

# Cycle de l'eau et Bassin Versant 2024

Cours de Séverin PISTRE

2 parties

- Cycle de l'eau et bilan hydrique
- La phase souterraine du cycle de l'eau

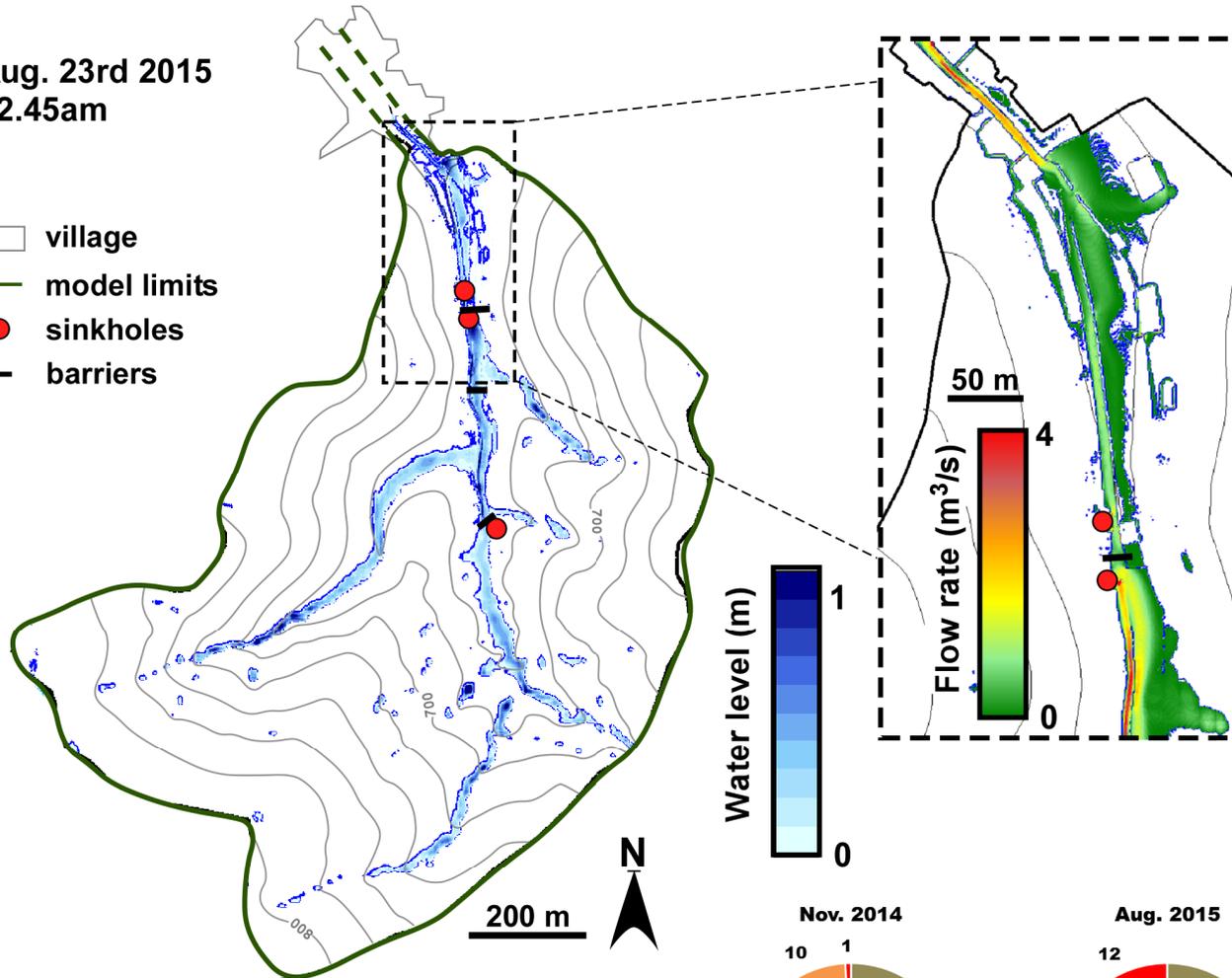


# Modélisation du rôle du karst dans les crues

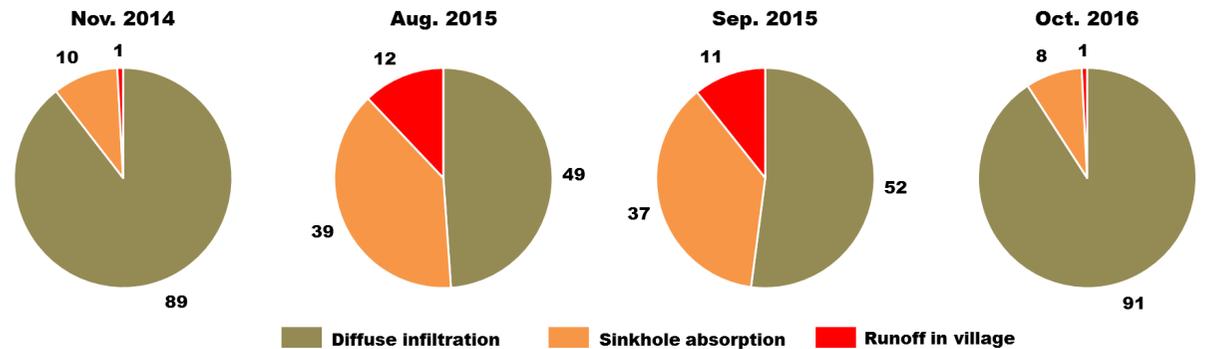
## Village de la Vacquerie

Aug. 23rd 2015  
12.45am

-  village
-  model limits
-  sinkholes
-  barriers

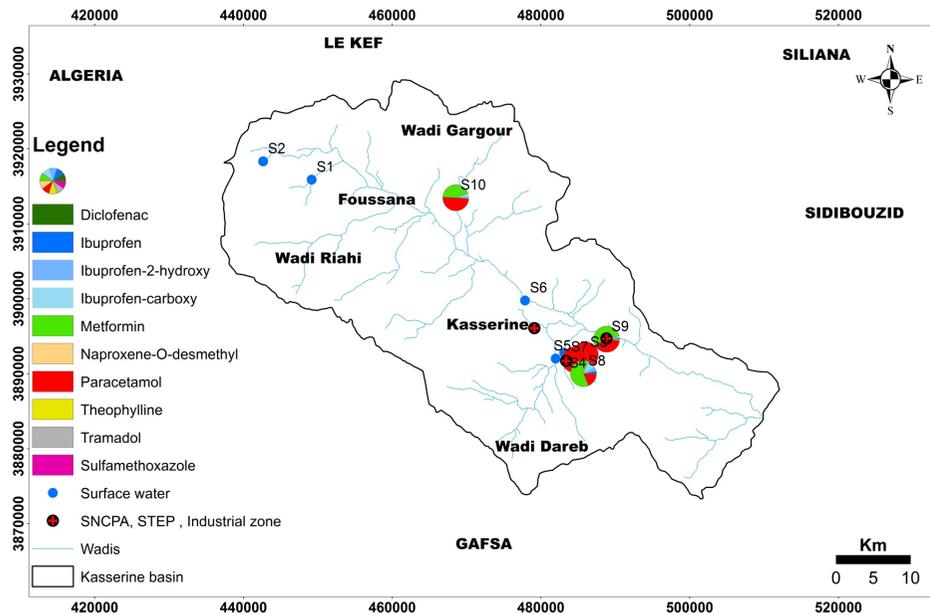


Réalisé avec des  
étudiants du M2ER

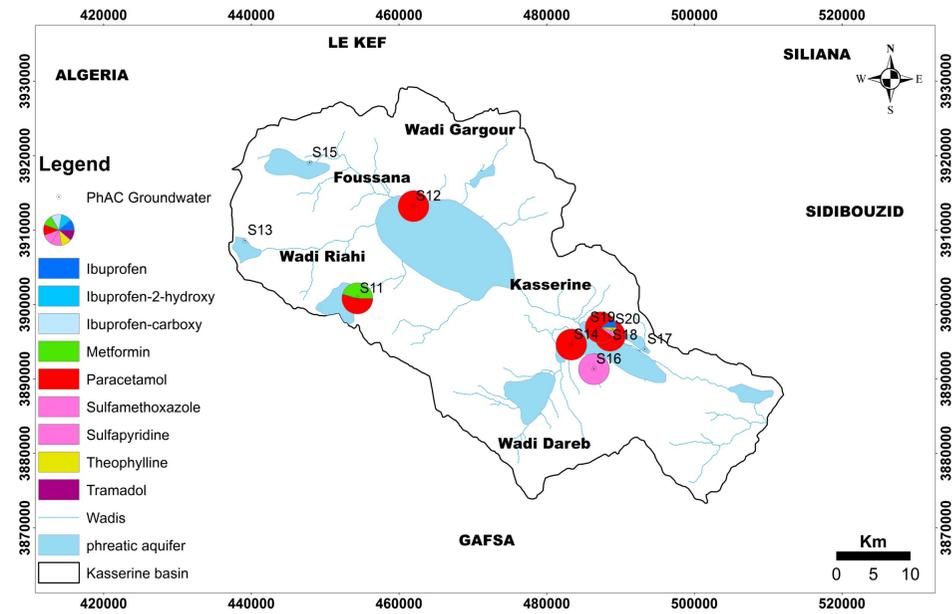


# Modélisation de la pollution anthropique des ressources en eaux en milieu méditerranéen : Application aux eaux du bassin de Kasserine (Tunisie centrale)

Thèse Wafa Hayouni, en cours



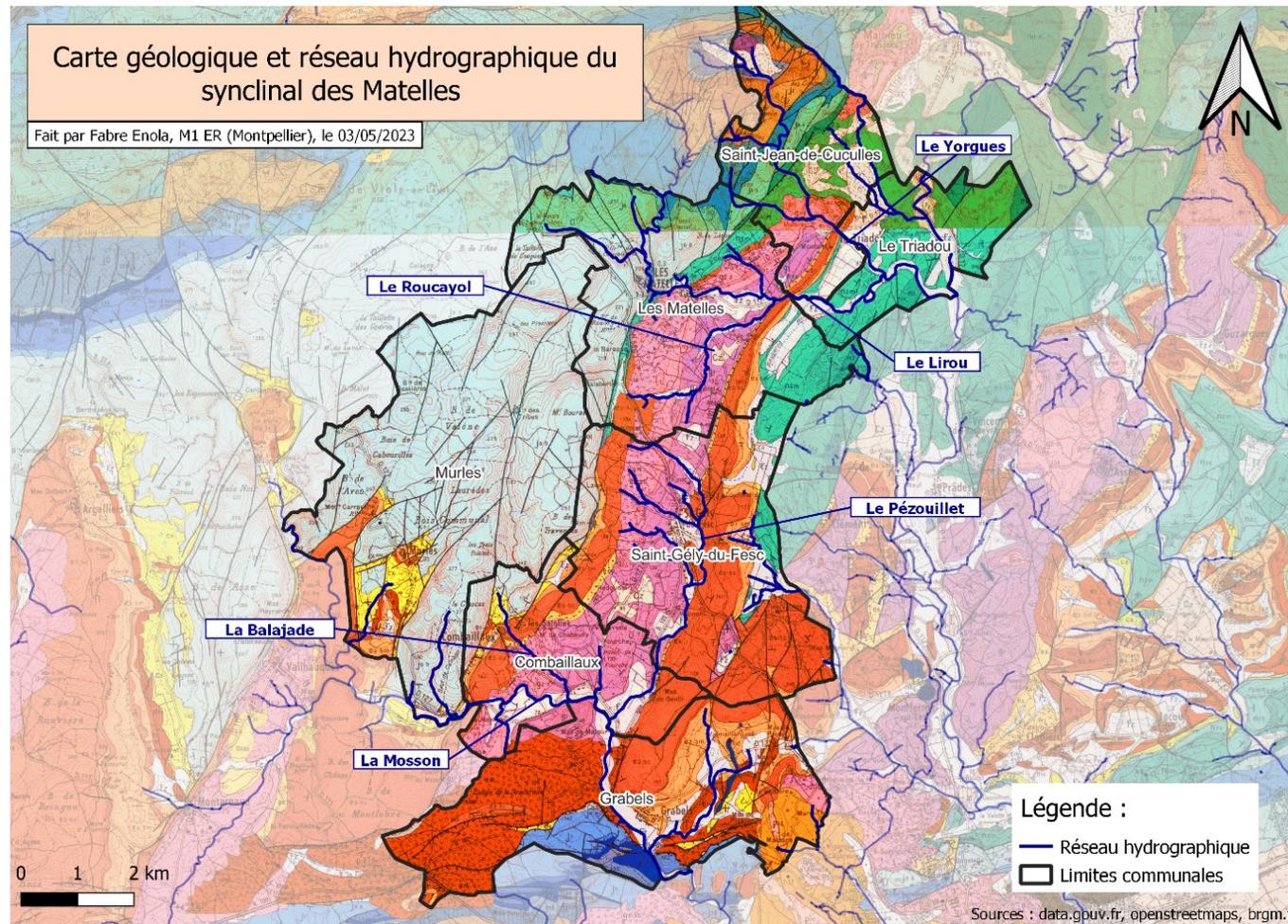
*Eaux de surface*



*Eaux souterraines*

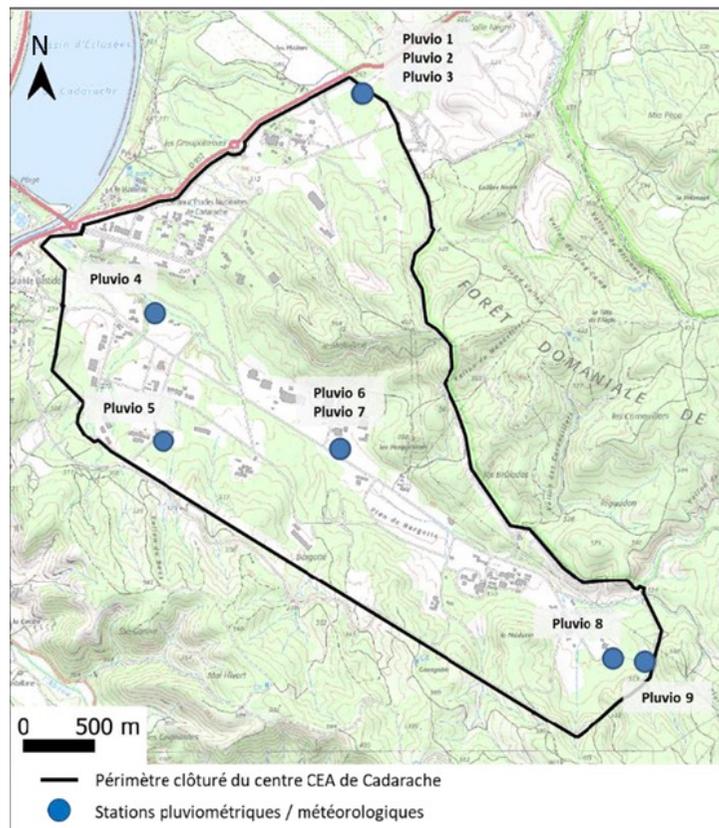
# Fonctionnement hydrogéologique et potentiel de l'aquifère carbonaté lutétien des Matelles-St Gély du Fesc

Stages de M1ER Enola Fabre (2023) et Hugo DeGraaf (2024)



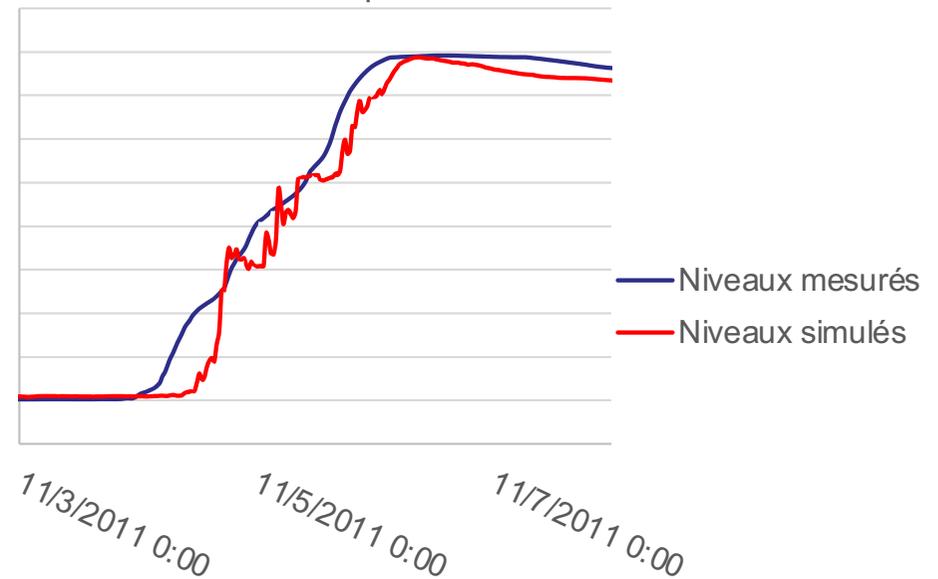
# Apport des Réseaux de Neurones Artificiels dans la prévision du risque de crue karstique sur le site CEA de Cadarache

Thèse Manon Erguy, 2024



Station météorologique / pluviométrique
Pluvio 1 Pluvio 2 Pluvio 3
Pluvio 4
Pluvio 5
Pluvio 6 Pluvio 7
Pluvio 8
Pluvio 9

Simulation de l'évènement de novembre 2011 par réseaux de neurones sur CABRI07 avec horizon de prévision de 12h



## Expertise pour la protection des tombes de pharaons site de Tanis - Egypte

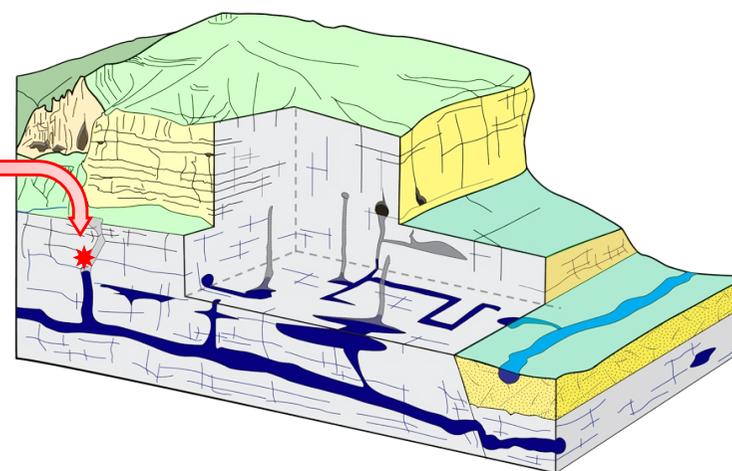
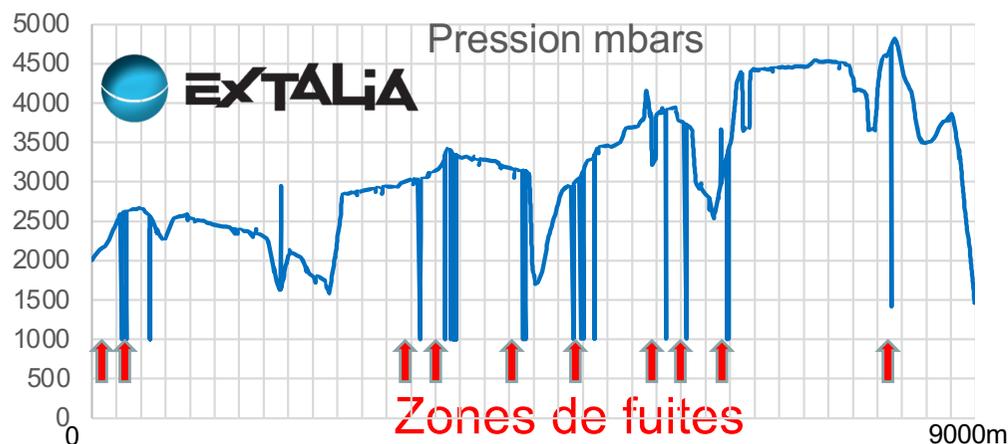
Stage M2ER 2020



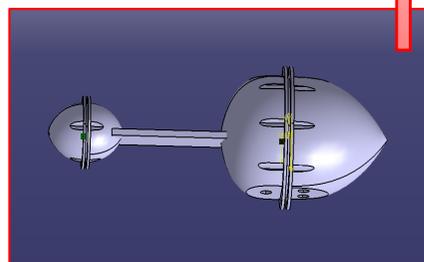
Thèse Nicolas Troesch, 2024

## Détection de fuites sur canalisation d'amenée d'eau (Montpellier 34)

- ➔ *Brevet Europe, Brésil, Russie (Pistre S. et al, 2012)*
- ➔ *Création start'up EXTALIA (2014- Inspection Canalisations d'eau)*



SAM-P (2016)



Karst Voyager (prototype 2024)

**Les enjeux de l'eau**



Inde, 2019

## Les enjeux de l'eau

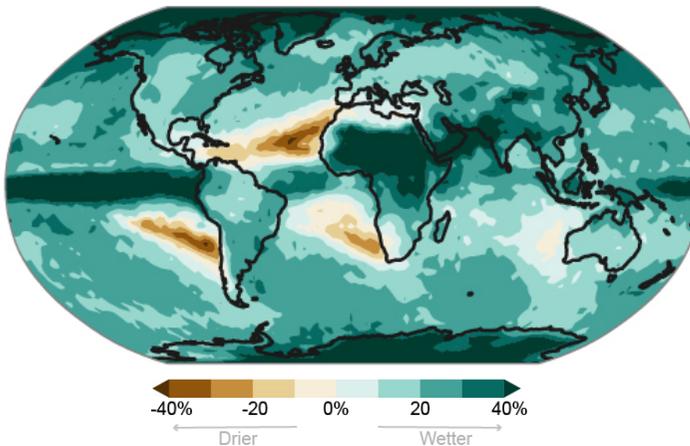
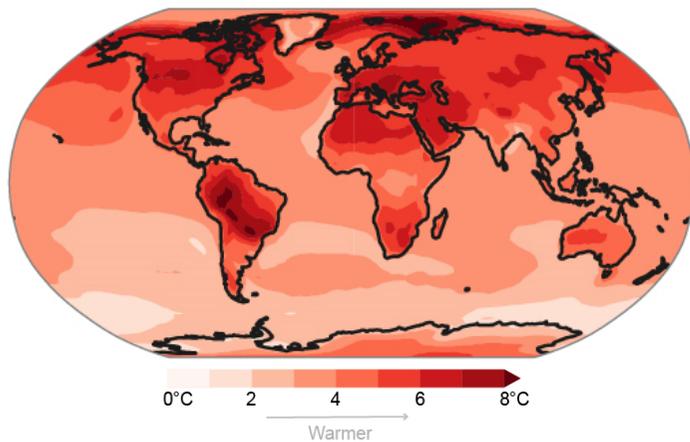
Irak, 2018



# Les enjeux de l'eau

## Les conséquences du changement climatique

Modification de l'occurrence des extrêmes climatiques (GIEC 2021)



### Température

Journée la plus chaude par décennie (+°C)

### Sécheresse

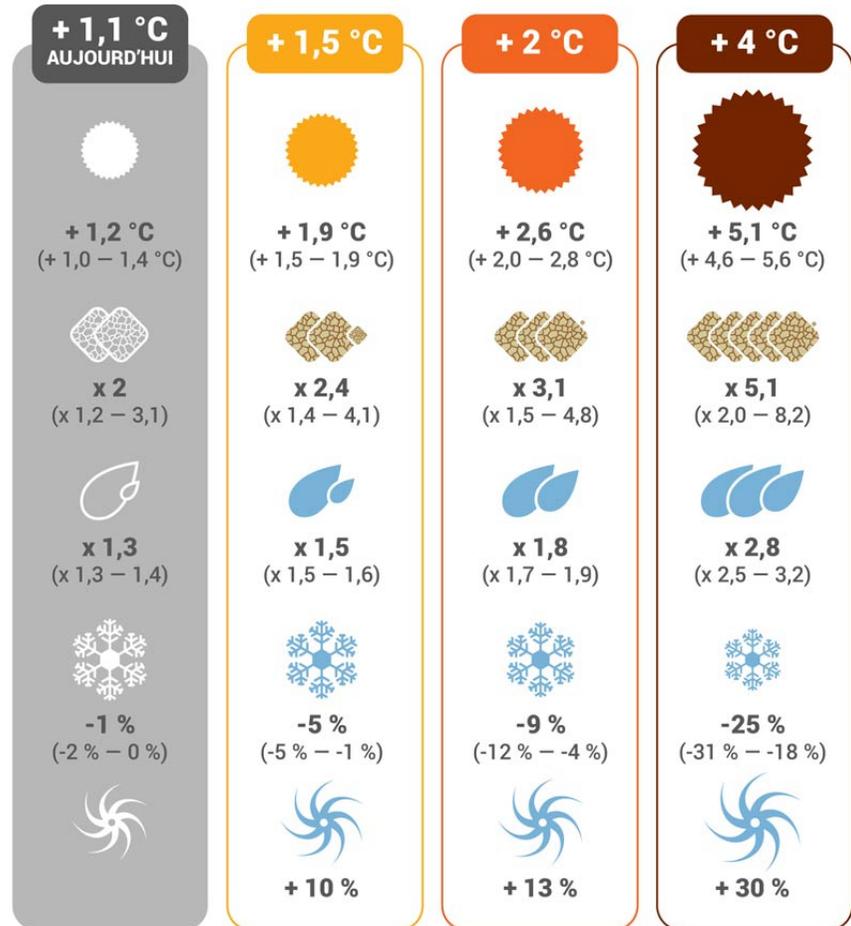
Une sécheresse qui se produisait une fois par décennie se produira x fois plus

