il y a 4 jours)
Code masse 03627X0052/P1



L'eau dans les roches : une ressource exploitable

**Exploitation des eaux souterraines :
mise en place de puits de pompage**

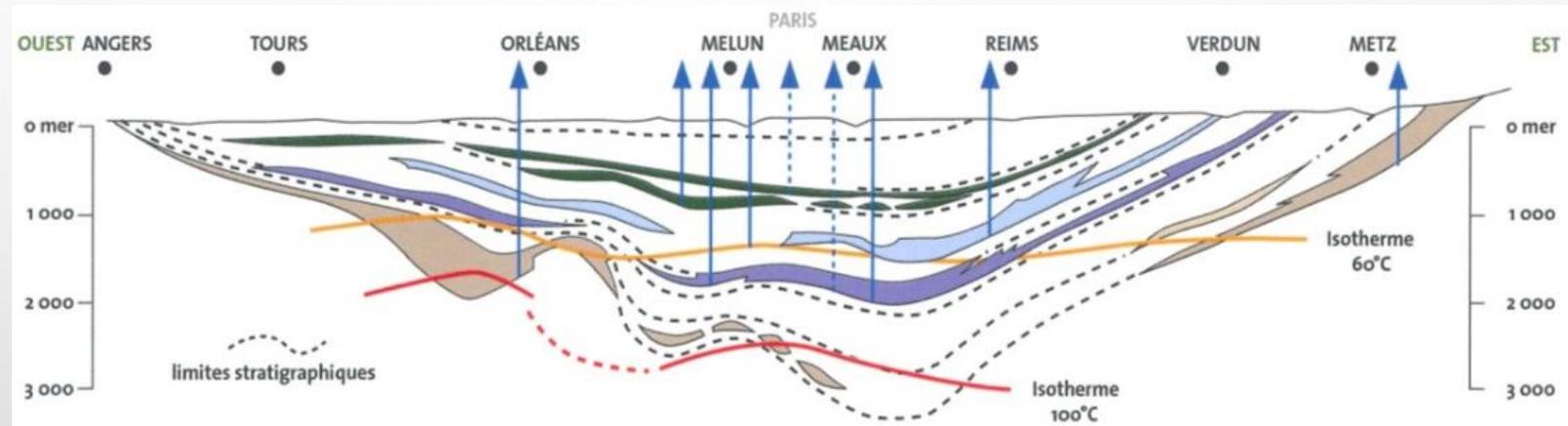


Coupe d'un forage et désignations

L'eau dans les roches : une ressource exploitable

... mais pas que pour l'eau !

AUTRES USAGES DES AQUIFÈRES



1. La géothermie

géothermie très basse énergie ($T < 30^{\circ}\text{C}$) ayant recours aux pompes à chaleur (PAC) pour l'exploitation de l'énergie contenue dans les nappes d'eau souterraine peu profondes.

géothermie basse énergie ($30^{\circ}\text{C} < T < 90^{\circ}\text{C}$) directement utilisables pour des applications thermiques.

géothermie moyenne énergie ($90^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$) indirectement valorisable pour la production d'électricité.

géothermie haute énergie ($T > 150^{\circ}\text{C}$) pour la production d'électricité

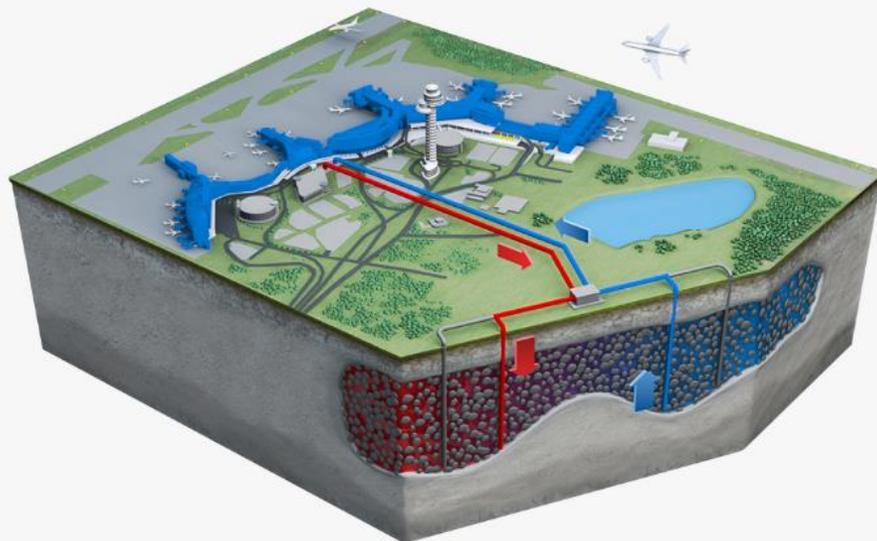
L'eau dans les roches : une ressource exploitable

... mais pas que pour l'eau !