### Précipitations

Occurrence des extrêmes pluvieux par décennie

### Enneigement

### Cyclones tropicaux



## Les enjeux de l'eau

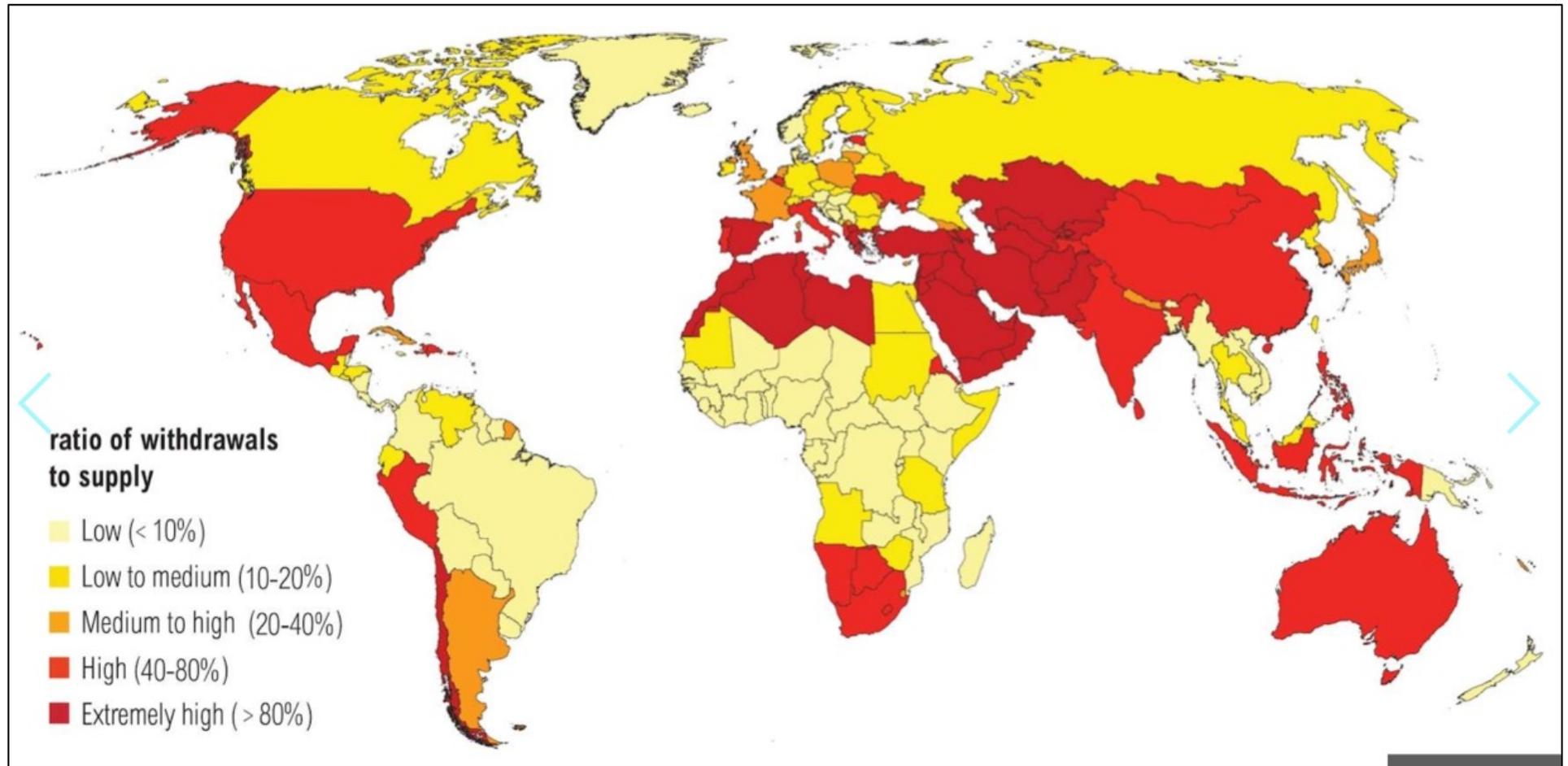


Gard 2014

Loiret 2019



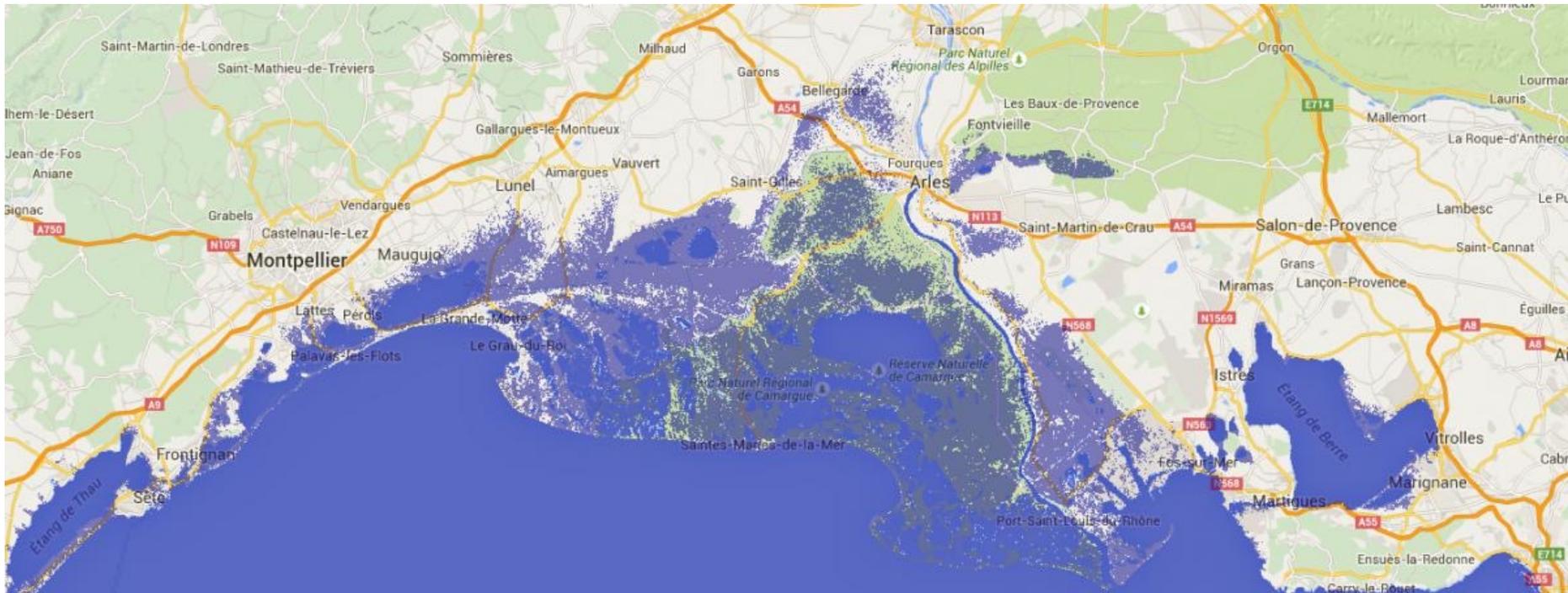
## Les enjeux de l'eau



Carte des projections de stress hydrique en 2040

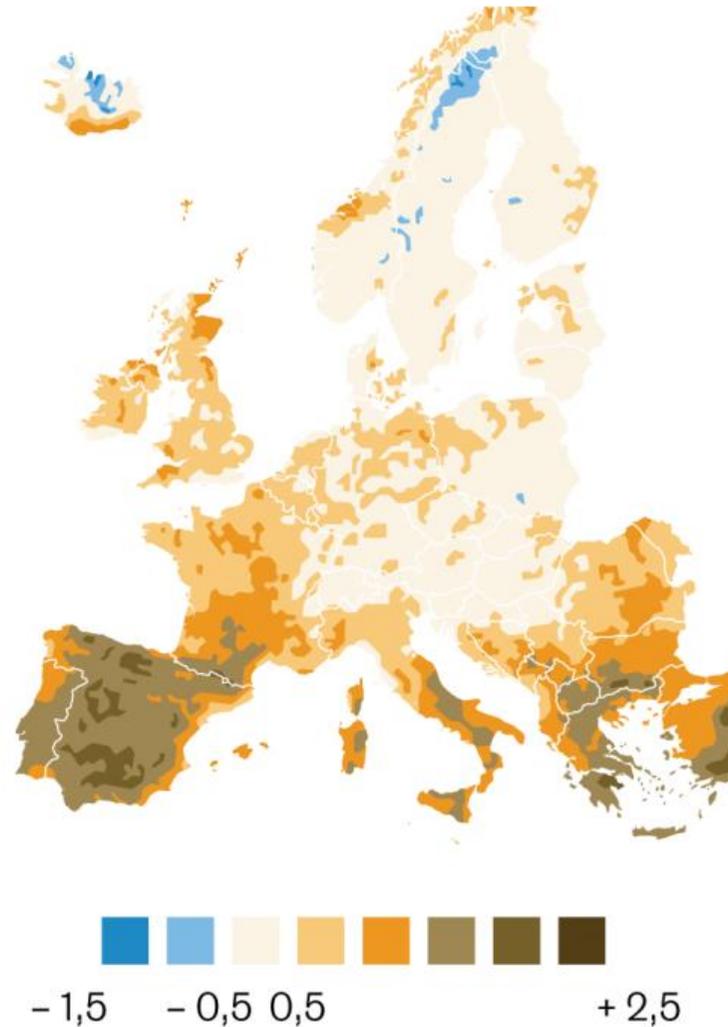
## Les enjeux de l'eau

Simulation à l'horizon 2050 des conséquences de la hausse du niveau marin dans le delta du Rhône



## Les enjeux de l'eau

Baisse de la recharge des hydrosystèmes : sols, nappes, rivières, lacs



*Fréquence des épisodes de sécheresse à l'horizon 2041-2070 par rapport à la période 1981-2010 – à partir d'indices standardisés (Infographie Le Monde à partir de données Agence Européenne de l'Environnement)*

## Quelques chiffres

32% de la population en Afrique n'a pas accès à une eau assainie.

5 milliards de personnes seront affectées par une pénurie d'eau d'ici 2050

12 millions d'hectares de terres agricoles disparaissent chaque année sous l'effet du réchauffement climatique = 20 Mt de céréales.

35% de l'eau potable est perdue en fuites dans les réseaux avant d'atteindre le robinet du consommateur ( $1M \cdot m^3$  sur bassin RMC)

1% de l'eau potable est dessalée sur la planète = 255 usines

2% de l'eau traitée est recyclée et réutilisée

10% de la conso électrique mondiale est consacrée au pompage de l'eau.

50% de la population mondiale est nourrie par les océans.

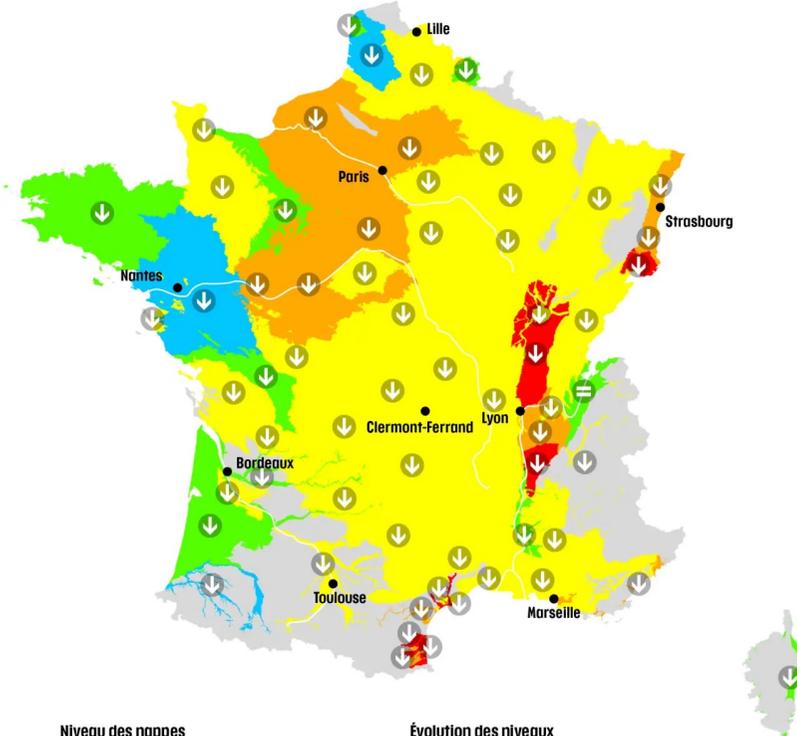
269 000 tonnes de plastiques flottent aujourd'hui à la surface des océans.

# Les enjeux de l'eau en France



SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

## Situation des nappes au 1<sup>er</sup> août 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

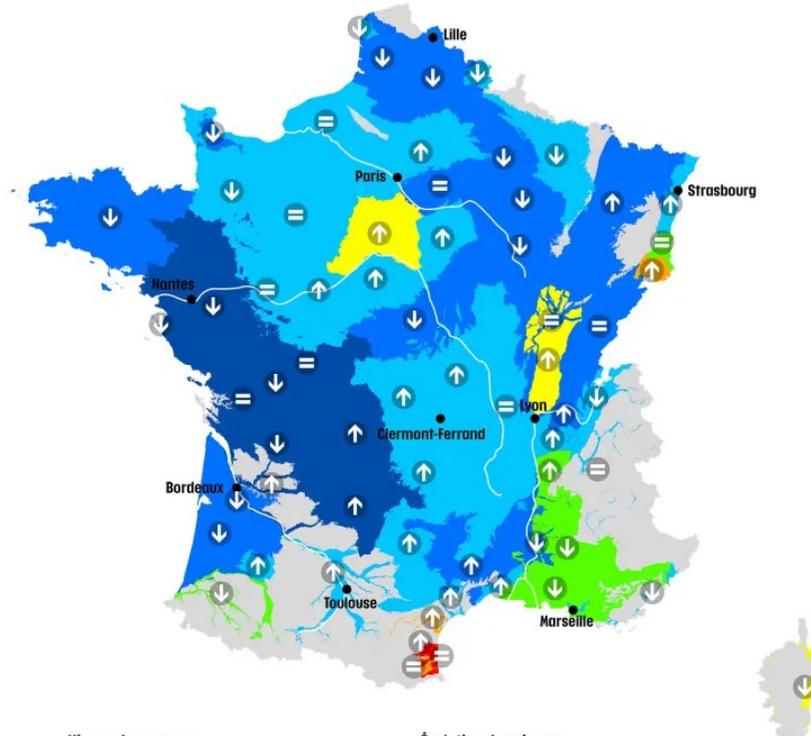
Cette carte présente les indicateurs globaux traduisant les fluctuations moyennes des nappes. Ils sont établis à partir des indicateurs ponctuels relevés au niveau des nappes (piézomètres). L'indicateur « Niveau des nappes » compare le mois en cours par rapport aux mêmes mois de l'ensemble de la chronique, soit au minimum 15 ans de données, et jusqu'à plus de 100 ans. Il est réparti en 7 classes, du niveau le plus bas (en rouge) au niveau le plus haut (en bleu foncé). L'indicateur « Évolution des niveaux » traduit la variation du niveau d'eau du mois échu par rapport aux 2 mois précédents (stable, à la hausse ou à la baisse).

Carte établie le 8 août 2023 par le BRGM, à partir de données acquises jusqu'au 31 juillet 2023. Source des données: banque ADES (www.ades.eaufrance.fr) / Hydroportail (hydro.eaufrance.fr) / Fond de carte © IGN. Producteurs de données et contribution: APRONA, BRGM, Conseil Départemental de la Vendée, Conseil Départemental des Landes, Conseil Départemental du Lot, EPB Vistre Vistrenque, Parc Naturel Régional des Grandes Causses, Syndicat Mixte d'Études et de Travaux de l'Astien (SMETA), Syndicat Mixte pour la protection et la gestion des nappes souterraines de la plaine du Roussillon (SMNPR).



SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

## Situation des nappes au 1<sup>er</sup> juin 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

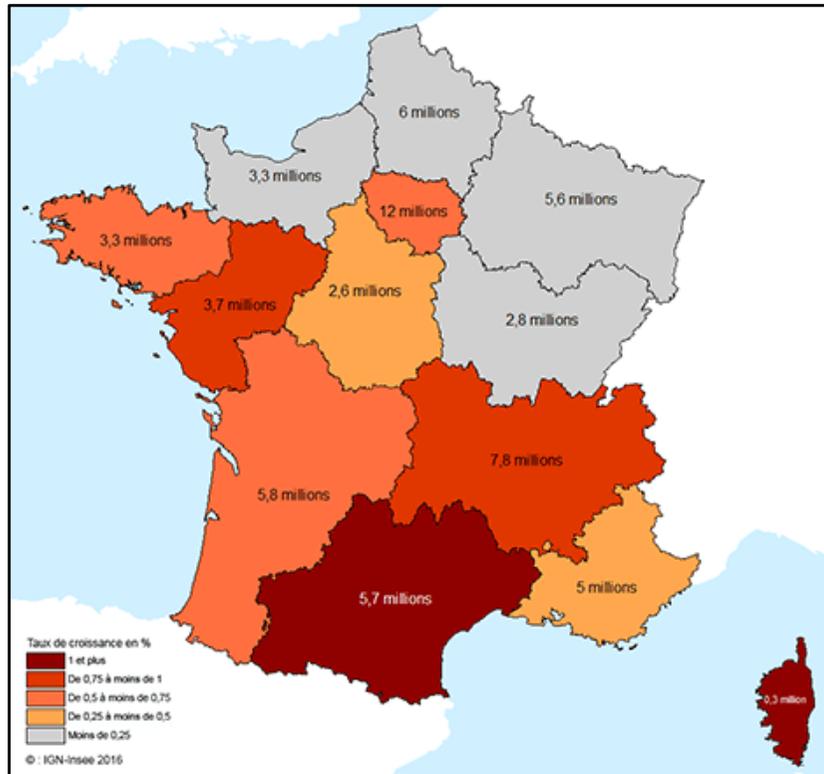
© BRGM / www.brgm.fr

Cette carte présente les indicateurs globaux traduisant les fluctuations moyennes des nappes. Ils sont établis à partir des indicateurs ponctuels relevés au niveau des nappes (piézomètres). L'indicateur « Niveau des nappes » compare le mois en cours par rapport aux mêmes mois de l'ensemble de la chronique, soit au minimum 15 ans de données, et jusqu'à plus de 100 ans. Il est réparti en 7 classes, du niveau le plus bas (en rouge) au niveau le plus haut (en bleu foncé). L'indicateur « Évolution des niveaux » traduit la variation du niveau d'eau du mois échu par rapport aux 2 mois précédents (stable, à la hausse ou à la baisse).

Carte établie le 7 juin 2024 par le BRGM, à partir de données acquises jusqu'au 31 mai 2024. Source des données: ADES (ades.eaufrance.fr) / Hydroportail (hydro.eaufrance.fr) / Fond de carte © IGN. Producteurs de données et contribution: APRONA, BRGM, Conseil Départemental de la Vendée, Conseil Départemental des Landes, Conseil Départemental du Lot, EPB Vistre Vistrenque, Parc Naturel Régional des Grandes Causses, Syndicat Mixte d'Études et de Travaux de l'Astien (SMETA), Syndicat Mixte pour la protection et la gestion des nappes souterraines de la plaine du Roussillon (SMNPR).

## Les enjeux de l'eau en France

→ Répondre à la hausse de la demande en eau domestique



### En Occitanie

- En moyenne 51 400 nouveaux hab/an
- Population > **6 millions d'habitants en 2025 et 7 millions en 2050**
- De nombreux touristes :  
212 millions de nuitées par an (+4 millions d'ici 2030)

→ Besoin AEP (2040) = + 15 à + 25 Mm3

# En pleine canicule 15 communes du Minervois privées d'eau courante à cause de la sécheresse

Le moment est vraiment mal choisi. Mais la situation l'exigeait. En pleine alerte rouge à la canicule, sept communes du minervois ont fait l'objet d'une première coupure d'eau tout au long de ce mercredi. D'autres coupures sont prévues vendredi et lundi dans les huit autres.

Hérault

De [Guillaume Roulland](#)

Mercredi 23 août 2023 à 18:37

Par [France Bleu Hérault](#)



Les coupures d'eau sont effectuées dans les communes par intermittence © Maxppp - MICHAEL ALESI

C'était prévu depuis plusieurs jours, en raison de la **baisse inquiétante de la ressource en eau** dans le secteur.

Et la décision n'a sans doute pas été facile à prendre.

# En pleine canicule 15 communes du Minervois privées d'eau courante à cause de la sécheresse



# Mais des raisons d'espérer

## Quelques chiffres – Agence RMC

/20 Amonium dans les eaux de surface en 30 ans

/10 Phosphore dans les eaux de surface en 30 ans

/5 micropolluants industriels dans les eaux de surface en 15 ans

7150 Ha de Zones humides restaurées en 5 ans

527 km de cours d'eau restaurés en 5 ans

221 PAPI en 10 ans

Stratégie Etudes Volumes Prélevables

## Les enjeux de l'eau sur le Bassin Rhône Méditerranée

# Un objectif ambitieux

## DE RECONQUÊTE DU BON ÉTAT DES EAUX

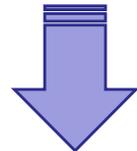


Budget des agences de l'eau → +475 M€/an  
SDAGE 2022-2027 → 3,2 M\*€, 7000 actions

## Les enjeux de l'eau en Région Occitanie

# L'eau et les milieux aquatiques, supports de l'aménagement du territoire régional

SUR 1,6 MILLIARD DE M<sup>3</sup> D'EAU PRÉLEVÉS ANNUELLEMENT,



L'eau essentielle pour les 2 piliers de l'économie régionale que sont l'agriculture et le tourisme



Population permanente + touristes

### Poids économique de l'agriculture et de l'agro-alimentaire régionale :

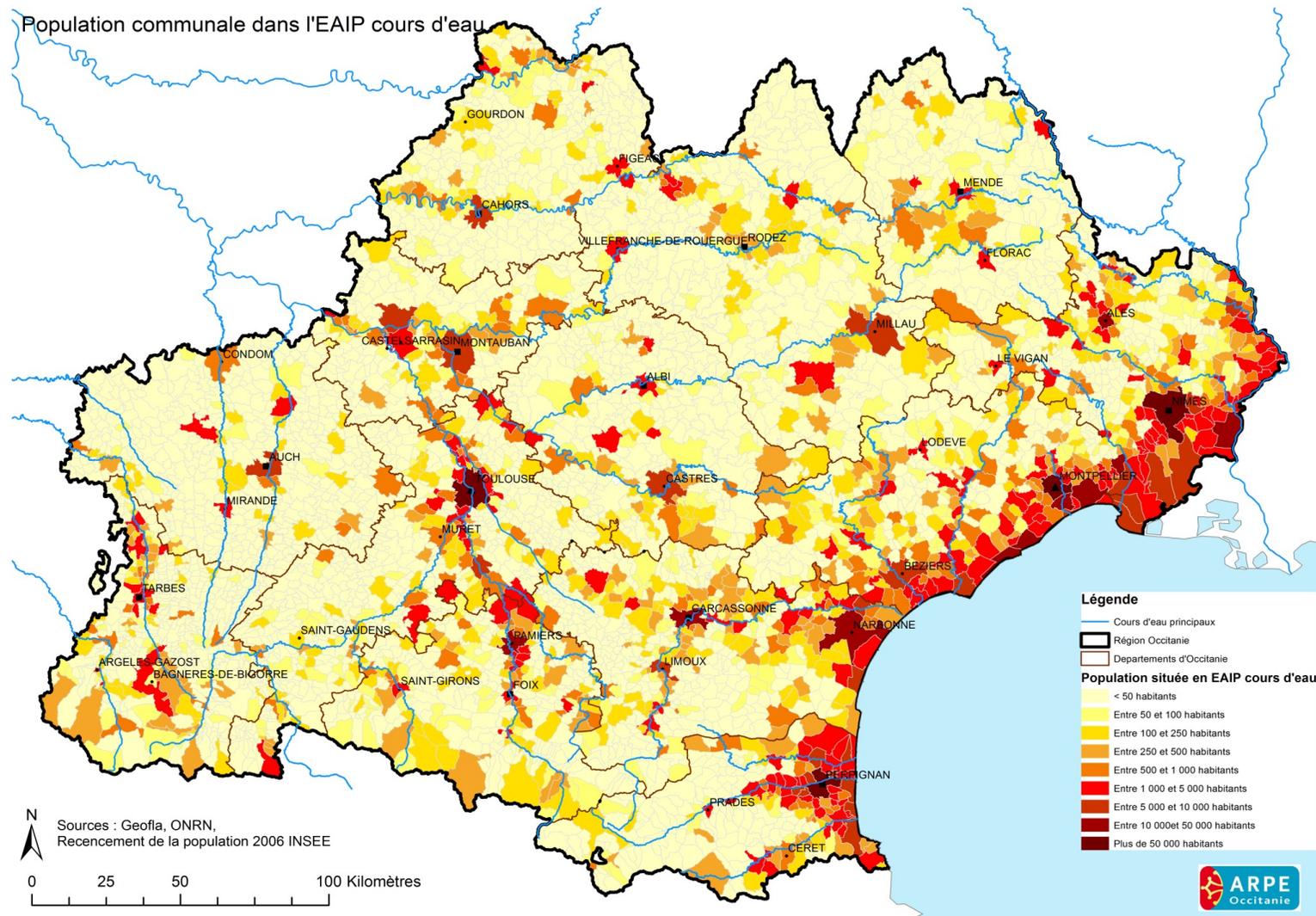
21 milliards d'euros - 165 000 emplois  
330 000 ha irrigables (10% de la SAU / 30% des prélèvements annuels totaux)  
Sources : DRAAF, Conseil régional

### Poids économique du tourisme régional :

14 milliards d'euros par an  
108 000 emplois permanents  
Sources : Fédération nationale de pêche, Conseil régional

# Les enjeux de l'eau en Région Occitanie

## La population en zone inondable

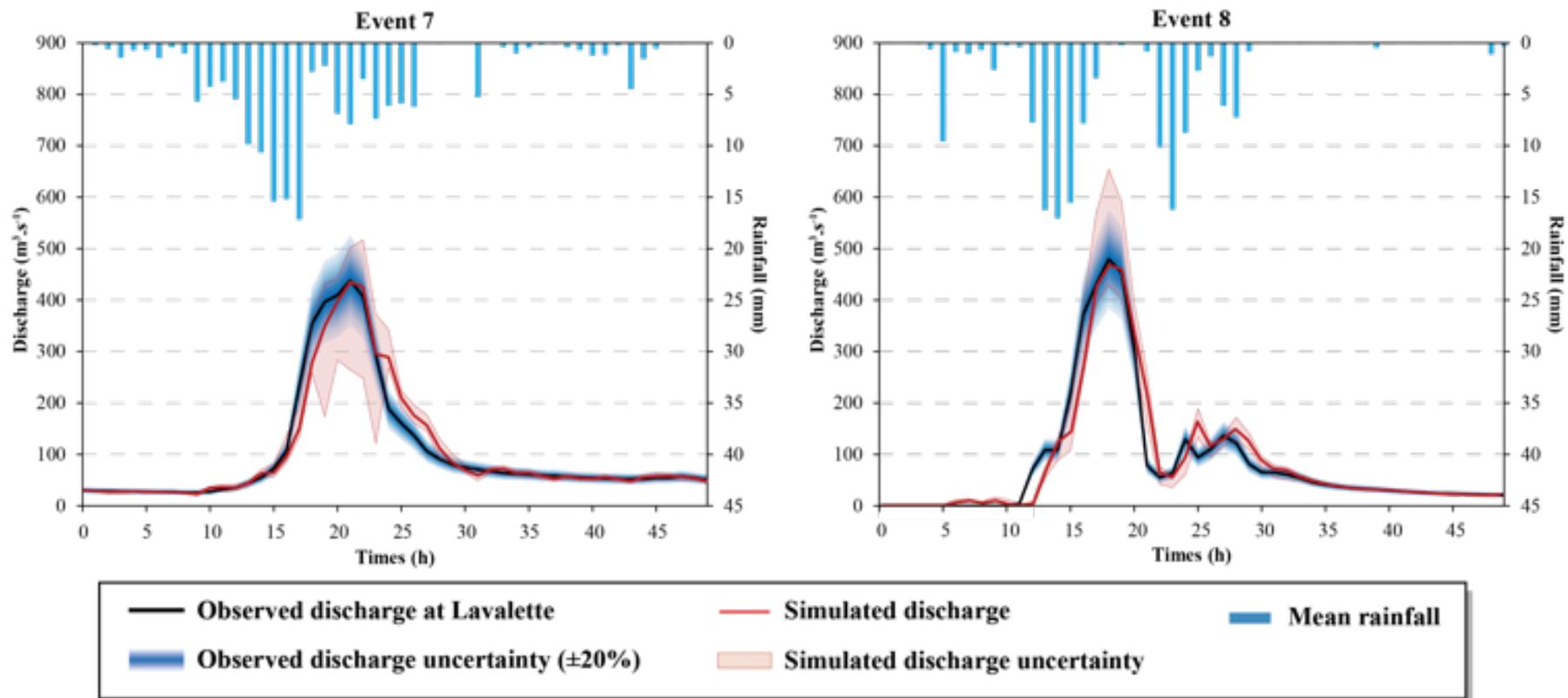


# Les enjeux de l'eau en Région Occitanie



## Les dégâts liés aux inondations

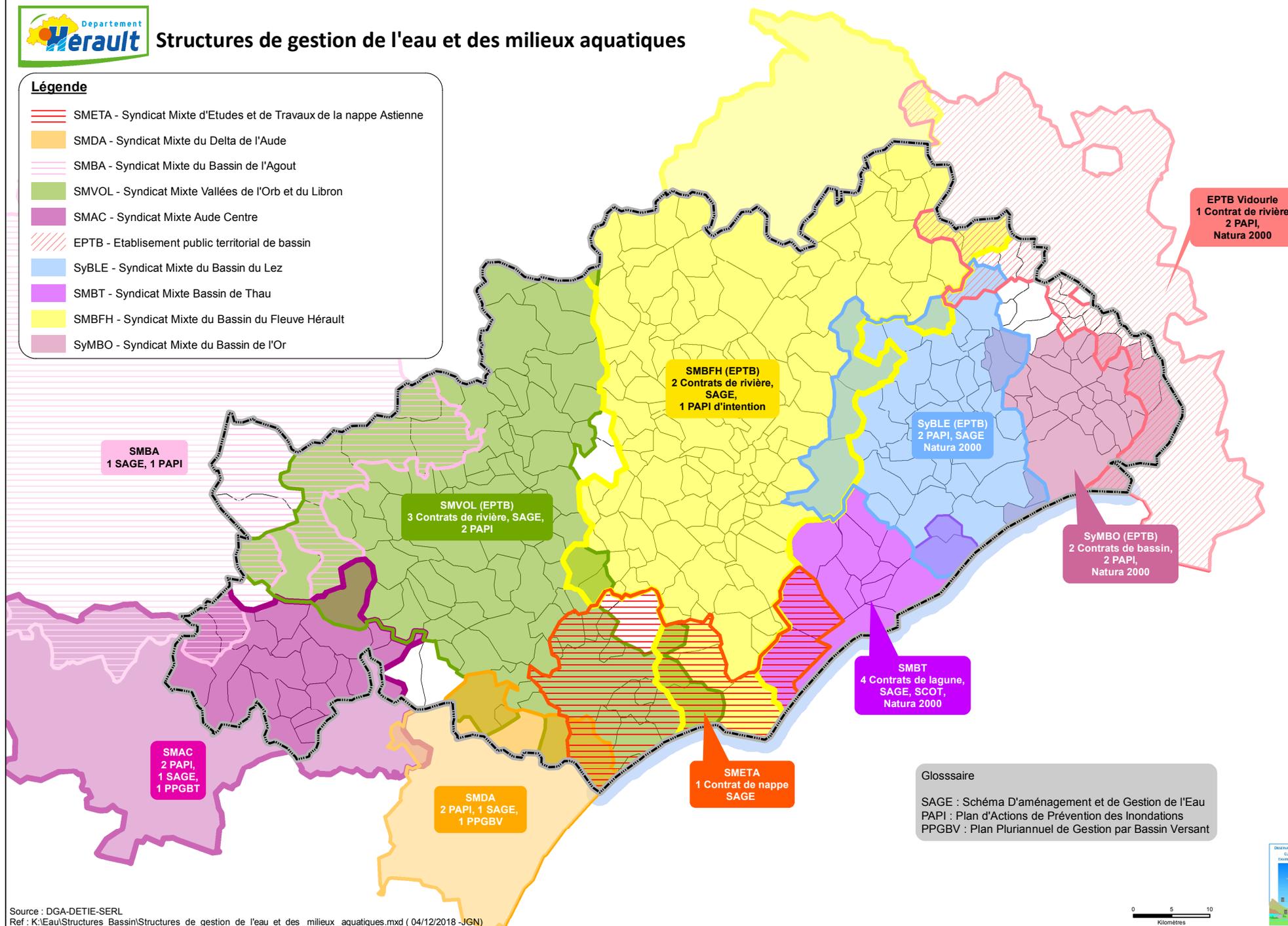
→ Exemple : simulation débit Lez en crue Thèse Thomas Darras 2015





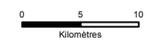
## Légende

- SMETA - Syndicat Mixte d'Etudes et de Travaux de la nappe Astienne
- SMDA - Syndicat Mixte du Delta de l'Aude
- SMBA - Syndicat Mixte du Bassin de l'Agout
- SMVOL - Syndicat Mixte Vallées de l'Orb et du Libron
- SMAC - Syndicat Mixte Aude Centre
- EPTB - Etablissement public territorial de bassin
- SyBLE - Syndicat Mixte du Bassin du Lez
- SMBT - Syndicat Mixte Bassin de Thau
- SMBFH - Syndicat Mixte du Bassin du Fleuve Hérault
- SyMBO - Syndicat Mixte du Bassin de l'Or



### Glossaire

SAGE : Schéma D'aménagement et de Gestion de l'Eau  
 PAPI : Plan d'Actions de Prévention des Inondations  
 PPGBV : Plan Pluriannuel de Gestion par Bassin Versant





# OFFRE D'EMPLOI

## Chargé(e) de mission – Réduction de la vulnérabilité aux inondations

### COMPETENCES REQUISES

#### Profil recherché :

Bac +3 au minimum dans le domaine de la gestion des risques ou de l'hydrologie (jeunes diplômés acceptés)

#### Savoir-être :

- Rigueur et sens du détail,
- Autonomie,
- Organisation,
- Pédagogie,
- Excellent relationnel, écoute, sens du contact,
- Bonne capacité d'adaptation et d'intégration dans une équipe.

#### Savoir-faire :

- Maîtrise des logiciels bureautiques (Pack Microsoft Office) et notions en SIG
- Aisance rédactionnelle
- Une bonne culture sur le risque inondation et sa gestion sera fortement appréciée

ATMOSPHERE

Précipitations

Condensation

# 1- Cycle de l'eau et bilan hydrique

Evapotranspiration

Evaporation

GLACE

fonte

ruissellement

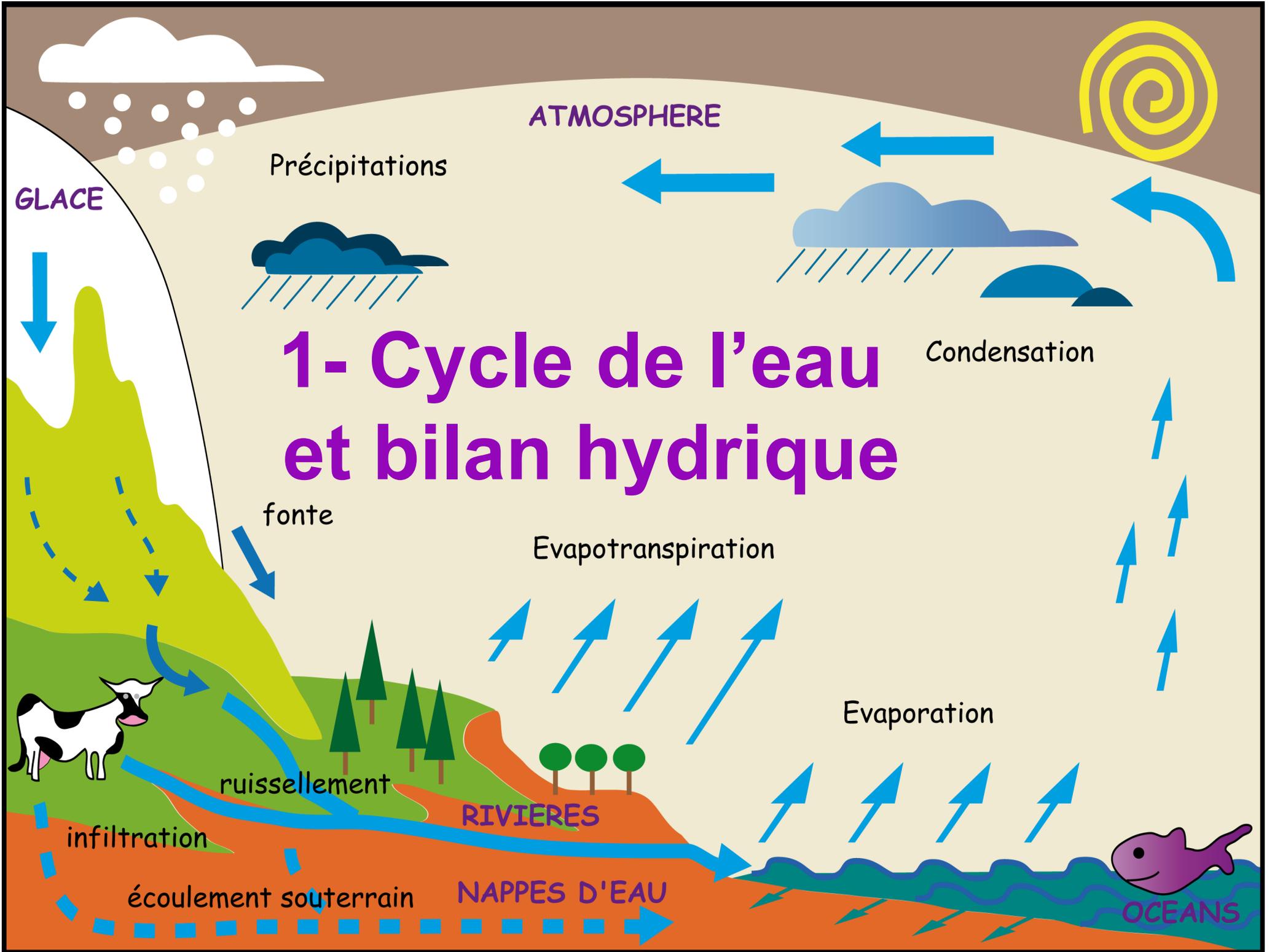
RIVIERES

infiltration

écoulement souterrain

NAPPES D'EAU

OCEANS



**1- Les principaux réservoirs**

**2- Les mécanismes du cycle de l'eau**

**3- La circulation de l'eau :**

**De l'échelle de la planète à celle du BV notion de bilan et de déficit**

**→ Exercice : calcul de bilan**

**4- L'homme : son influence sur le cycle de l'eau**

# 1- Les principaux réservoirs

Mal connu 7 à 300 M km<sup>3</sup>

réservoirs	volume (en M km <sup>3</sup> )	% total	temps de résidence
océans	1350	97,0	2.500 ans
glaciers	33	2,4	1.000 - 10.000 ans
eaux souterraines	8	0,6	1.500 ans
lacs	0,1	<0,01	17 ans
sols	0,07	<0,01	1 an
atmosphère	0,013	<0,001	8 jours
rivières	0,0017	0,0001	16 jours
matière vivante	0,0011	0,0001	qqes heures
<b>total</b>	<b>1391</b>	<b>100</b>	

Réserves d'eau sur la planète (Jacques, 1996)

Soit une tranche de 3000 m d'eau  
Sur le globe

Temps de résidence =  $Vol/Q$

Taux de renouvellement =  $Q/Vol$

# 1- Les principaux réservoirs

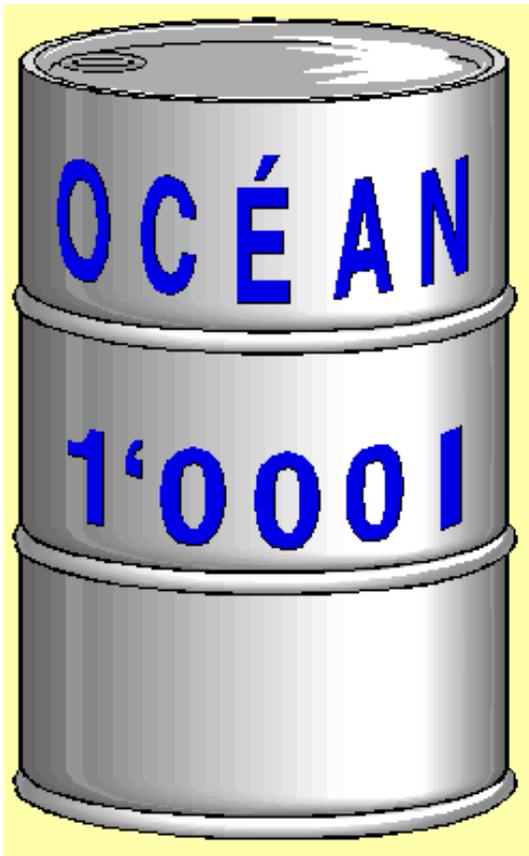
Les glaciers représentent 2/3 de l'eau douce  
 Les ES représentent la principale ressource d'eau douce accessible

				EAU DOUCE	
réservoirs		volume (en M km3)	% total	volume (en M km3)	% total
OCEANS		1340	96,4		
GLACES		24	1,72	24	60
EAUX SOUTERRAINES			1,72	16	40
	0-200m	10			
	0-2000m	24			
	0-5000m	60			
	sols	0,016		0,016	0,04
EAUX CONTINENTALES DE SURFACE	lacs, grands réservoirs	0,17	0,013	0,09	0,22
	lits des cours d'eau	0,002	0,00015	0,002	0,005
ATMOSPHERE		0,013	0,001	0,013	0,03
EAU BIOLOGIQUE		0,0011	0,0001	0,0011	0,003
<b>total</b>		<b>1390</b>	<b>100</b>	<b>40</b>	<b>100</b>

Soit 3% du volume total

Réserves d'eau sur la planète (Castany, 1982) d'après travaux soviétiques (UNESCO, 1978)

## 1- Les principaux réservoirs



# Eau douce : 26 l

- Glaces : 18 l
- Eaux souterraines : 8 l
- Lacs et rivières : 2 dl
- Biomasse et sol : 7 cl
- Atmosphère : 1,5 cl

# 1- Les principaux réservoirs

Compartiment	Volume (1000 km <sup>3</sup> )	importance relative	vitesse de circulation	temps de séjour	renouvellement (1000 km <sup>3</sup> /an)
<b>Océans et mers</b>	1 400 000	97,3	m/s	1000-10 000	350 (évaporation)
<b>Glaciers et calottes</b>	30 000	2,1	m/an	100-1000	(évaporation et fonte)
<b>Eaux souterraines</b>	5 000 (< 1km) 3 000 (> 1km)	0,35 0,21	m/an ε	100-1000 > 10 000	12 (écoulement) ε (écoulement, vaporisation)
<b>Lacs et plans d'eau</b>	150	0,01	m/s	10-100	inclus rivières (évaporation, écoulement)
<b>sols</b>	70	0,005	m/mois	0,1-1	70 (évaporation) 12 (infiltration)
<b>Atmosphère</b>	13	0,001	m/s	0,01-0,1	420 (précipitation)
<b>Rivières</b>	1,2	0,0001	m/s	0,01-0,1	40 (écoulement)

*Vitesse de circulation et temps de séjour dans les différents Compartiments hydriques (Banton et Bangoy, 1997)*

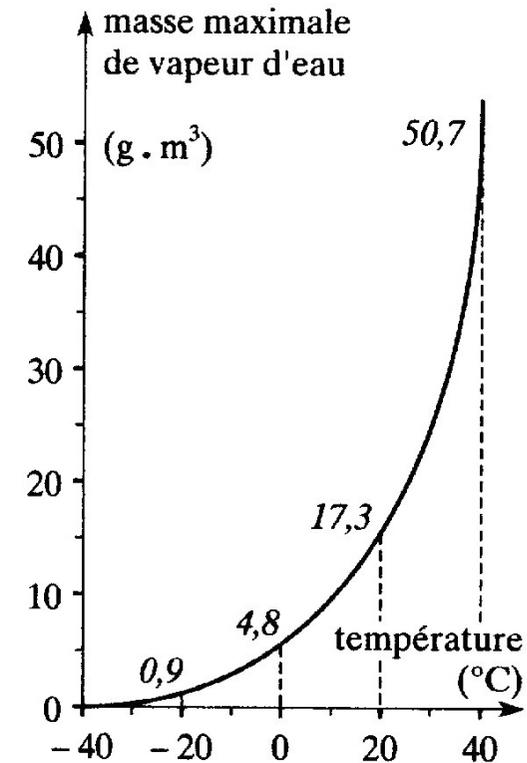
## 1-1 L'eau de l'atmosphère

3 formes d'eau : liquide / solide / gaz

La capacité hygrométrique de l'air varie beaucoup : 30 g/m<sup>3</sup> en milieu équatorial océanique à 1 g/m<sup>3</sup> en milieu continental froid

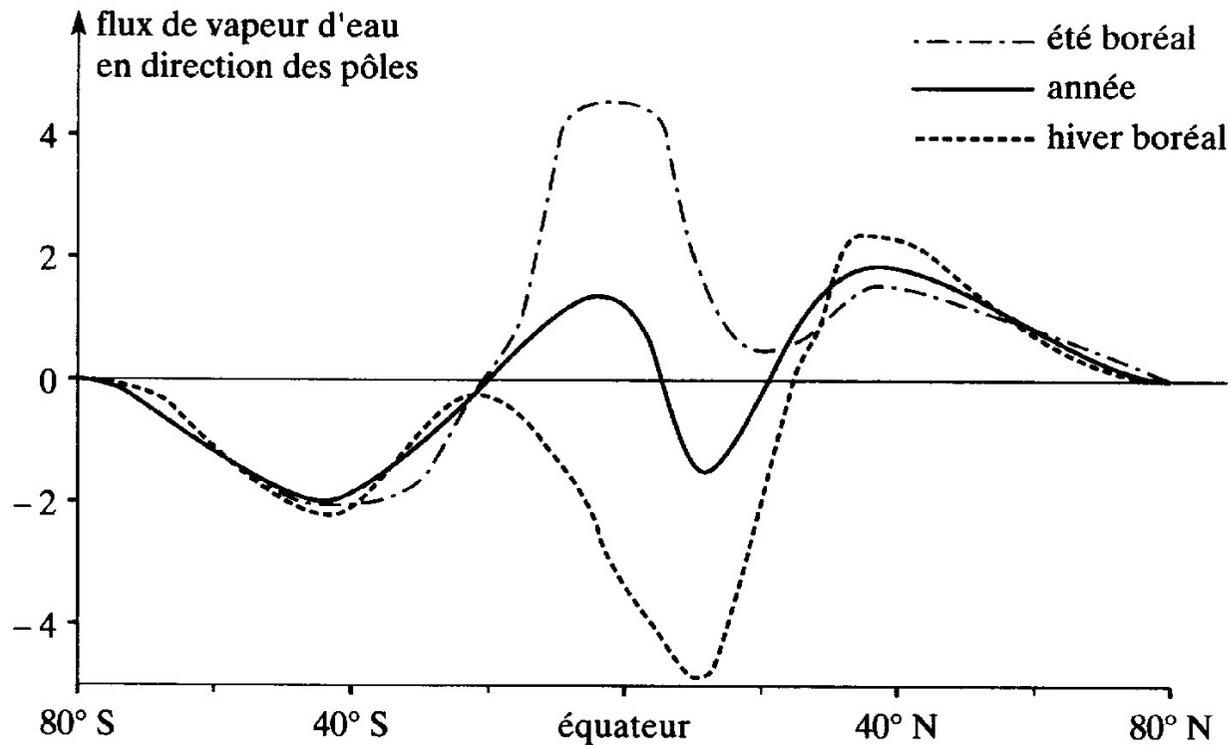
Diminution de T° en altitude = diminution exponentielle (≈) du degré hygrométrique  
--> 50% de la vapeur d'eau se situe sous 1500m

Différences saisonnières plus prononcées dans l'hémisphère Nord liées aux variations de T° (quasi x 2 vs hémisphère Sud)