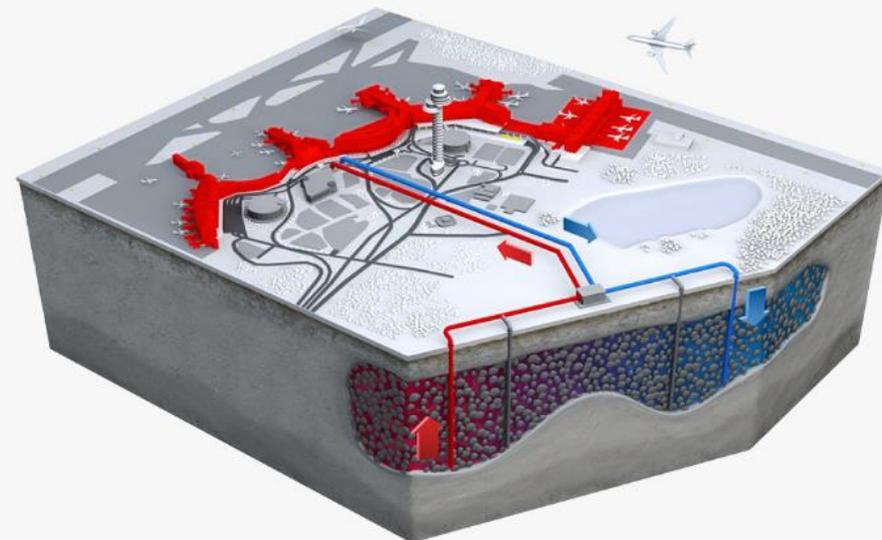
AUTRES USAGES DES AQUIFÈRES

2. Le stockage de chaleur en aquifère (ATES)

ATES Summer Operation - Cooling



ATES Winter Operation - Heating