*Teneur en eau de l'atmosphère en fonction de la température (Jacques, 1996)*

## 1-1 L'eau de l'atmosphère



- Flux de vapeur d'eau dans l'atmosphère en fonction de la latitude (Jacques, 1996):*
- aux latitudes moyennes le flux se dirige vers les pôles (faibles variations saisonnières)
  - près de l'équateur le flux très important change avec les saisons

## 1-2 L'eau des océans

Océans	superficie Tm2 (1)	volume Pm3 (1)	superficie Tm2 (2)	volume Pm3 (2)	prof moy m (2)	prof max m (1)
Atlantique	92	320	86	323	3736	9218
Indien	76	270	73	284	3872	7450
Pacifique	179	670	166	696	4188	11035
Arctique	15	20	9	12	1330	5520
Antarctique	20	75				6972
Autres mers	x	x	26	33	1269	
<b>total</b>	<b>382</b>	<b>1350</b>	<b>362</b>	<b>1350</b>		

(1) : Jacques, 1996

(2) : Menard et Smith, 1966 (in Tardy, 1986)

$$Tm^2 = 10^{12} m^2 = 10^6 km^2$$

$$Pm^3 = 10^{15} m^3 = 10^3 km^3$$

### *Caractéristiques des océans (Jacques, 1996)*

75% de la surface du globe

Évaporation = 85% de l'évaporation totale = 1m d'eau

Précipitations = 79% de la totalité

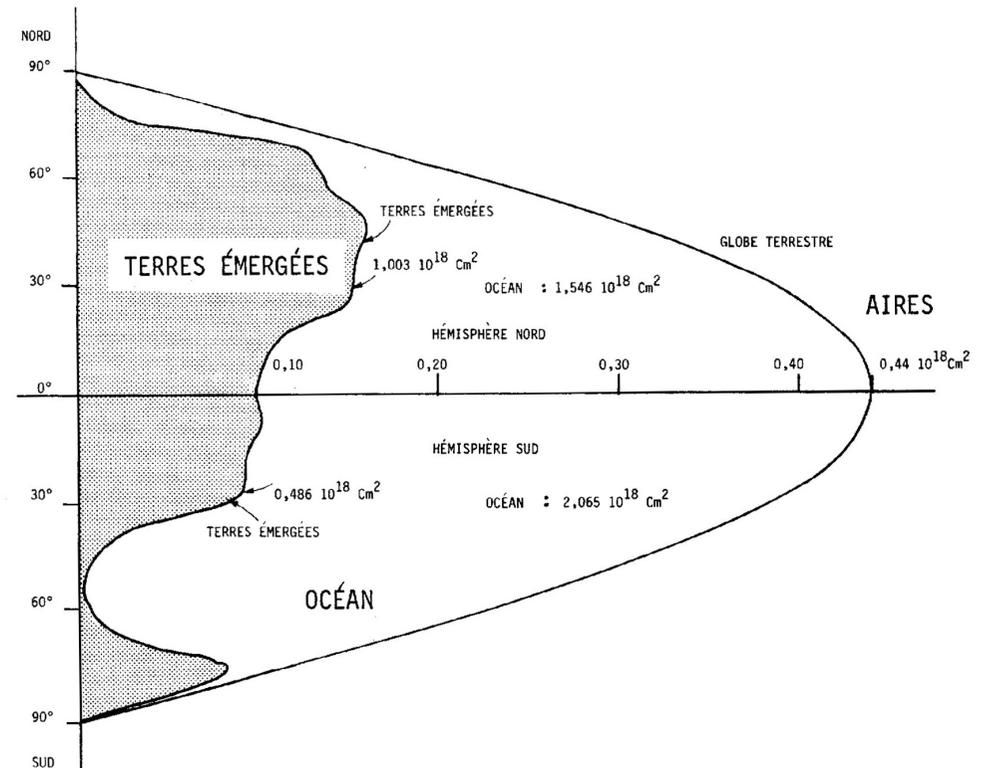
Masse de sels = 48 M Pg

Biomasse animaux marins = 32 Pg

Biomasse végétaux marins < 2 Pg

## 1-2 L'eau des océans

*Répartition par hémisphère et par tranche de latitude des superficies des océans et des terres émergées (Tardy, 1986)*



Niveau +200m --> Transgression --> -25% des terres émergées

Niveau -200m --> Régression --> +18% des terres émergées

## 1-3 L'eau des glaciers

<b>Types de glaces</b>	<b>régions</b>	<b>superficie Tm2</b>	<b>volume Pm3</b>
glace continentale	Antarctique	14	30,0
	Groenland	1,8	3
	autres glaciers	0,5	0,2
	neige	1 à 47	< 0,001
glace de mer	Antarctique	4 à 20	0,005 à 0,03
	Arctique	8 à 15	0,02 à 0,05

*Répartition de la glace sur terre (Jacques, 1996)*

Grande sensibilité aux changements climatiques  
Acteurs majeurs du climat

Dernier maximum glaciaire : -18 000 ans  
- 5° C  
-120 m niveau des océans

Siècle dernier = + 0,5° C --> + 12 cm niveau des océans

## 1-3 L'eau des glaciers



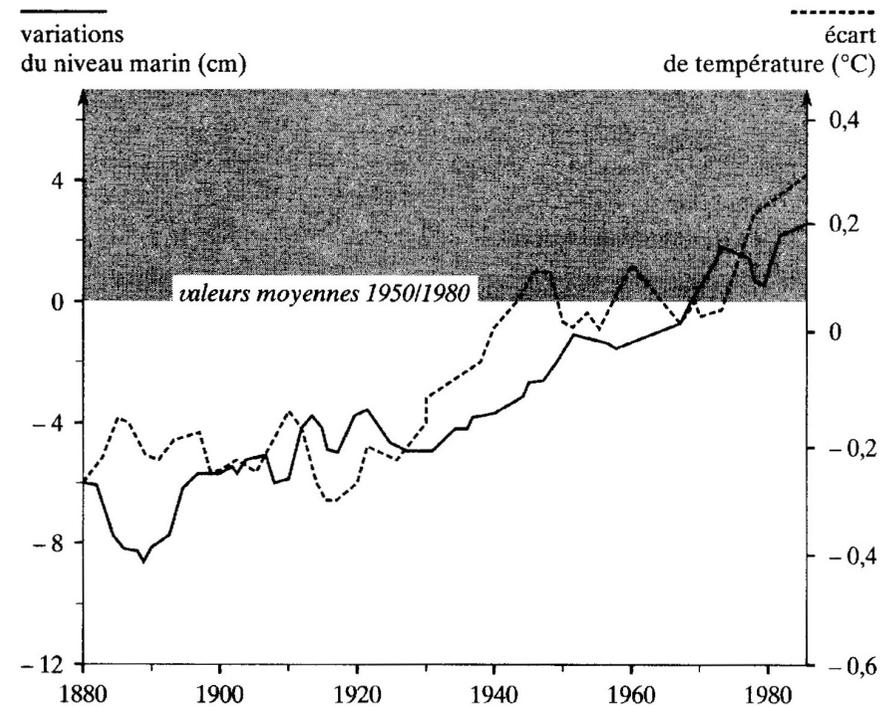
Denali - Alaska

Kilimandjaro- Tanzanie

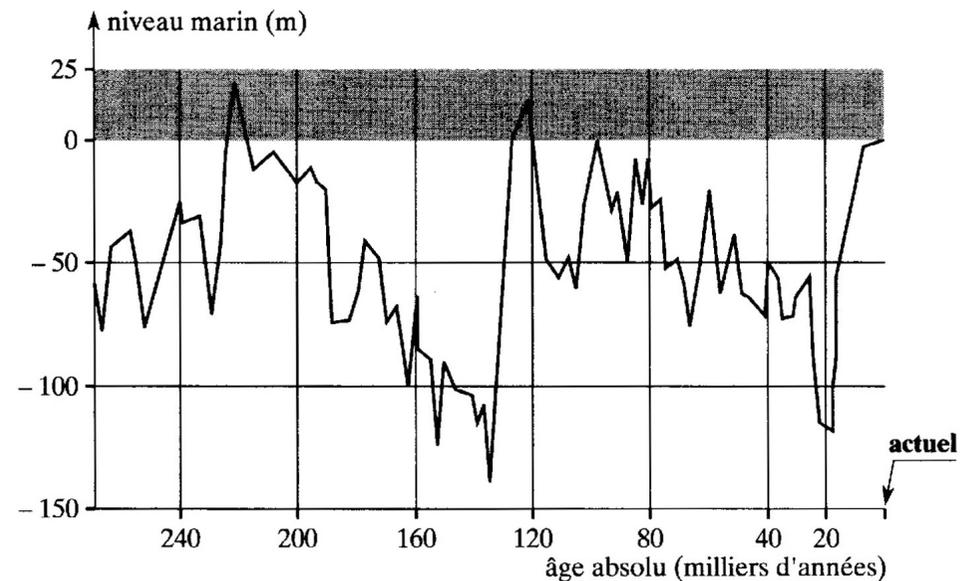


# 1-3 L'eau des glaciers

*Niveau marin et température de l'air au cours du dernier siècle. Elévation de 15 cm due à la fonte des glaciers et à l'expansion thermique des océans. (Jacques, 1996)*



*Variation du niveau marin en fonction des cycles climatiques (Jacques, 1996)*



## 1-4 L'eau continentale de surface - Les principaux lacs naturels

<b>Lacs</b>	<b>origine</b>	<b>superficie Gm2</b>	<b>volume Tm3 (1)</b>
Caspienne *	tectonique	374,0	78,2
"grands lacs"	glaciaire	244,7	22,8
Victoria	tectonique	68,5	2,7
Aral *	tectonique	64,1	1,0
Tanganyika	tectonique	32,9	18,9
Baïkal	tectonique	31,5	23,0
grand lac de l'ours	glaciaire	31,3	2,4
grand lac de l'esclave	glaciaire	28,6	2,1
Winnipeg	glaciaire	24,4	0,4
Malawi	tectonique	22,5	6,1
		<b>total =</b>	<b>157,6</b>

\* : eau salée

*Caractéristiques des 10 principaux lacs du monde (Jacques, 1996)*

Il faut ajouter les lacs de barrages : 3200 en Europe occidentale pour 0,17 Tm3

barrage des 3 gorges : 0,045 Tm3

## 1-4 L'eau continentale de surface - Les principales rivières du monde

<b>Fleuves</b>	<b>pays</b>	<b>océan</b>	<b>bassin versant km<sup>2</sup></b>	<b>longueur km</b>	<b>débit Gm<sup>3</sup>/an</b>	<b>sédiment Tkg/an</b>	<b>dissous Tkg/an</b>
Amazone	Brésil	Atlantique	6300	6400	6300	1200	270
Congo	Zaïre	Atlantique	3800	4700	1200	43	37
Orenoque	Vénézuela	Atlantique	990	2800	1100	210	28
Ch'ang-kiang	Chine	Pacifique	1900	5500	930	480	180
Brahmapoutre	Bengladesh	Indien	580	5700	630	540	63
Iénisséi	Russie	Arctique	2600	5500	620	13	60
Gange	Bengladesh	Indien	980	2160	590	520	110
Léna	Russie	Arctique	2500	4400	520	18	60
Mékong	Vietnam	Pacifique	790	4500	470	160	57
Paraña	Argentine	Atlantique	2800	4800	470	79	51
St Laurent	Canada	Atlantique	1200	3100	450	4	62
Irrawady	Birmanie	Indien	430	2300	430	260	86
Ob	Russie	Arctique	2500	5400	430	16	47
Tocantins	Brésil	Atlantique	700	1600	350		
Mackenzie	Canada	Arctique	1800	4200	330	100	69
Amour	Russie	Pacifique	1800	4400	320	52	24
Xijiang	Chine	Pacifique	440	2200	300	69	58
Magdalena	Colombie	Atlantique	280	1500	240	220	28
Indus	Pakistan	Indien	970	3200	240	100	13
Yukong	Alaska (EU)	Pacifique	840	3700	210	60	34
Danube	Roumanie	mer noire	810	2800	200	40	62
Niger	Niger	Atlantique	1200	4000	200	40	14
Huang-he	Chine	Pacifique	770	4700	59	1100	17

*Caractéristiques des principales rivières du monde (Jacques, 1996)*

## 1-4 L'eau continentale de surface - La notion de Bassin Versant

**Bassin versant d'une rivière** : Un bassin versant ou bassin hydrographique est une portion de territoire délimité par des lignes de crête (ligne de partage des eaux), dont les eaux alimentent un exutoire commun par ruissellement : cours d'eau ou lac. La ligne séparant deux bassins versants adjacents est une ligne de partage des eaux. Chaque bassin versant se subdivise en un certain nombre de bassins élémentaires correspondant à la surface d'alimentation des affluents se jetant dans le cours d'eau principal (appelés parfois Bassins exoréiques ou périphériques).

**Bassin versant endoréique** : bassin versant dans lequel l'eau est concentrée en un point du bassin lui-même, soit sous forme de lac ou de mare, soit par accumulation souterraine (ex: Lac Tchad). 22% des terres émergées (Asie et Afrique essentiellement).

Certaines régions sont dépourvues de bassins faute de cours d'eau : ce sont les **déserts aréiques**.

La quantité et la qualité des éléments transportés (sédiments ou dissous) dépendent de la nature géologique, de la géomorphologie, du régime hydrique (climat), de la végétation et de l'occupation humaine.

## 1-5 L'eau continentale souterraine - L'eau du sol

Gravité  $\neq$  forces de rétention (capillaire, adsorption, osmotique)

forces de rétention = « suction »

teneur en eau = vol eau / vol sol --> humidité

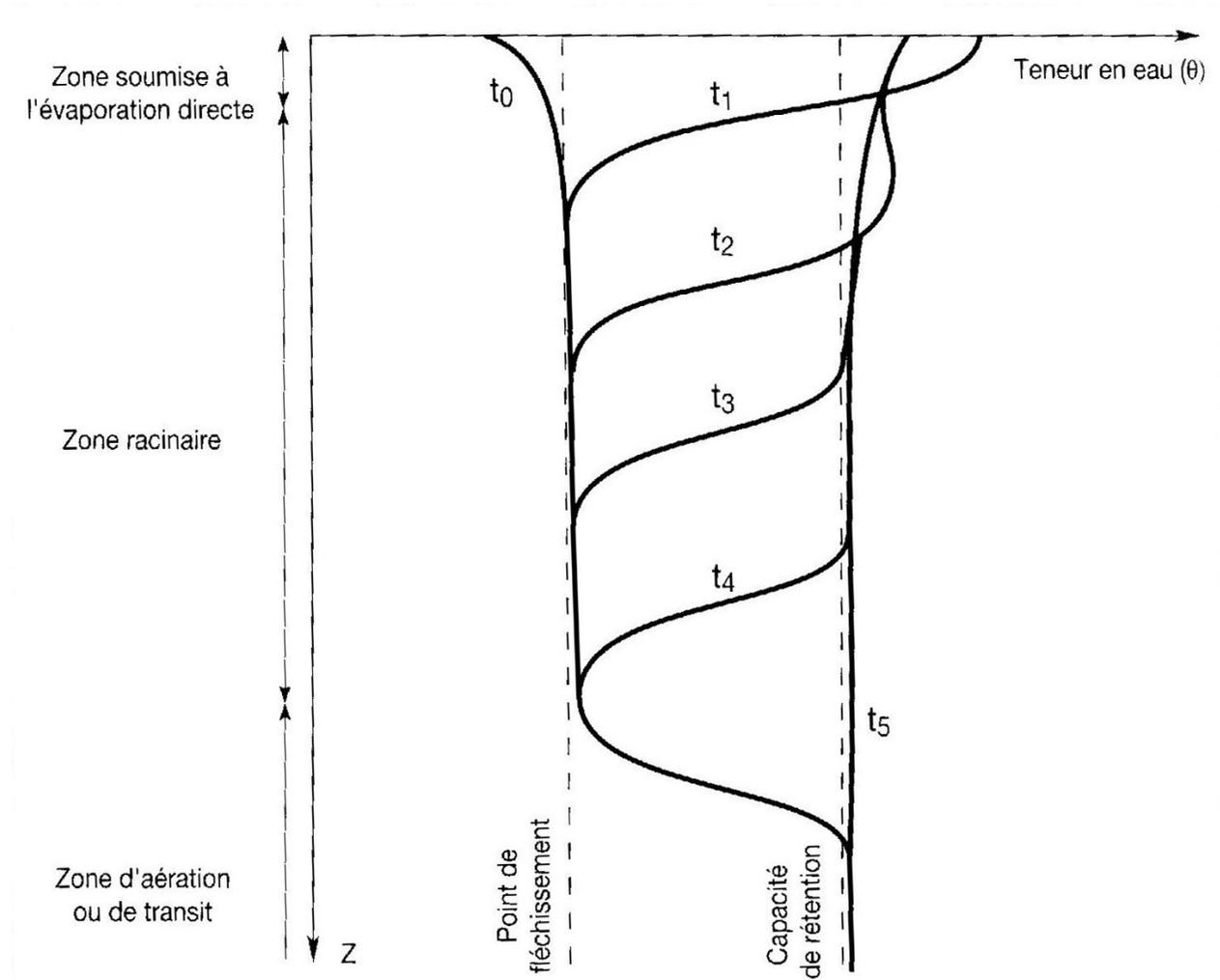
teneur en eau = porosité --> sol saturé (pas de phase gazeuse)

Capacité de rétention : quantité d'eau que peut retenir un sol  
Elle dépend de la texture et de la structure du sol

Point de flétrissement : teneur en eau minimale au-dessous de laquelle l'eau ne peut plus être extraite par la végétation

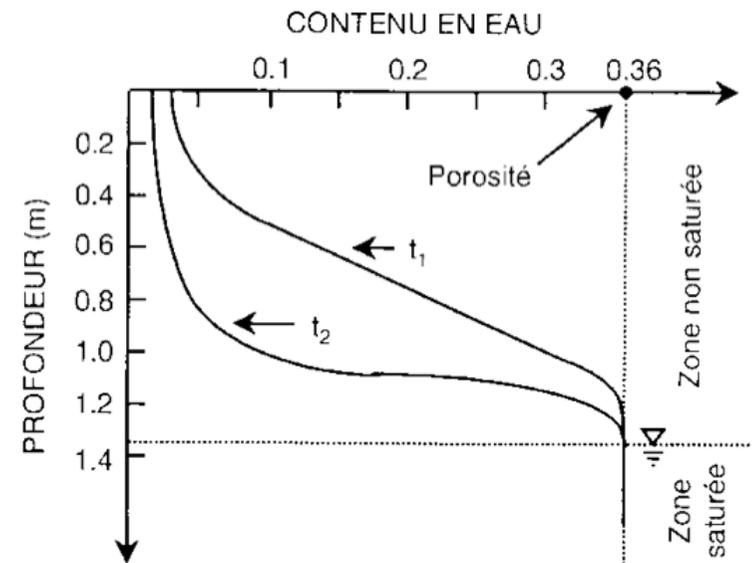
# 1-5 L'eau continentale souterraine - L'eau du sol

*Réhumectation progressive  
d'un sol supposé homogène  
(Cosandey et Robinson, 2000)*



## 1-5 L'eau continentale souterraine - L'eau du sol et des nappes

- Compartiment le moins bien connu
- Certaines estimations (Horton, 1931, Meinardus, 1934, Wolman, 1962) semblent ne pas avoir correctement pris en compte l'ensemble des roches poreuses
- Forte proportion d'eau salée dans les ES



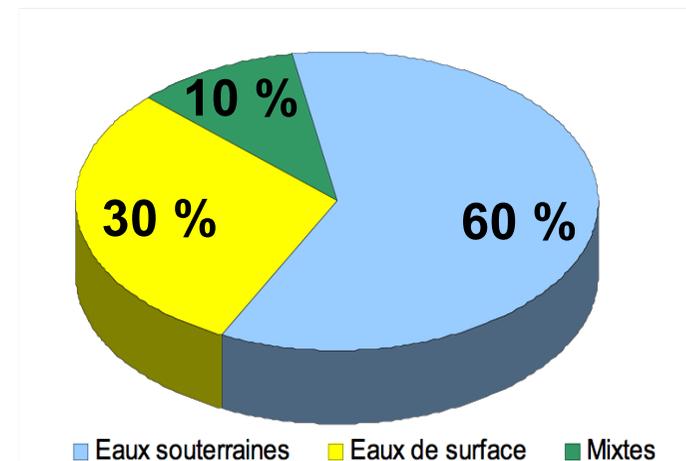
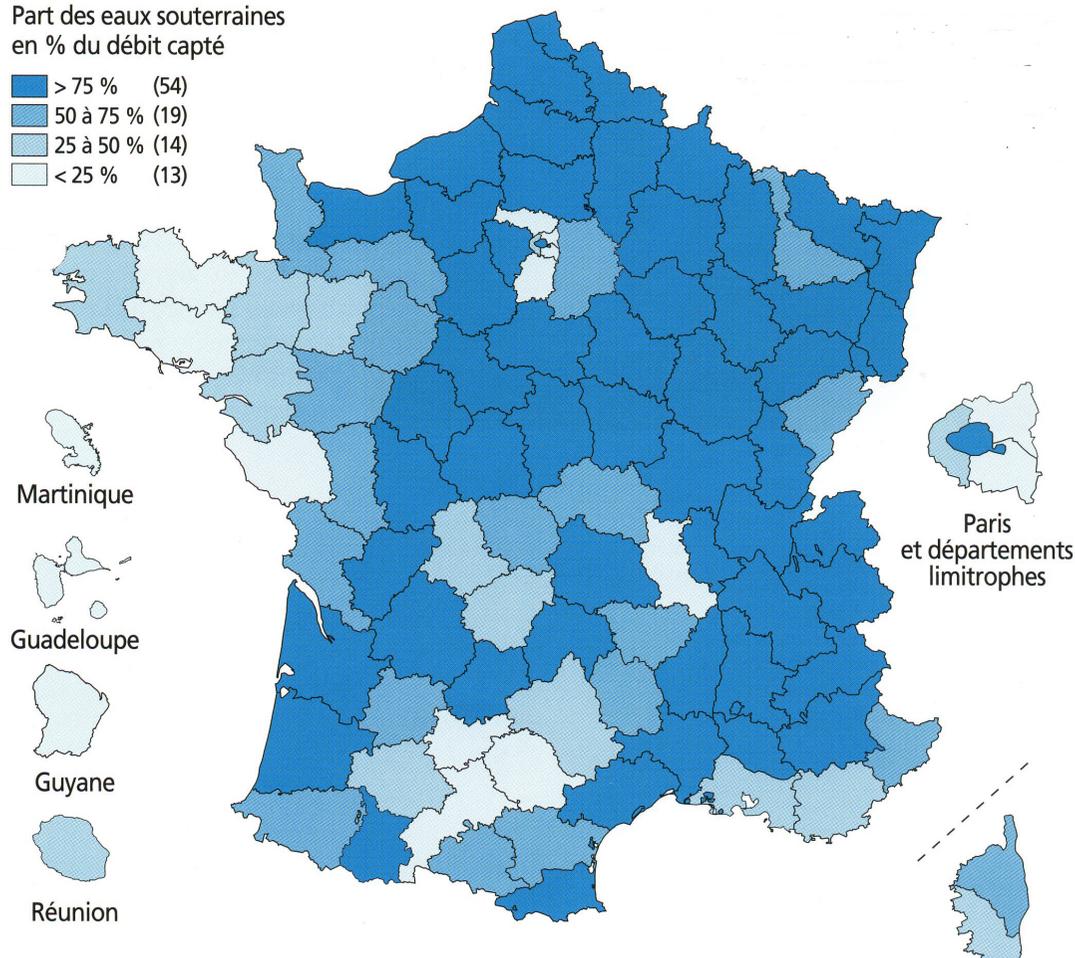
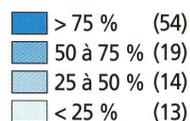
source	volume (en M km <sup>3</sup> )	% total
UNESCO, 1978	94	1,72
Garrels et MacKenzie, 1971	330	18,80
Baumgartner et Reichel, 1975	8	0,58

*Estimation du volume et de la proportion des ES d'après plusieurs travaux*

## 1-5 L'eau continentale souterraine - L'eau du sol et des nappes

**Bassin versant hydrogéologique** : domaine souterrain dont les eaux alimentent par écoulement souterrain un exutoire commun (source). Celui-ci est largement dépendant de la géologie.

Part des eaux souterraines  
en % du débit capté

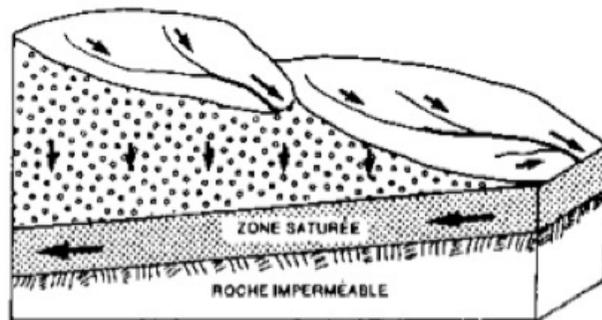
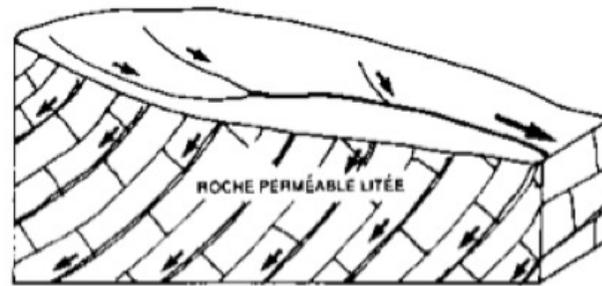


*Origine de l'eau du réseau  
AEP en France*

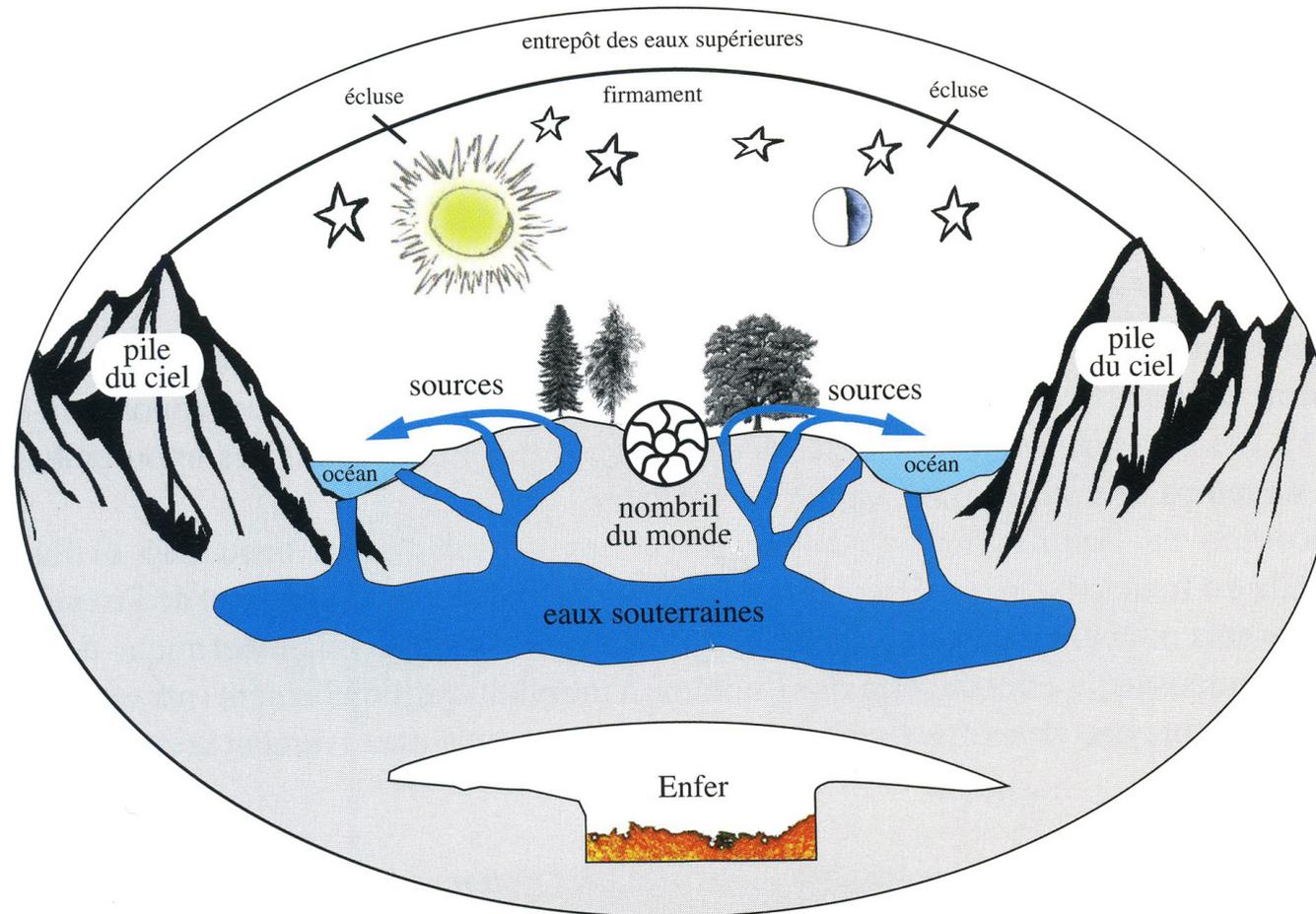
## 1-5 L'eau continentale souterraine - L'eau du sol et des nappes

**Bassin versant hydrogéologique = bassin versant hydrologique ???**

Important : - transfert des pollutions (captages AEP)  
- équilibre du bilan



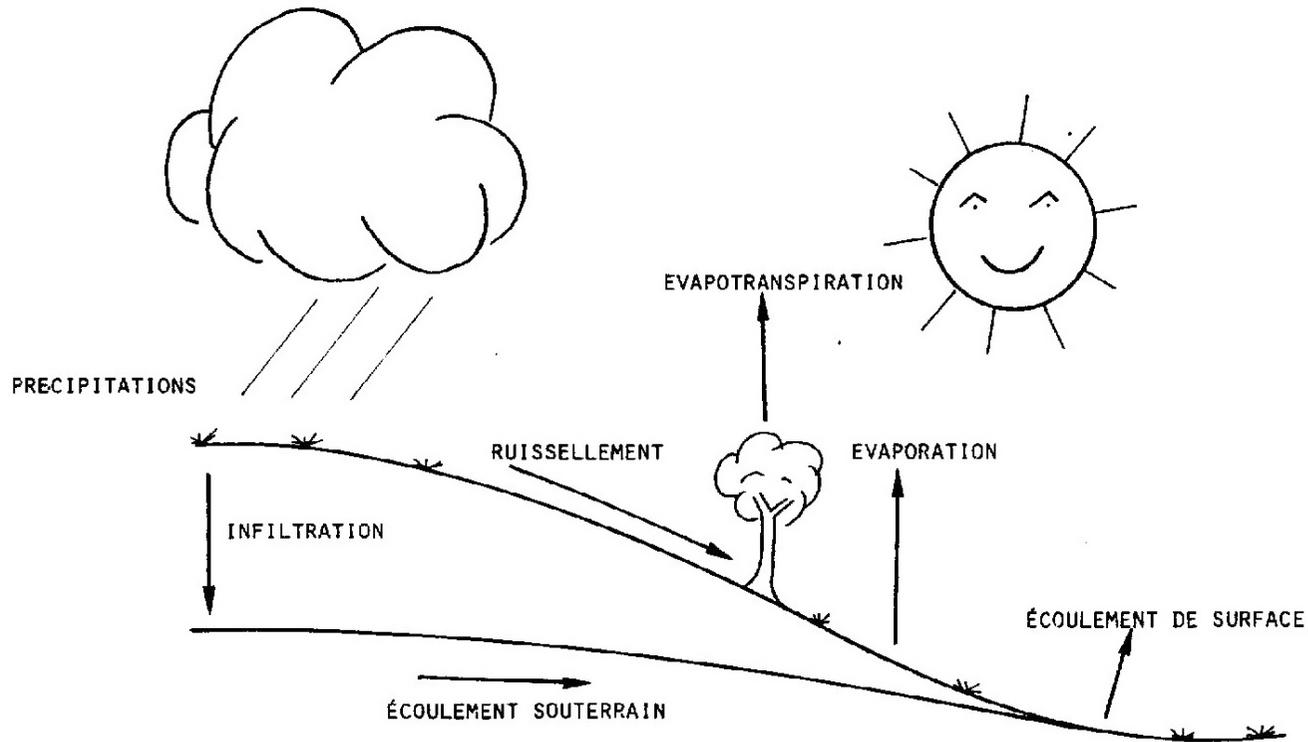
## 2- Les mécanismes du cycle de l'eau



*Eaux de la Terre selon l'ancien testament (d'après Dürst, 1987 in Parriaux, 2006)*

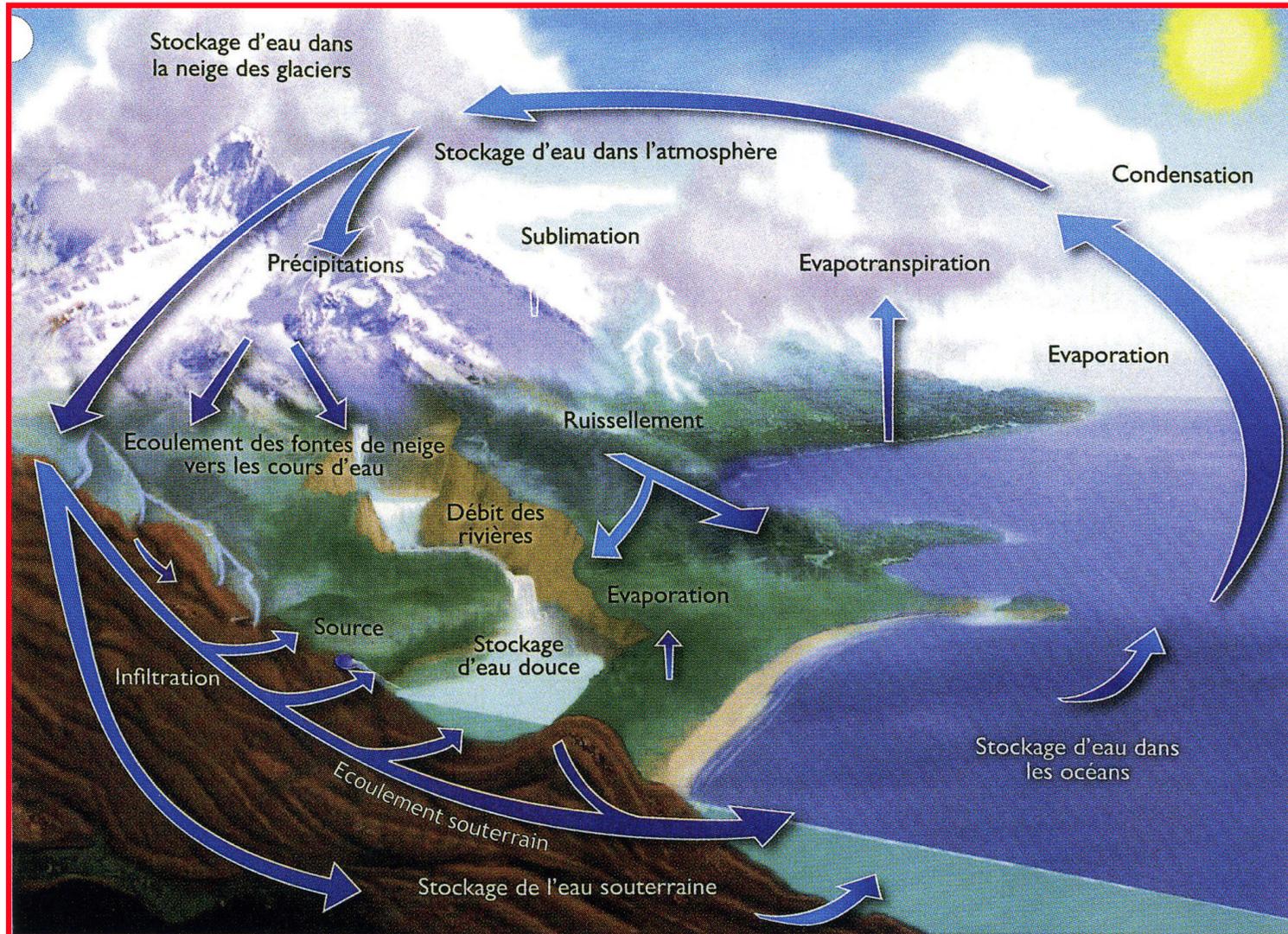
## 2- Les mécanismes du cycle de l'eau

- Les mécanismes sont maintenant bien connus
- Par contre, les volumes et la durée/variabilité des phases mises en jeu sont souvent mal connus



*Éléments du bilan hydrologique (Tardy, 1986)*

## 2- Les mécanismes du cycle de l'eau



*Les phases du cycle de l'eau (source USGS)*

## 2- Les mécanismes du cycle de l'eau

Précipitation (P)

Interception (I) : précipitation qui n'atteint pas le sol car interceptée par les végétaux

Evaporation : lacs, rivières, sols... (E)

Transpiration (T) : liée à l'activité végétale

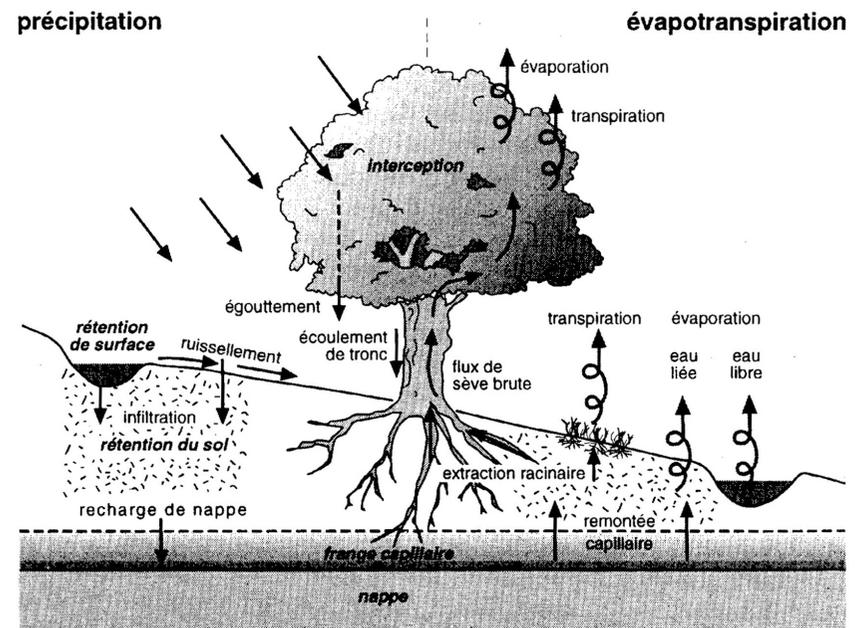
Evapotranspiration réelle / potentielle (ETR / ETP)

Ecoulement (QT) : écoulement de surface (QS) + écoulement souterrain (QW)

Infiltration (If)

*Ruissellement (R) : alimente QS*

*L'eau dans le système sol-plante-atmosphère: principaux processus et réservoirs (Ambroise, 1999)*



## 2- Les mécanismes du cycle de l'eau - Intérêt de la géochimie

Discipline basée sur l'utilisation des **isotopes**

Définition:

Des atomes possédant le même numéro atomique (même nombre de protons), mais de masse atomique différente (nbre 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**  $R = \text{teneur isotope rare} / \text{teneur isotope abondant}$

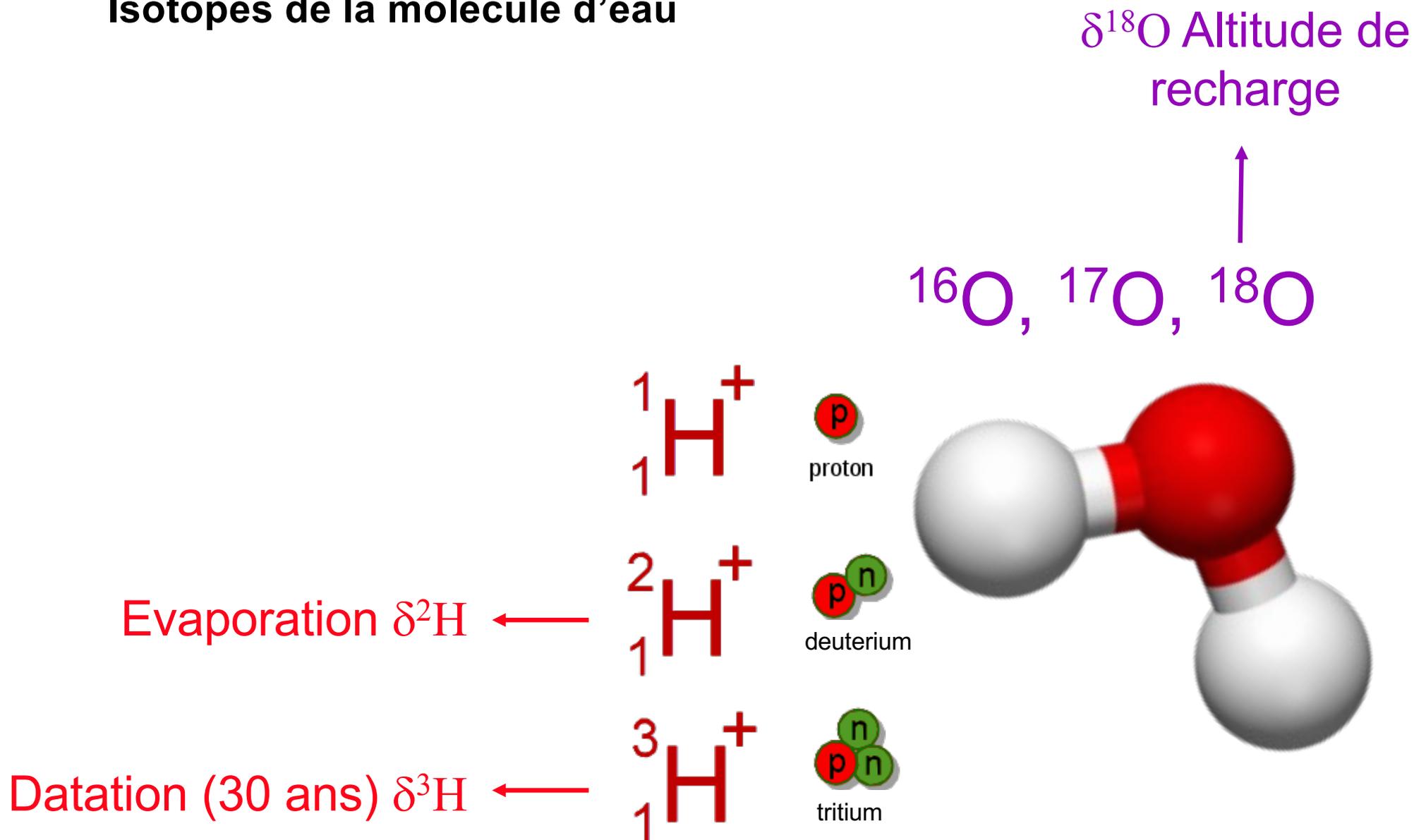
Exemple :  $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$

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

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

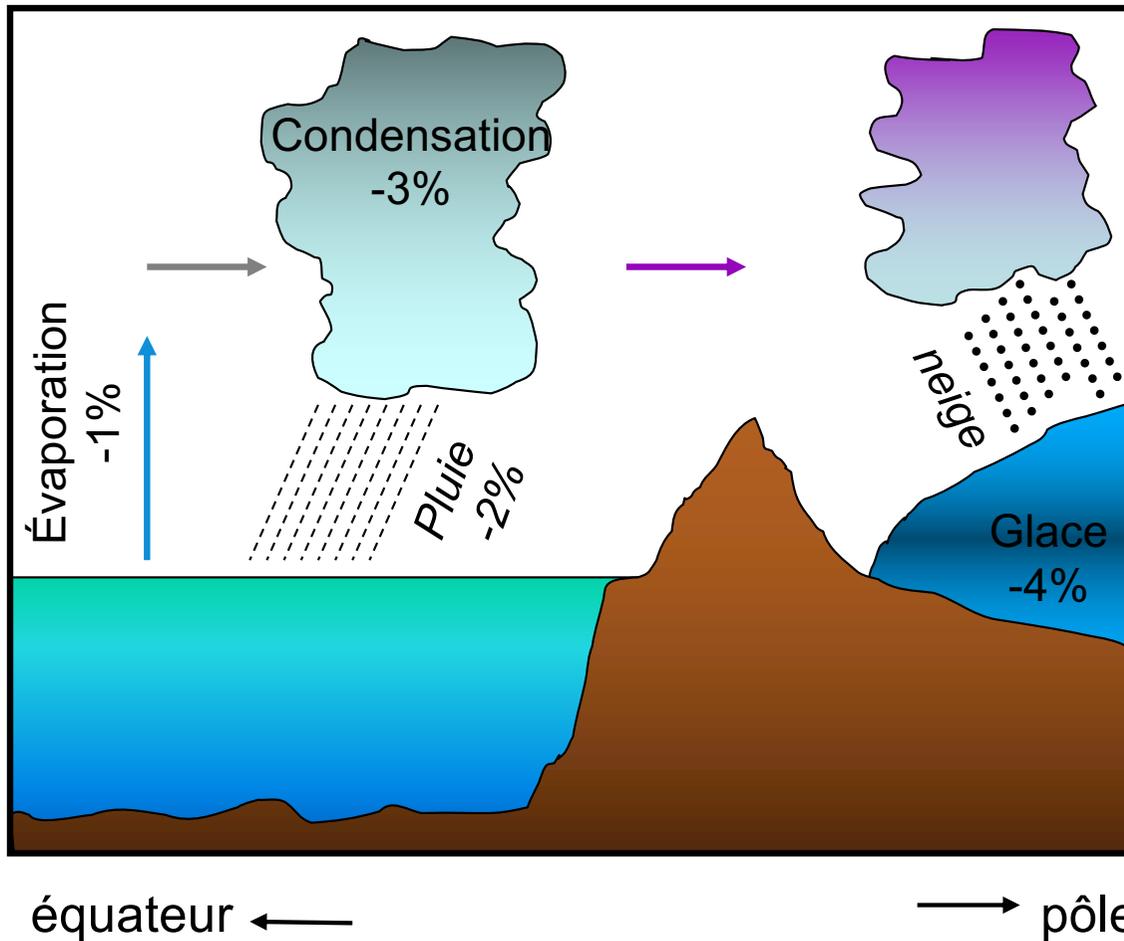
## 2- Les mécanismes du cycle de l'eau - Intérêt de la géochimie

### Isotopes de la molécule d'eau



## 2- Les mécanismes du cycle de l'eau - Intérêt de la géochimie

Isotopes de la molécule d'eau : Rapport  $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$



Cycle de l'eau mis en évidence par les isotopes (Jacques, 1996)

## 2- Les mécanismes du cycle de l'eau - Intérêt de la géochimie

Isotopes de solutés → Parcours de l'eau

→ Datation

Principaux isotopes

$\delta^{13}\text{C}$  : nature de la végétation, échanges  $\text{CO}_2$  profond

$\delta^{14}\text{C}$  : datation (25.000 ans)

$\delta^{34}\text{S}$  : origine de minéralisation (types de roches)

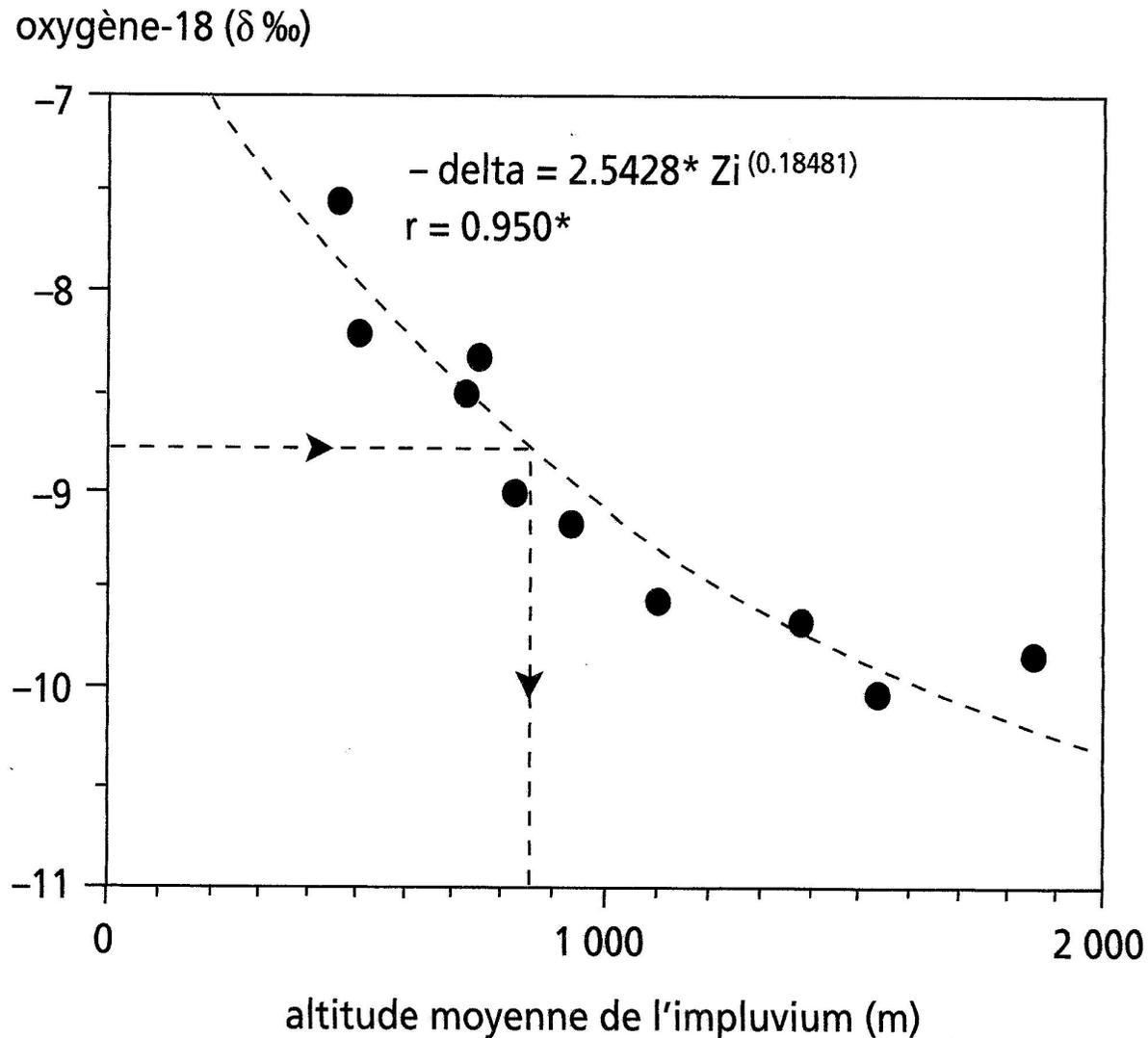
$\delta^{15}\text{N}$  : origine de pollution (engrais/élevage/EU)