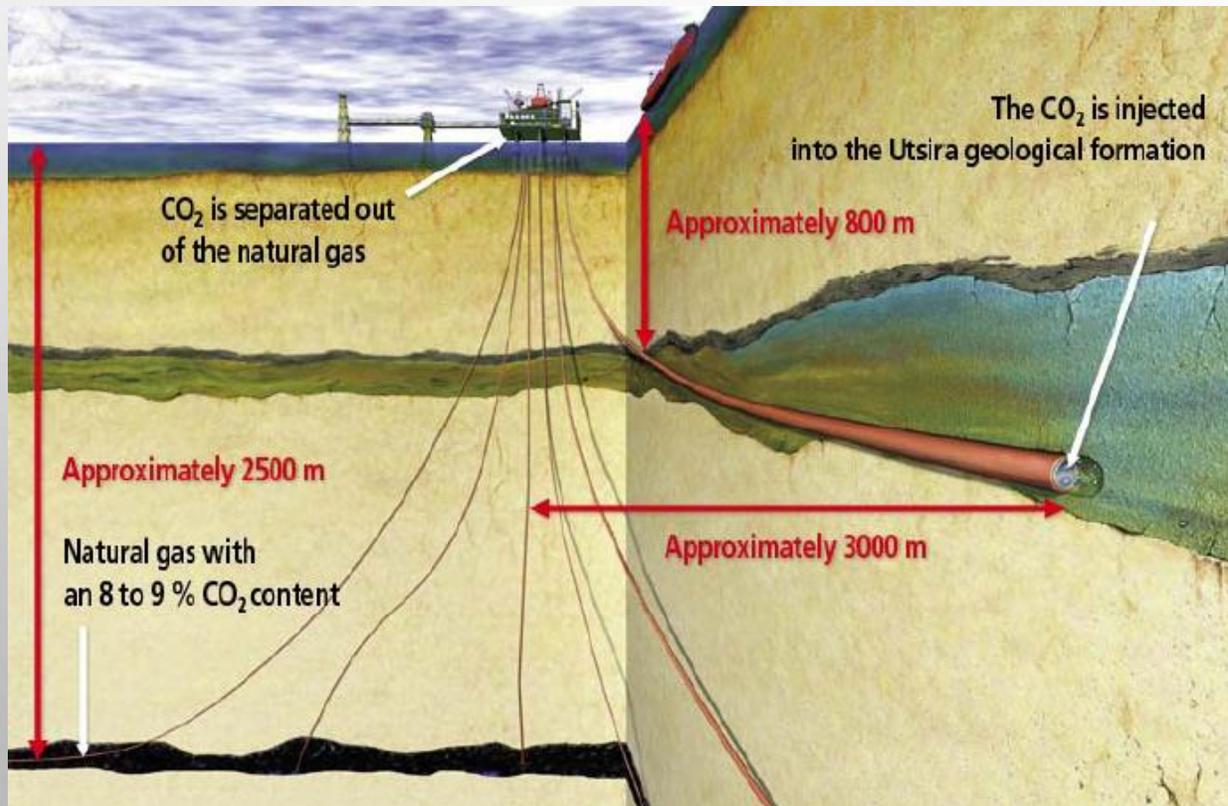


L'eau dans les roches : une ressource exploitable

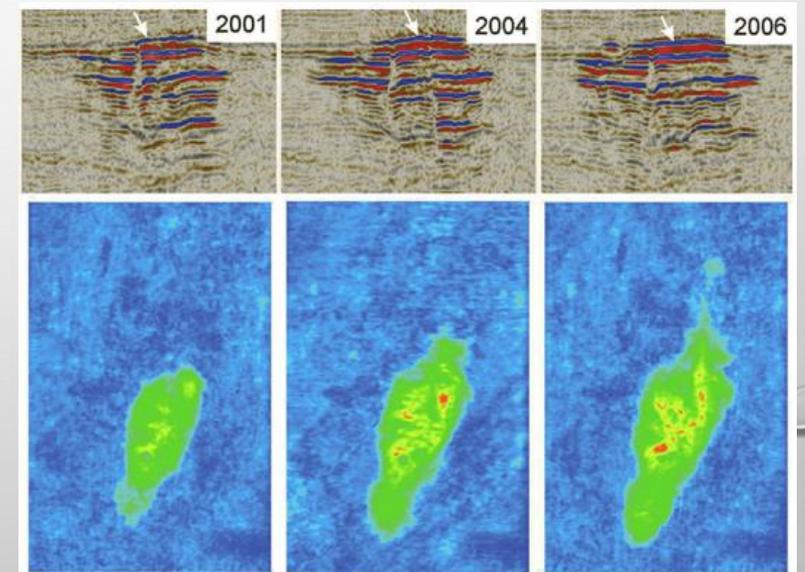
... mais pas que pour l'eau !