$\delta^{87}\text{Sr}$  : origine de minéralisation (types de roches)

$\delta^{36}\text{Cl}$  : datation (250.000 ans)

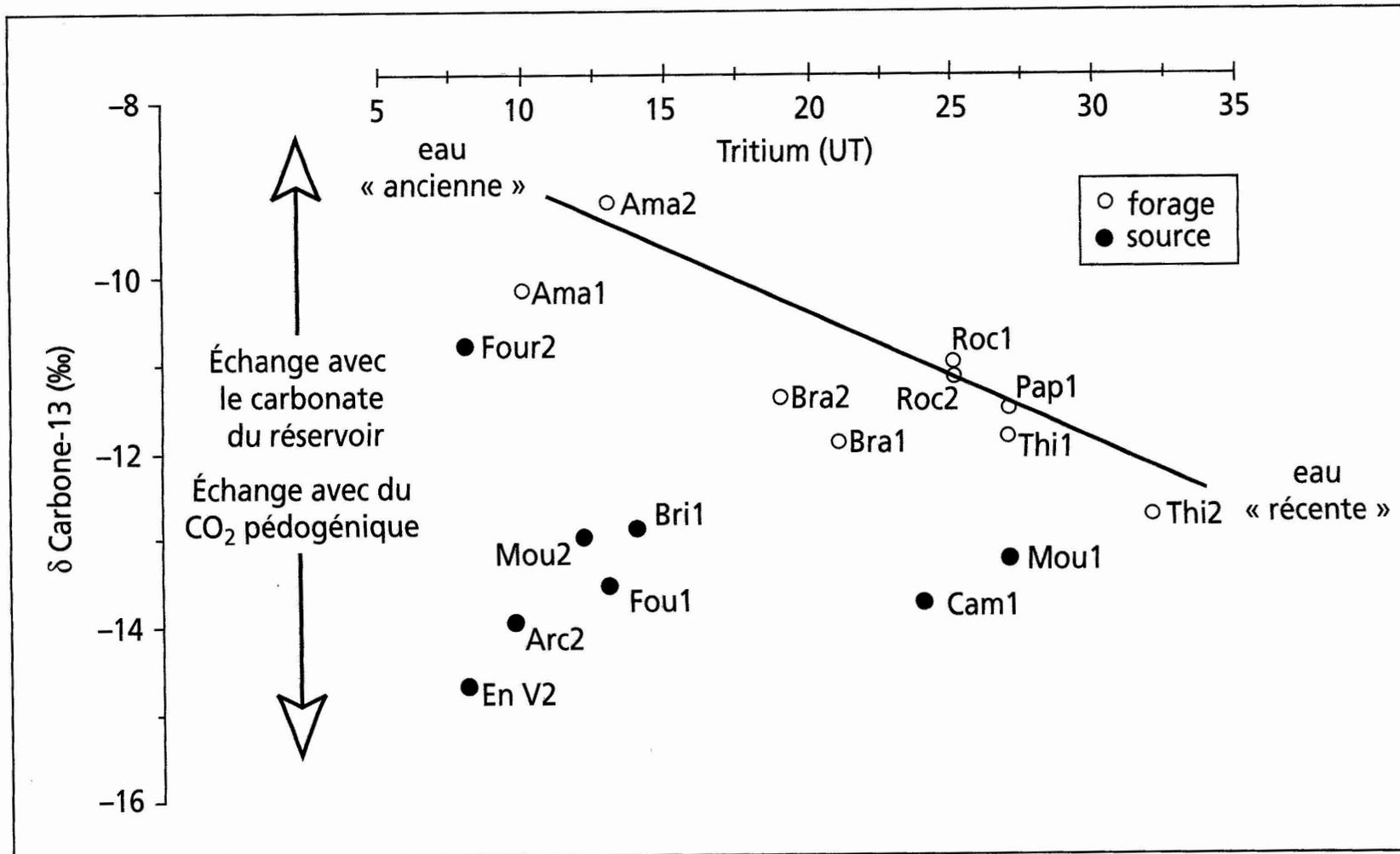
## 2- Les mécanismes du cycle de l'eau - Intérêt de la géochimie

**Exemples 1** : Détermination de l'altitude moyenne de recharge de l'aquifère de Fontaine de Vaucluse (Gilli et al., 2012)



## 2- Les mécanismes du cycle de l'eau - Intérêt de la géochimie

### Exemple 2 : Détermination des modes de circulation du karst de la vallée du Doubs (Gilli et al., 2012)

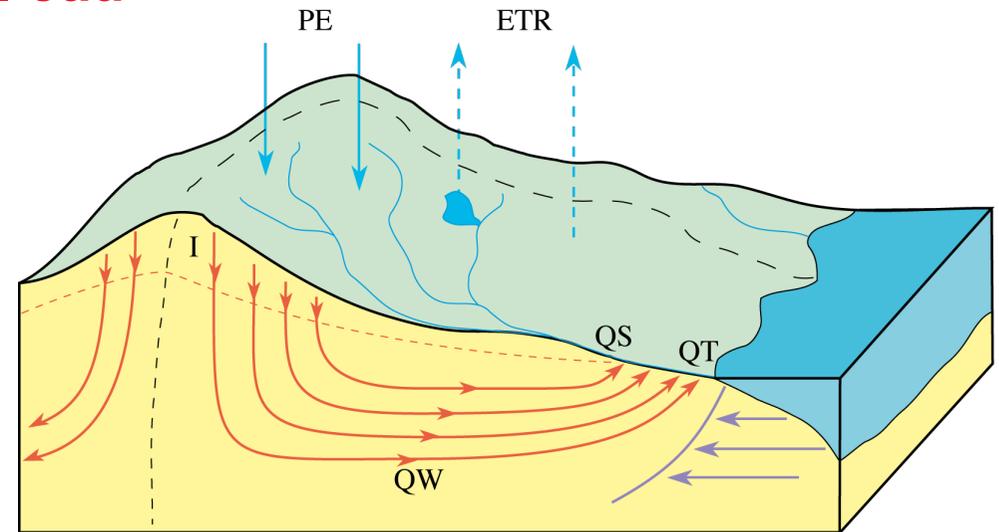


## 2- Les mécanismes du cycle de l'eau

Pluie nette =  $P - I$

Pluie efficace PE =  $P - ETR (- I)$

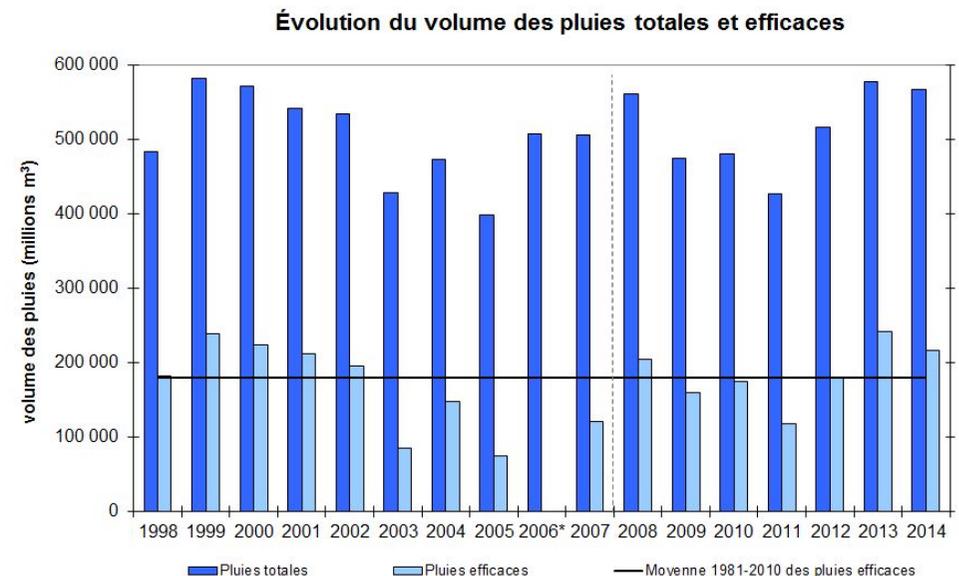
ETR =  $T + E$

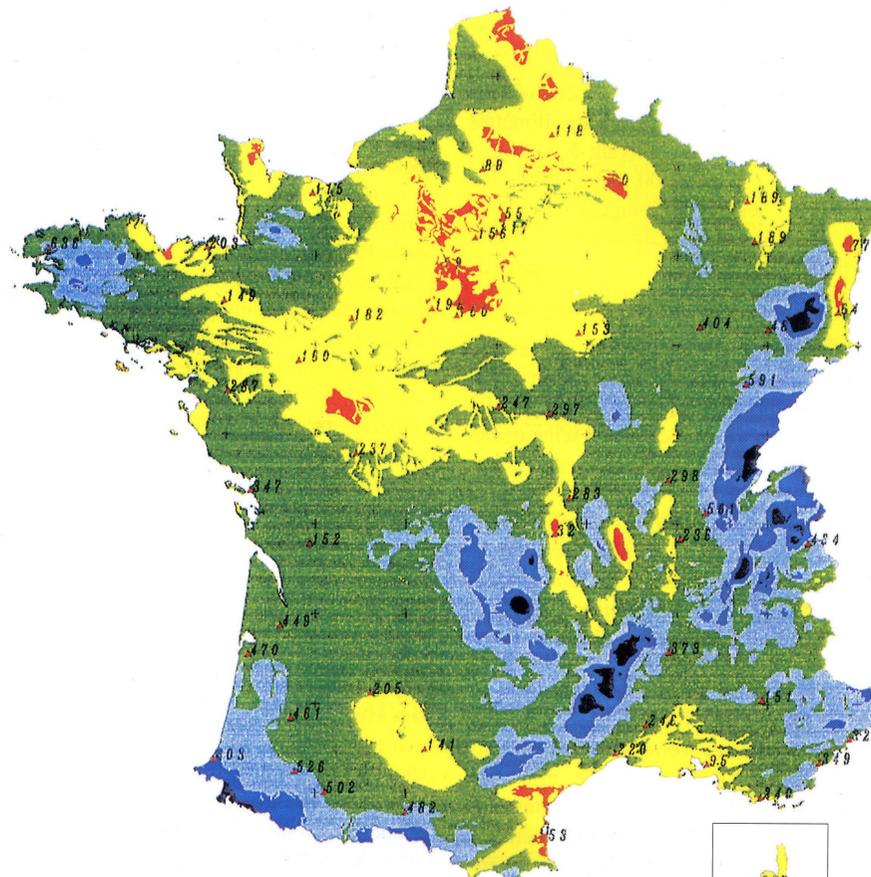


Infiltration efficace (IE) : eau qui atteint la nappe d'eau souterraine

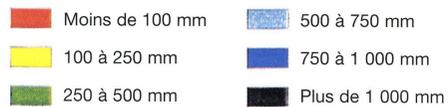
Stockage d'eau ( $\Delta S$ ) : lacs naturels ou artificiels, sols, nappes d'eau souterraines, neige ou glace.

*Pluie incidente et pluie efficace en France  
(Ministère chargé de l'Environnement, 2015)*



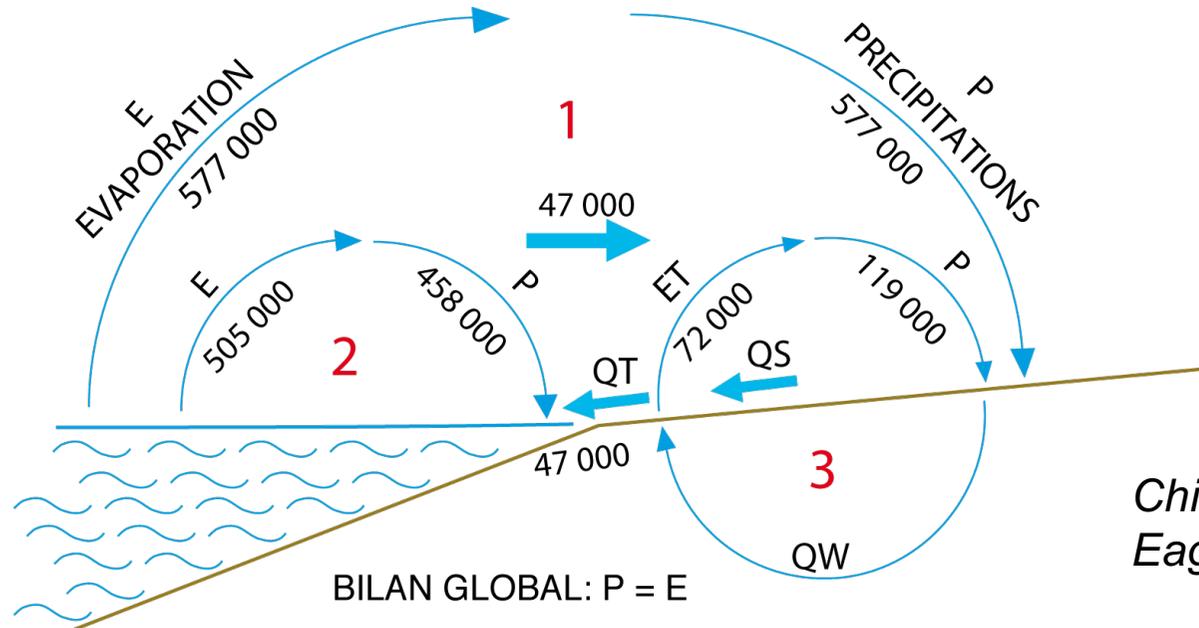


▲ Station météorologique,  
avec pluie efficace calculée (en mm)



*Pluies efficaces moyennes annuelles en France  
(1965-1994) - doc Météo France/INRA*

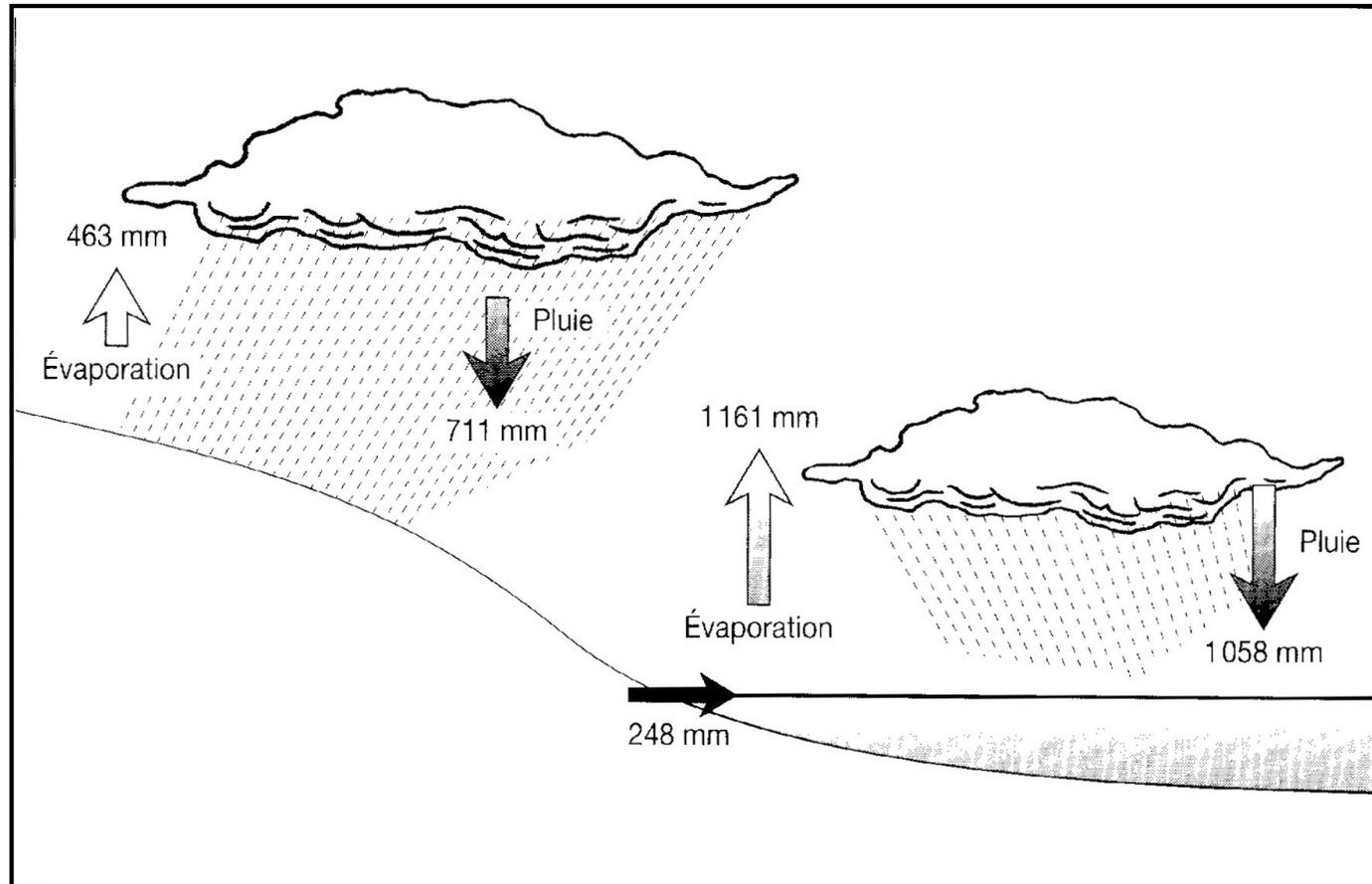
### 3- La circulation de l'eau : de l'échelle de la planète à celle du BV notion de bilan et de déficit



*Chiffres légèrement différents par Eagleson (1991) in Ambroise (1999)*

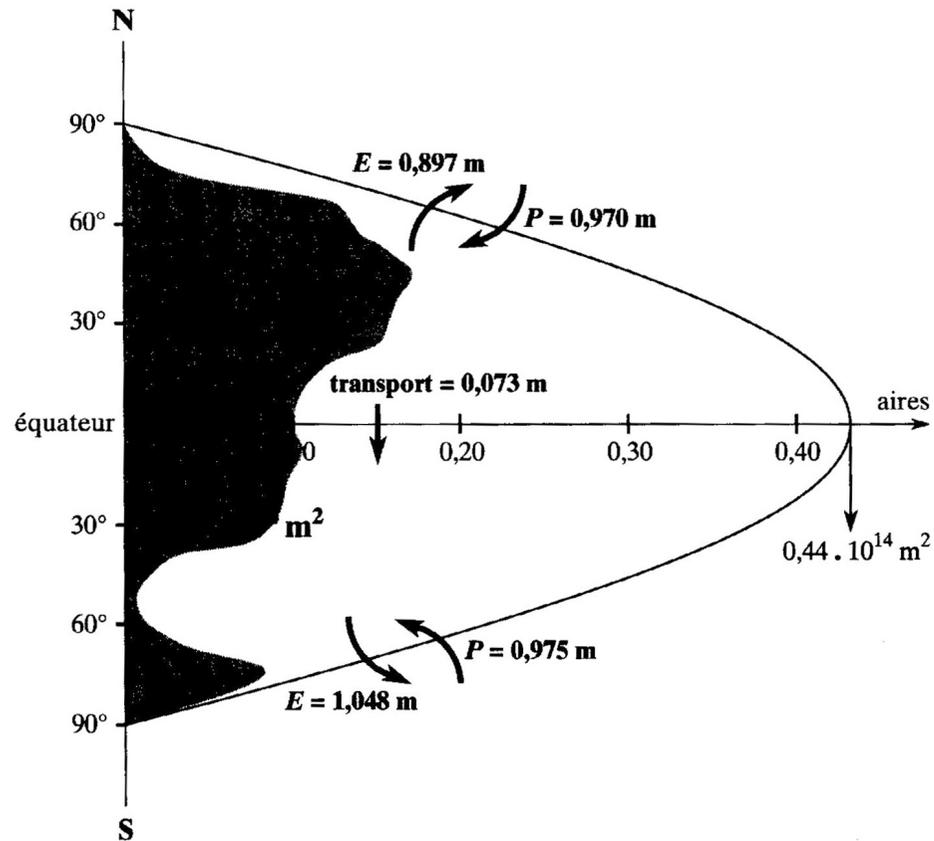
- Pertes d'eau dans la très haute atmosphère : décomposition de H<sub>2</sub>O sous l'effet des rayonnements
- Gain par venue d'eau d'origine mantellique eau « juvénile »

### 3- La circulation de l'eau : de l'échelle de la planète à celle du BV notion de bilan et de déficit



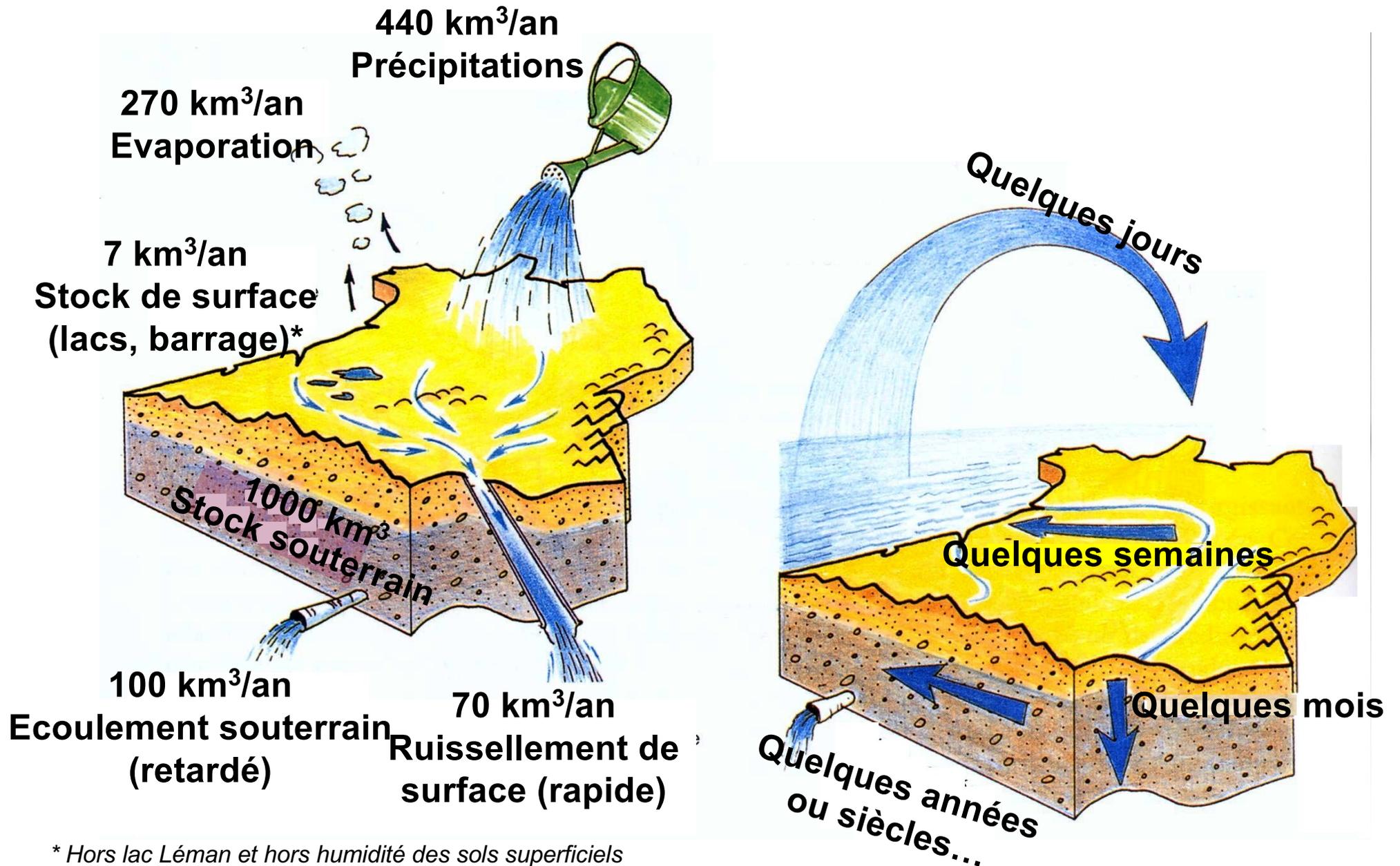
*Valeurs estimées des précipitations et de l'évaporation à l'échelle du globe (mm)  
(d'après Jaeger, 1969 in Cosandey, 2000)*

### 3- La circulation de l'eau : de l'échelle de la planète à celle du BV notion de bilan et de déficit



*Impact de la répartition océans/continents sur les flux d'eau dans chaque hémisphère (Jacques, 1996)*

### 3- La circulation de l'eau : de l'échelle de la planète à celle du BV notion de bilan et de déficit



### 3- La circulation de l'eau : de l'échelle de la planète à celle du BV notion de bilan et de déficit

Echelle d'espace des bilans hydrologiques

→ le bassin versant :

(dé)stockage + transfert + transformation

Echelle de temps

--> le cycle hydrologique

$$\text{Equation générale : } P = ETR + QS + QW + \Delta S$$

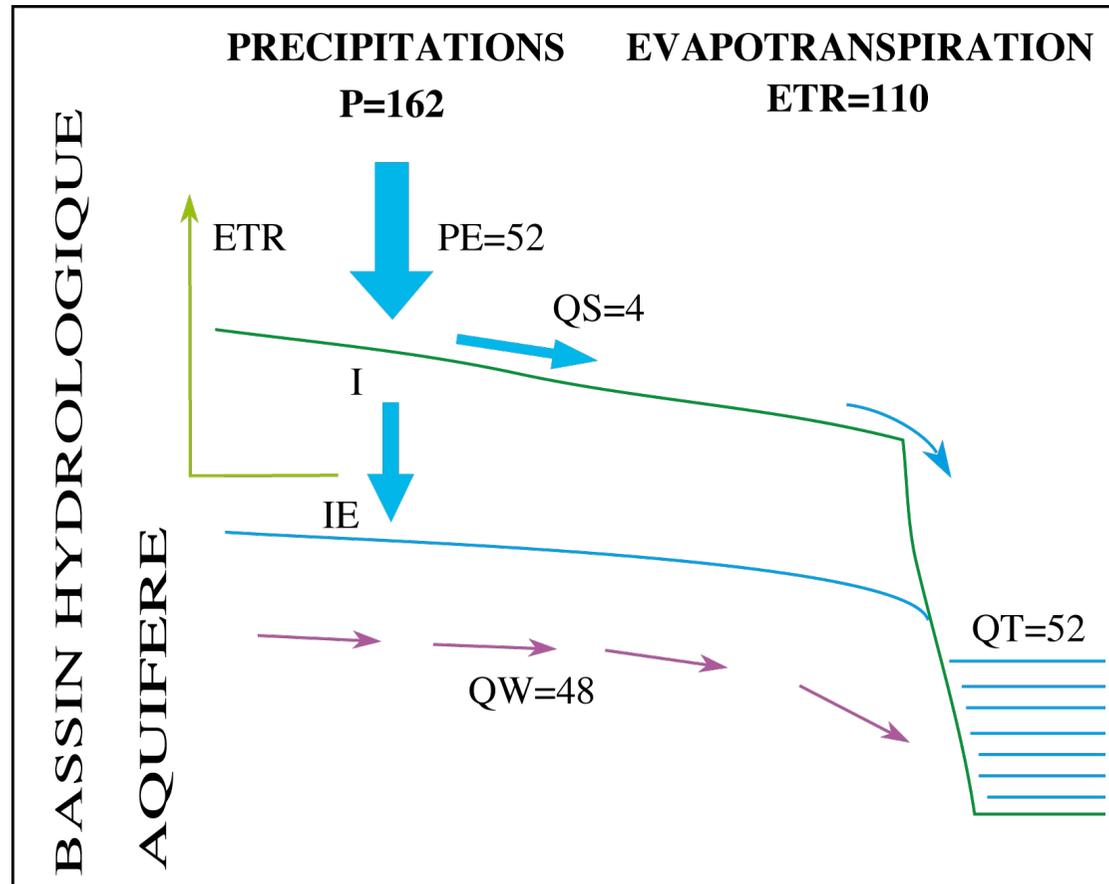
$\Delta S = 0$  sur 1 cycle (ou moyenne sur plusieurs cycles)

Unité : unité de volume / unité de temps ( $\text{m}^3/\text{an}$ )

ou

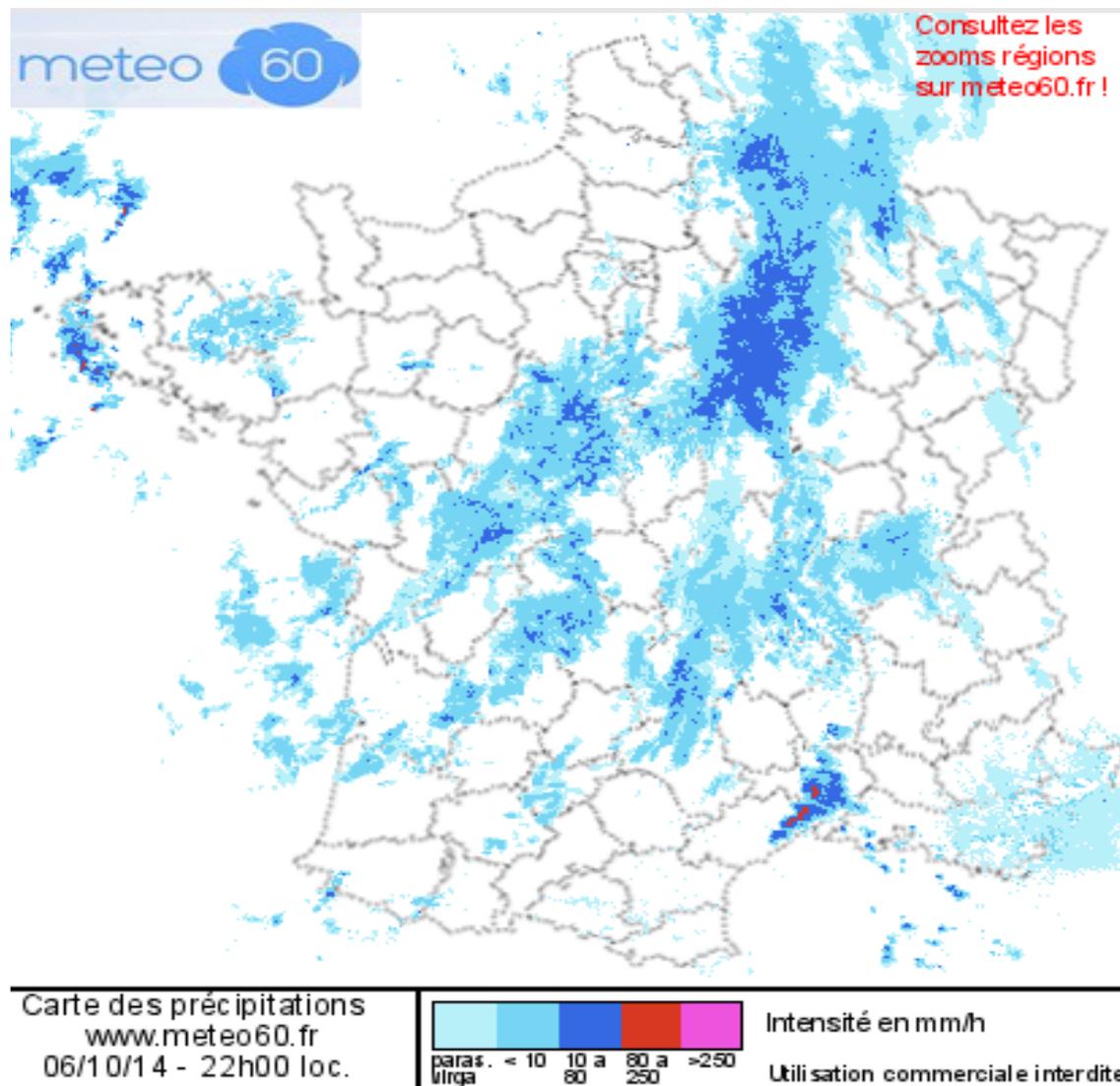
lame d'eau / unité de temps ( $\text{mm}/\text{an}$ )

### 3- La circulation de l'eau : de l'échelle de la planète à celle du BV notion de bilan et de déficit



*Bilan hydrologique de l'Hallue en  $hm^3/an$*

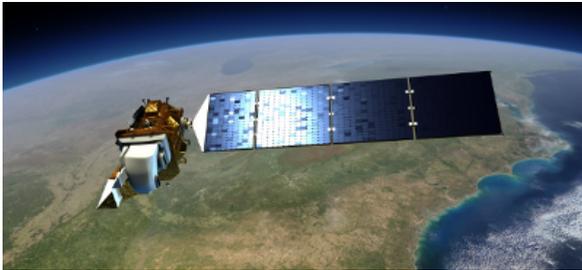
# Mesures de la pluie



# Mesures de l'évapotranspiration

+  $T^{\circ}$  , rayonnement solaire, vent,  
Hygrométrie, vapeur, CO<sub>2</sub>...

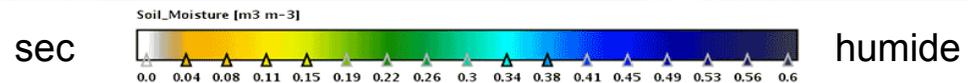
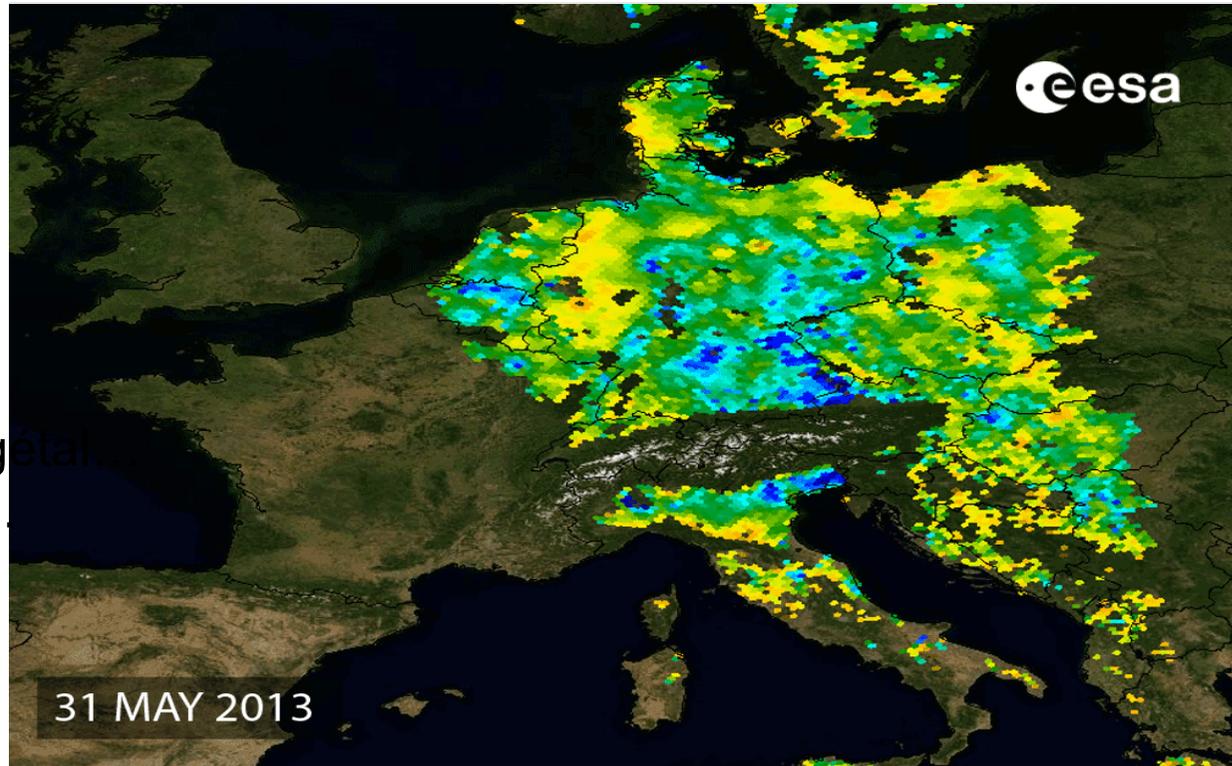




## Satellites

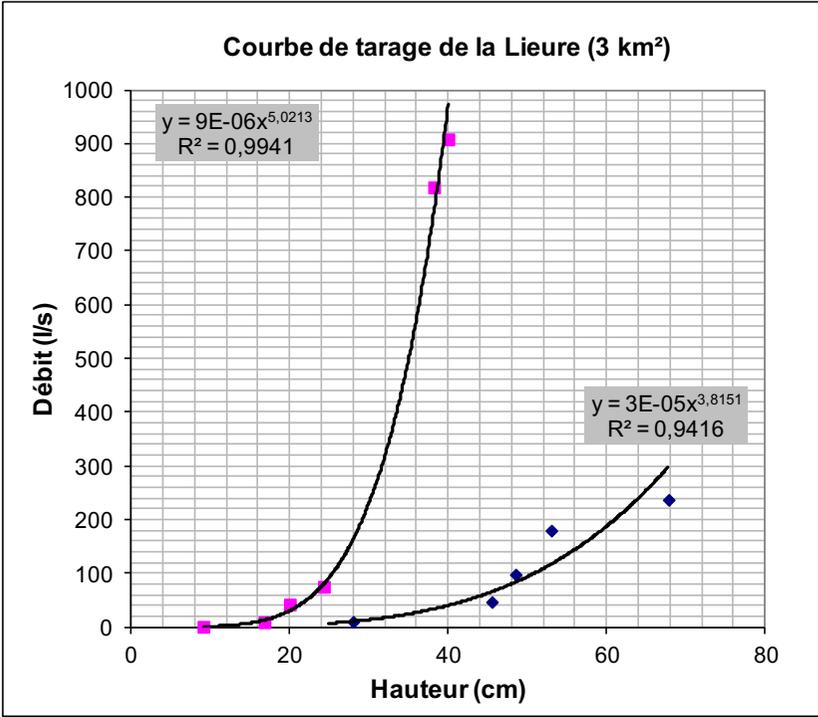
Pluie, humidité, couvert végétal  
Niveau et T° des océans...

Principe : mesure de  
longueurs d'ondes  
venant de la Terre dans  
une large gamme



Exemple : carte d'humidité des sols

→ Comment prévoir les évolutions futures du cycle de l'eau ?



### 3- La circulation de l'eau : de l'échelle de la planète à celle du BV notion de bilan et de déficit

#### Limites des bilans :

- qualité des données
- pas de temps des mesures (crues)
- erreurs difficiles à estimer
- hétérogénéité des pluies



#### Intérêts des bilans :

- vérification de la connaissance du BV (surface et souterrain)
- vérification de la qualité des mesures
- évolution des réserves d'eau
- détermination des volumes exploitables ( $Q_{exp}$ )

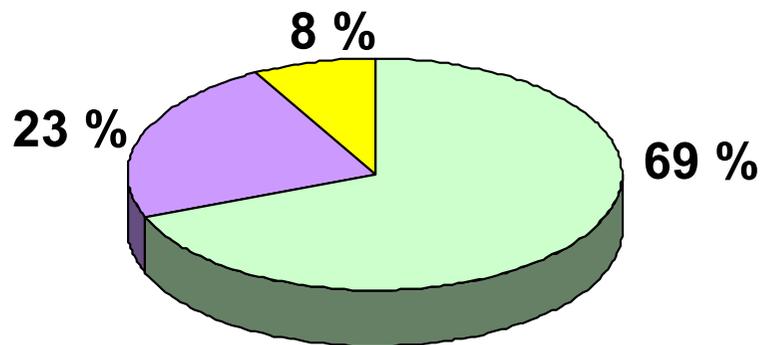
$$\text{--> } P = ETR + QS + QW + Q_{exp}$$

## 4- L'homme : son influence sur le cycle de l'eau

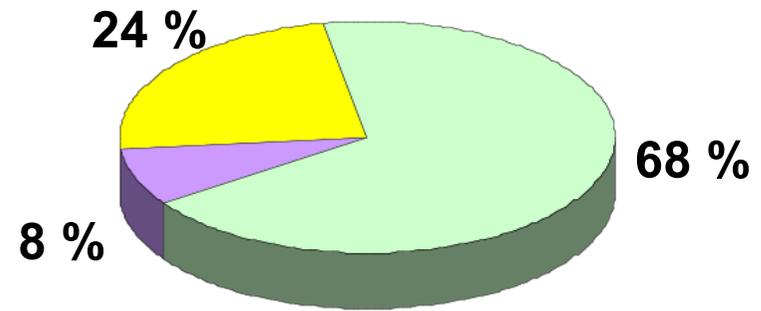
	population de la Terre (milliards)	consommation par habitant (m3)	besoins domestiques (Gm3)	besoins agricoles (Gm3)	besoins industriels (Gm3)	total des besoins (Gm3)
<b>1900</b>	1,7	230	20	350	30	400
<b>1980</b>	4,5	640	130	2100	600	2860
<b>2015</b>	7	1000	500	4200	2300	7000

*Evolution des besoins humains en eau (Jacques, 1996)*

### Echelle mondiale



### En France

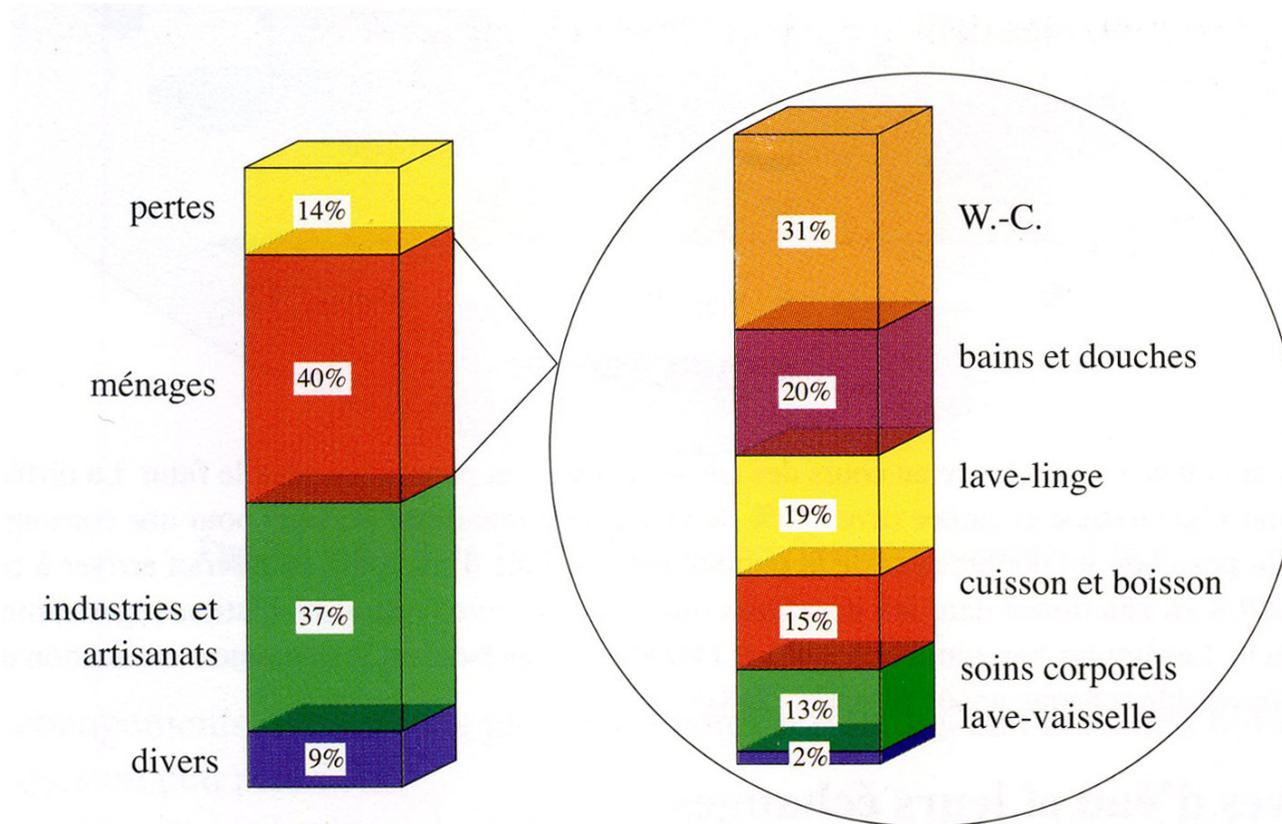


■ Agriculture

■ Consommation domestique

■ Industrie-Energie

## 4- L'homme : son influence sur le cycle de l'eau



Consommation moyenne d'eau par jour et par personne:

*USA : 300 l*

*France : 150 à 200 l*

*Pays en voie de développement : 50 l*

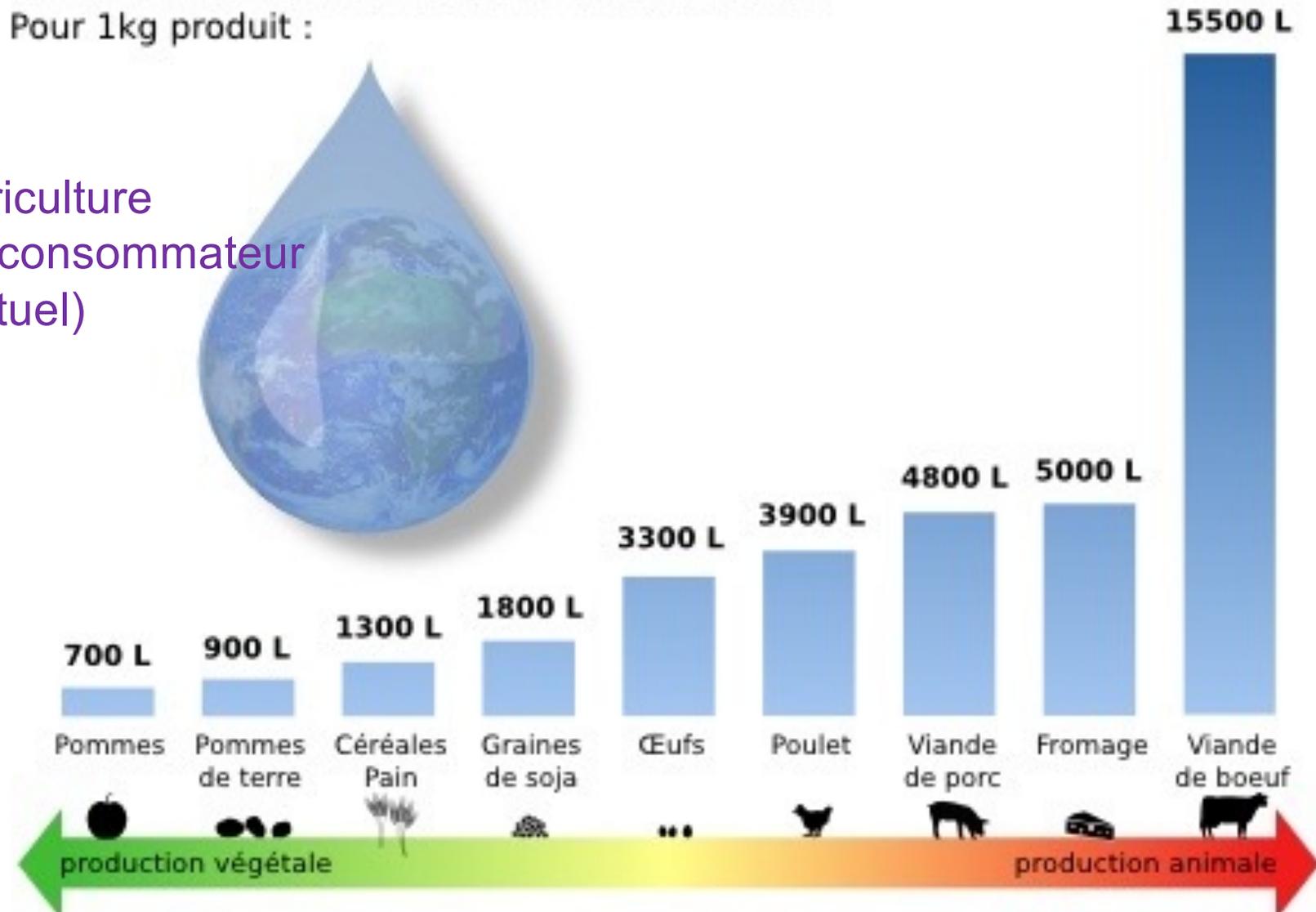
## 4- L'homme : son influence sur le cycle de l'eau