AUTRES USAGES DES AQUIFÈRES

3. Le stockage de gaz à effet de serre en aquifère



Suivi temporel avec la géophysique



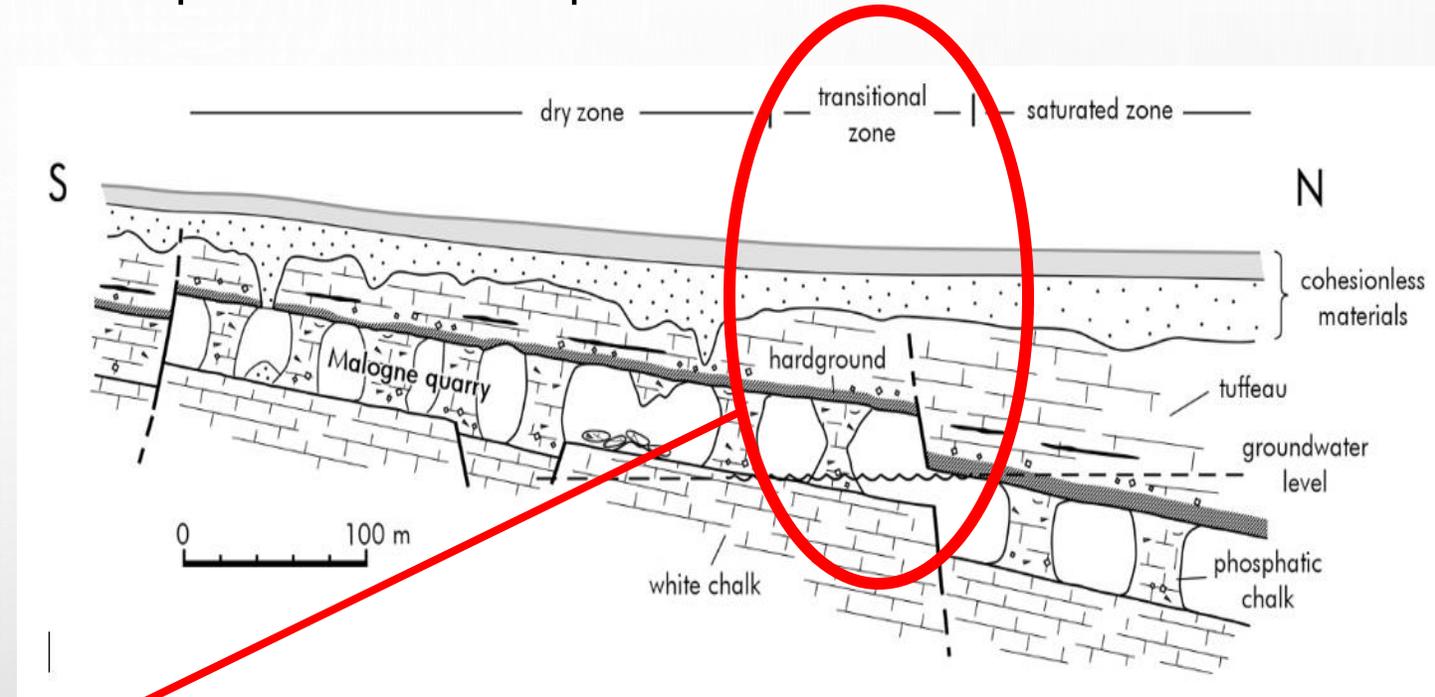
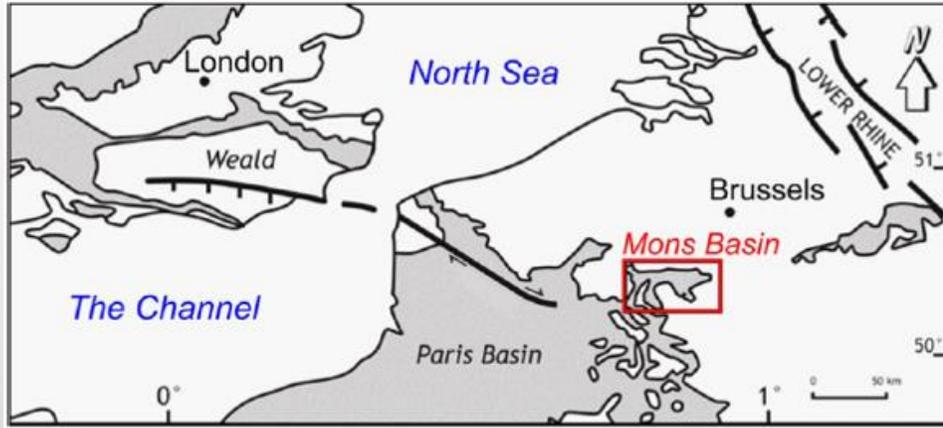
L'eau dans les roches :
un pouvoir affaiblissant



L'eau dans les roches : un pouvoir affaiblissant



Travaux de recherche sur l'impact de l'eau sur le comportement mécanique de craies du Bassin de Paris



Carrière souterraine de La Malogne exploitée pour sa craie phosphatée

L'eau dans les roches : un pouvoir affaiblissant



Travaux de recherche sur l'impact de l'eau sur le comportement mécanique de craies du Bassin de Paris

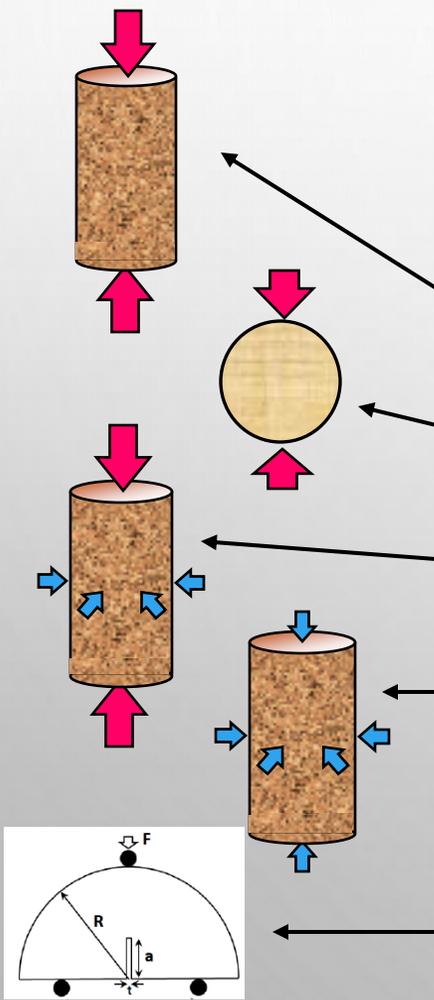


Échantillonnage de blocs de craie dans la carrière souterraine de La Malogne

L'eau dans les roches : un pouvoir affaiblissant



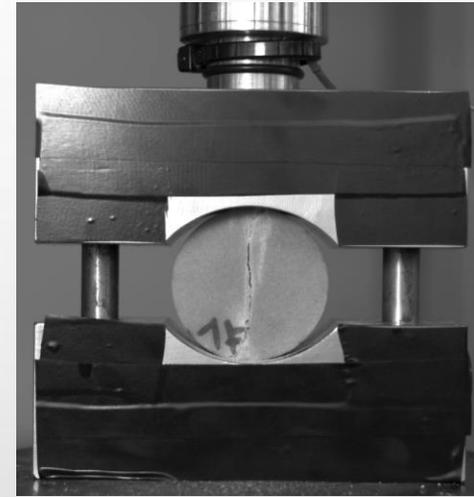
Travaux de recherche sur l'impact de l'eau sur le comportement mécanique de craies du Bassin de Paris



		Ciply Chalk	
Testing Method	Properties	Dry Rock	Water Saturated Rock
Uniaxial compression	UCS (MPa)	4.4	1.7
	Young's Modulus (GPa)	1.2	0.5
Brazilian test	Tensile strength (MPa)	-0.75	-0.56
Triaxial compression @1.5 MPa confining pressure	Compressive strength (MPa)	9.7	4.0
	Young's Modulus (GPa)	2.3	1.1
Isotropic compression	Critical pressure (MPa)	16.0	5.9
Triaxial tests	Internal friction coefficient (-)	X	X
	Cohesion (MPa)	X	X
Semi-circular bending test	Fracture toughness K_{IC} (MPa·m ^{1/2})	0.0479	0.0287



Presse uniaxiale



Fracturation d'un grès



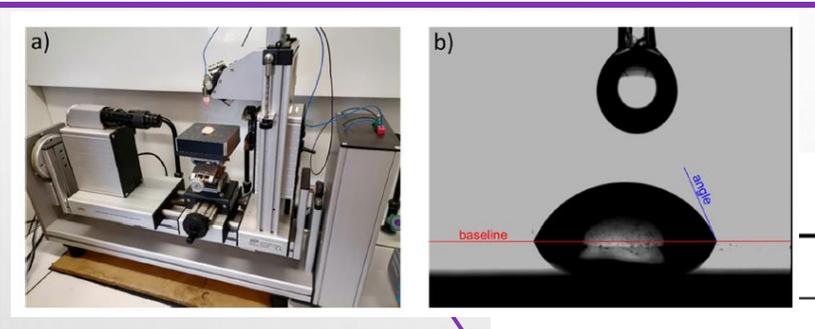
Propagation de fracture

L'eau dans les roches : un pouvoir affaiblissant



Interprétation : l'énergie de surface de la roche en présence d'eau est plus faible qu'en présence d'air

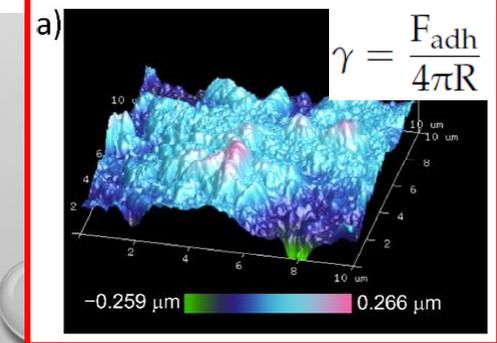
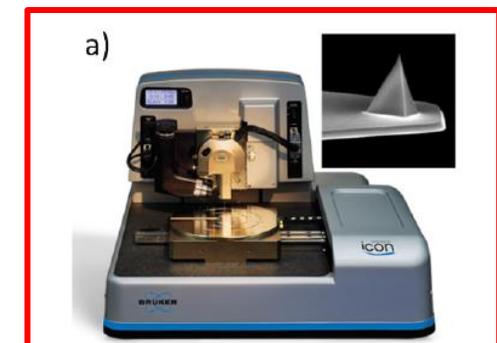
Mesure d'angle de contact



→ Il est alors plus facile de fracturer la roche humide que la roche sèche !

	Ciply Chalk	
Surface Energy (J/m ²)	Dry Rock	Water-Saturated Rock
From contact angle measurements	0.0253	not measurable
From AFM	0.0196	0.0141
From K _{IC} measurements	1.01	0.84

Microscope à force atomique



Mesure de ténacité



$$\gamma = \frac{K_{IC}^2}{2E}$$

« Water weakening »



L'eau dans les roches : une ressource exploitable



importante, vitale, à surveiller, à protéger

un pouvoir affaiblissant



qui diminue la résistance mécanique des roches et augmente les risques de rupture

christian.david@cyu.fr