### Besoin en eau des aliments

Pour 1kg produit :



Agriculture  
1<sup>er</sup> consommateur  
(actuel)

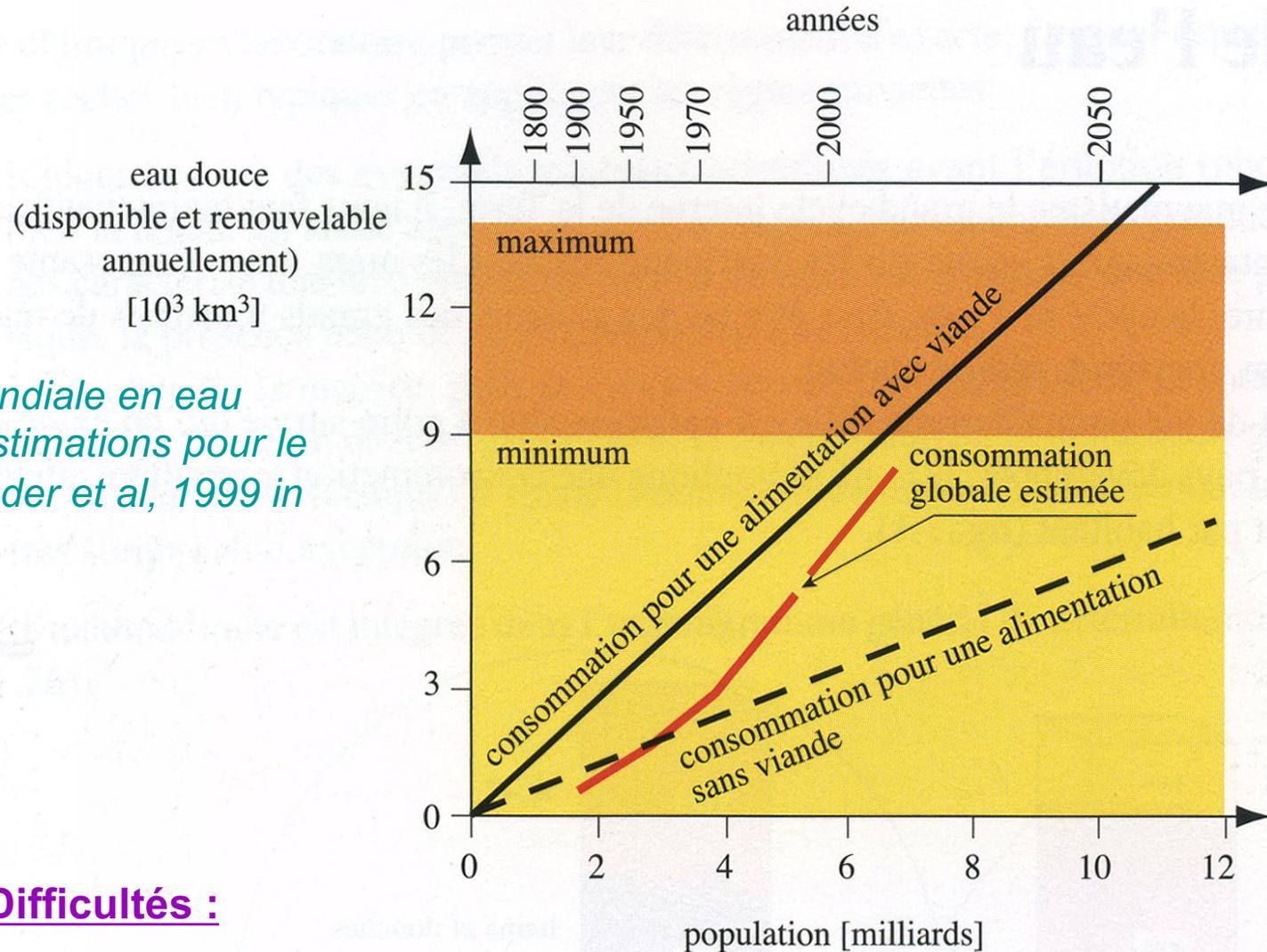


Source : Water Foot Print <http://www.waterfootprint.org/?page=files/productgallery>

Visuel [www.L214.com](http://www.L214.com)

## 4- L'homme : son influence sur le cycle de l'eau

Consommation mondiale en eau douce passée et estimations pour le futur (d'après Zehnder et al, 1999 in Parriaux, 2006)



### Difficultés :

- distribution irrégulière des ressources dans le temps et dans l'espace
- distribution inégale des populations

## 4- L'homme : son influence sur le cycle de l'eau

### Urbanisation et endiguement des cours d'eau

Diminution de QW mais surfaces faibles

Accélération de QS --> crues

Augmentation de QW par fuites des réseaux



Montpellier 2014



## 4- L'homme : son influence sur le cycle de l'eau

### Urbanisation et endiguement des cours d'eau

Diminution de QW mais surfaces faibles

Accélération de QS --> crues

Augmentation de QW par fuites des réseaux

### Modifications des pratiques agricoles

Augmentation des parcelles : augmentation de R

Déprise (pays tempérés) : diminution de R

Déforestation : diminution de l'ETP, augmentation de R et de QW

## 4- L'homme : son influence sur le cycle de l'eau

### Urbanisation et endiguement des cours d'eau

Diminution de QW mais surfaces faibles

Accélération de QS --> crues

Augmentation de QW par fuites des réseaux

### Modifications des pratiques agricoles

Augmentation des parcelles : augmentation de R

Déprise (pays tempérés) : diminution de R

Déforestation : diminution de l'ETP, augmentation de R et de QW



## 4- L'homme : son influence sur le cycle de l'eau

### Urbanisation et endiguement des cours d'eau

Diminution de QW mais surfaces faibles

Accélération de QS --> crues

Augmentation de QW par fuites des réseaux

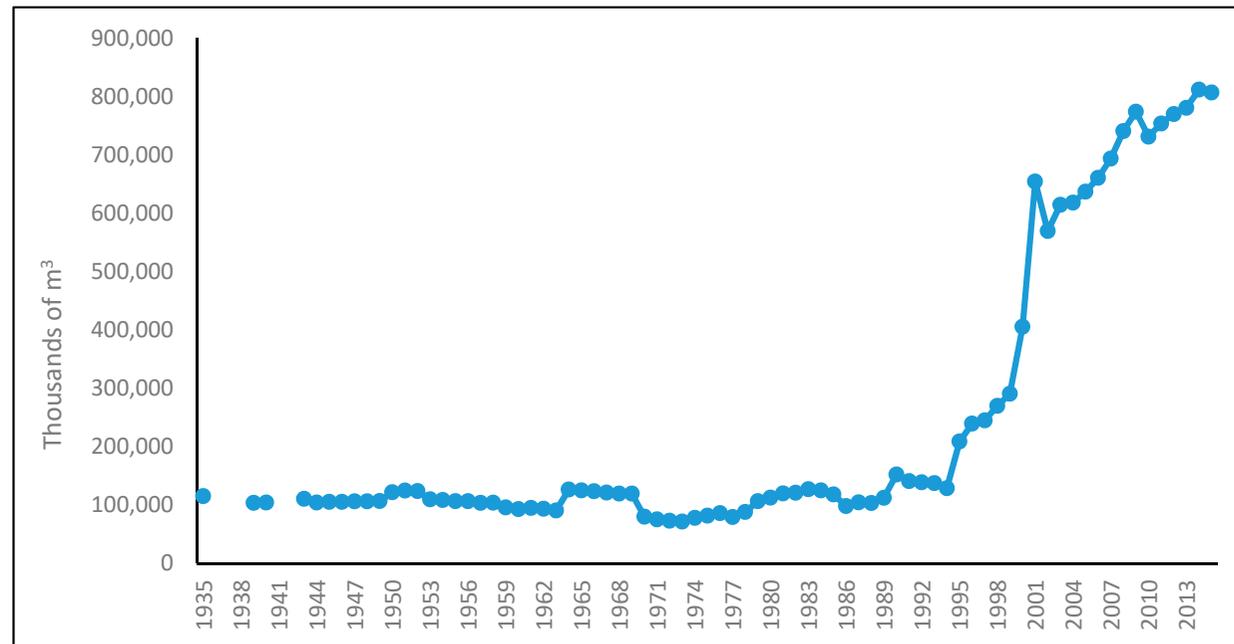
### Modifications des pratiques agricoles

Augmentation des parcelles : augmentation de R

Déprise (pays tempérés) : diminution de R

Déforestation : diminution de l'ETP, augmentation de R et de QW

*Consommation en eau en Espagne pour la culture de la vigne (Ayuda et al, Water, 2020)*



## 4- L'homme : son influence sur le cycle de l'eau

### Urbanisation et endiguement des cours d'eau

Diminution de QW mais surfaces faibles

Accélération de QS --> crues

Augmentation de QW par fuites des réseaux

### Modifications des pratiques agricoles

Augmentation des parcelles : augmentation de R

Déprise (pays tempérés) : diminution de R

Déforestation : diminution de l'ETP, augmentation de R et de QW

### Irrigation

Augmentation de l'Evaporation

Diminution de QS et QW (ex: mer d'Aral, Ouest USA)

*Salinisation des sols*

### Travaux souterrains/excavations

Modifications de la recharge des nappes

Pompages

vidéo : <https://www.tridaine.be>

## 4- L'homme : son influence sur le cycle de l'eau

**Barrages** (régulent 28 Tm<sup>3</sup> soit 7% du flux des fleuves)

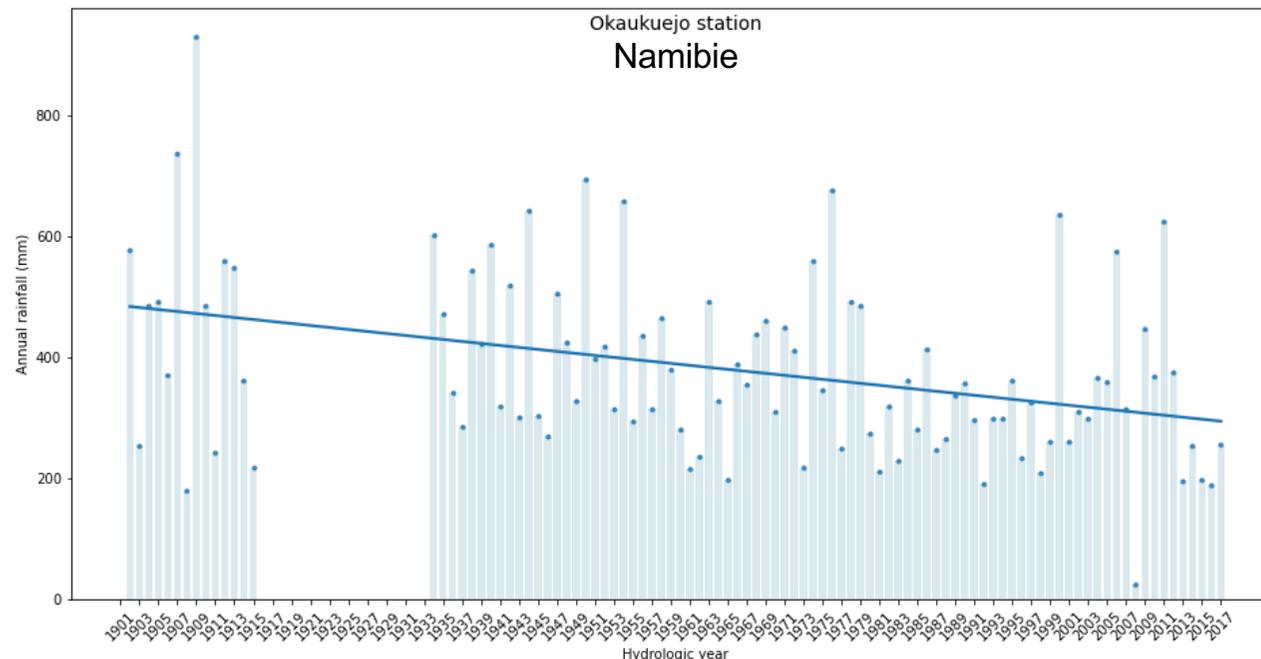
Augmentation de E, diminution de QS, augmentation de QW si fuites

**Croissance démographique/niveau de vie**

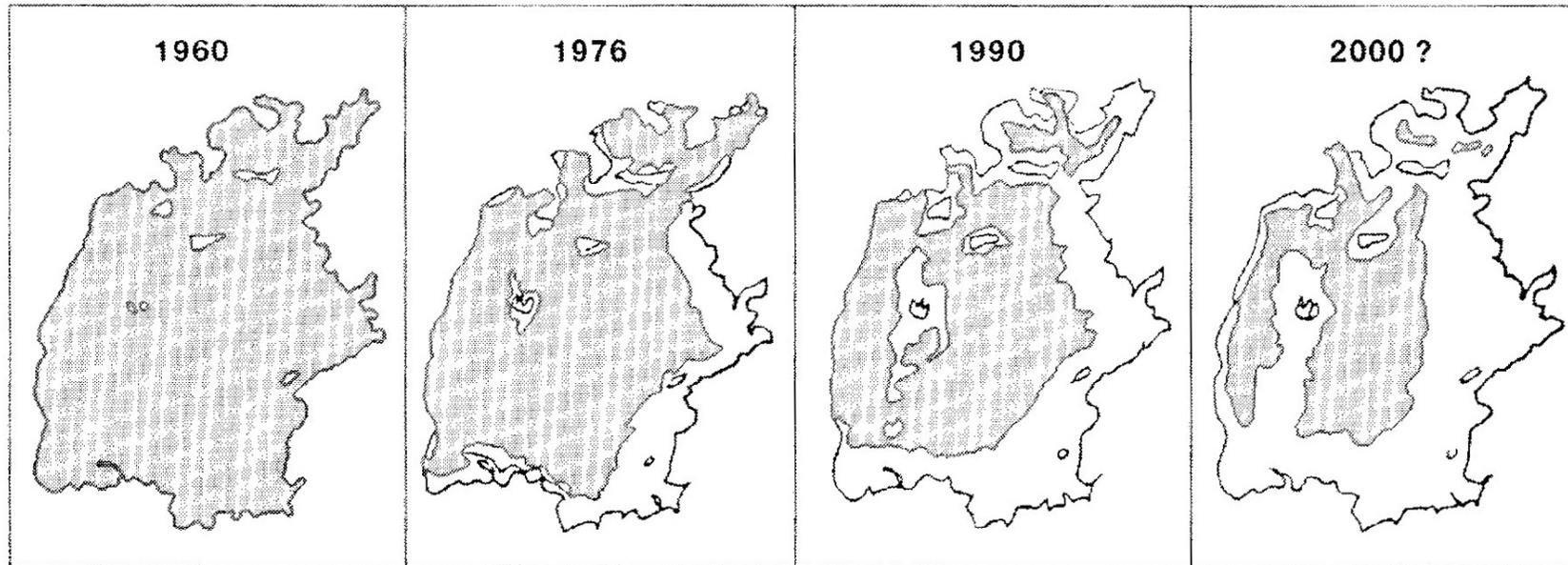
AEP : diminution de QW, (augmentation de QW)

**Emission de gaz à effet de serre (indirect)**

Réchauffement climatique : modification du volume des réservoirs hydriques

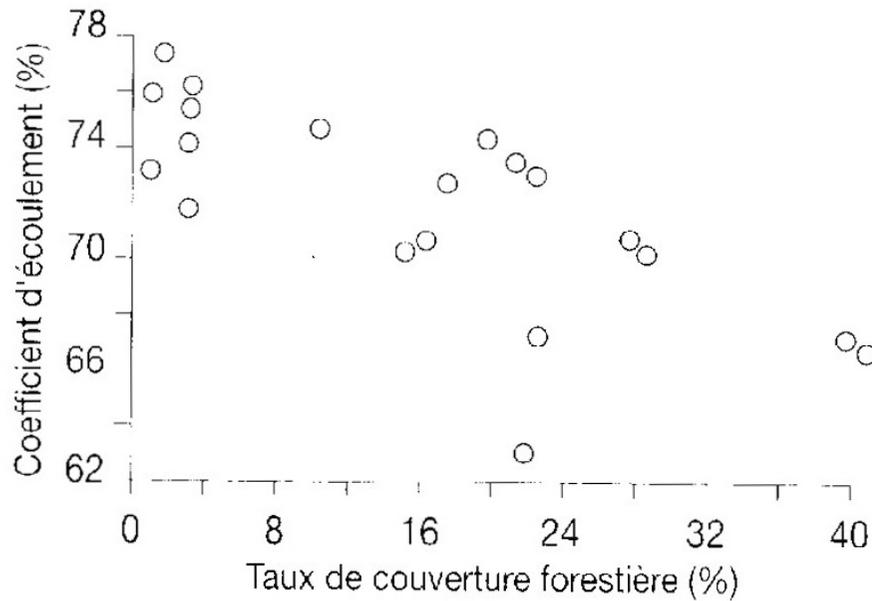


## 4- L'homme : son influence sur le cycle de l'eau



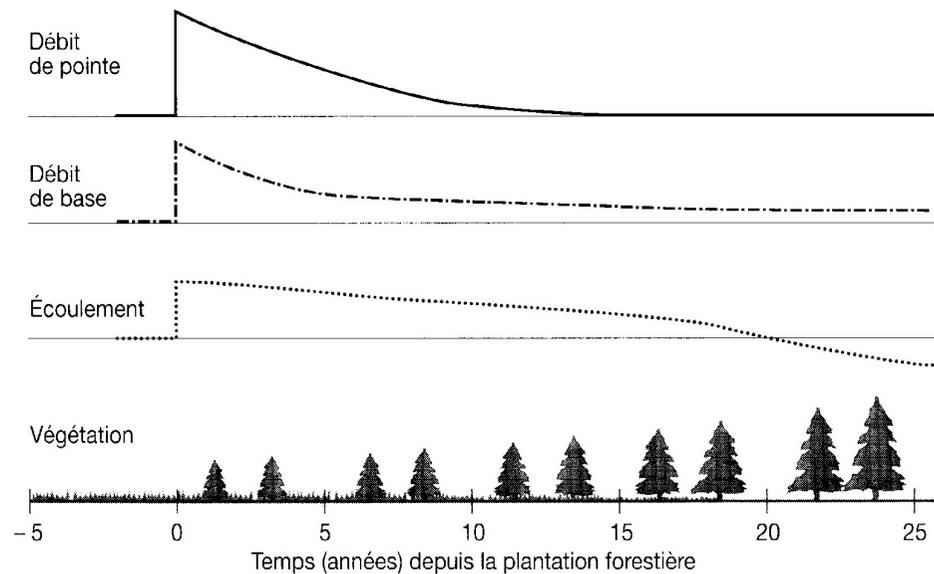
*Evolution de la superficie de la Mer d'Aral (Létolle et al, 1993 in Cosandey, 2000)*

## 4- L'homme : son influence sur le cycle de l'eau



*Relation entre le coeff d'écoulement et le taux de couvert forestier dans le Pays de Galles (Mad'ud, 1992 in Cosandey, 2000)*

**Evolution des débits en fonction de la croissance des plantations (Cosandey, 2000)**



## **2- La phase souterraine du cycle de l'eau**

<https://www.youtube.com/watch?v=3gJwrbEkZ6Y>

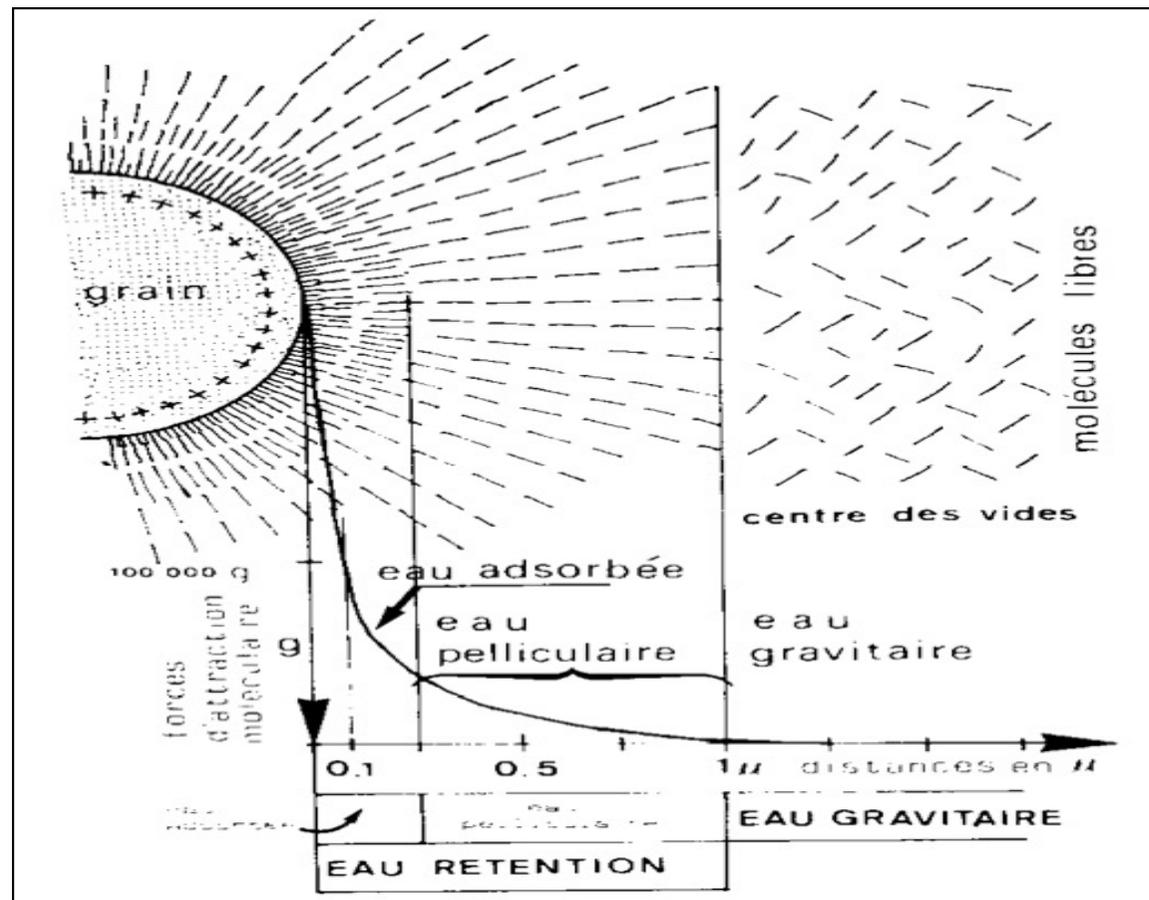
# Propriétés hydrodynamiques des milieux poreux

## Etat de l'eau dans les milieux poreux

Eau gravitaire ou libre

Eau adsorbée ou liée ou hygroscopique

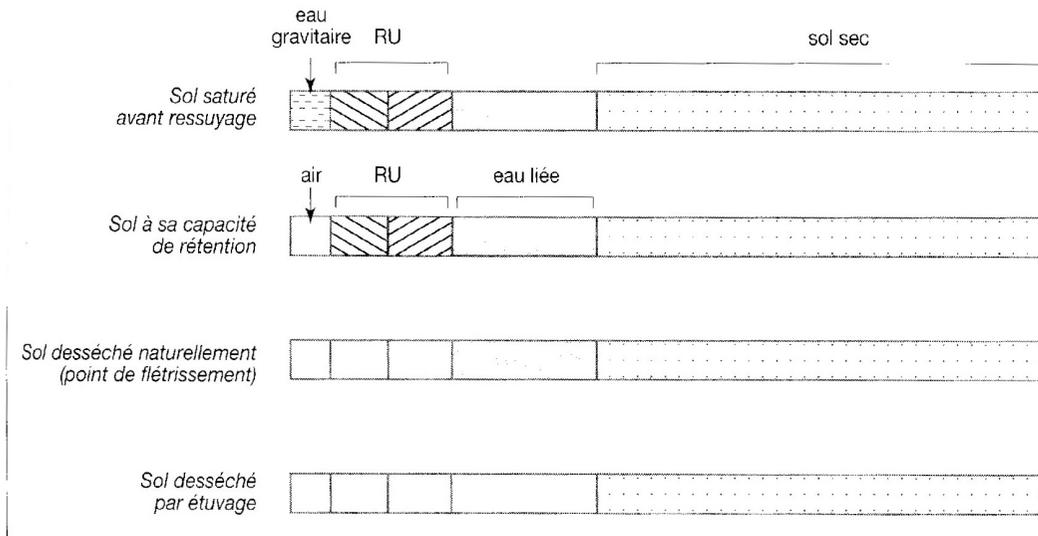
Eau pelliculaire



# Les milieux poreux

## Etat de l'eau dans les milieux poreux

Types d'eau souterraines		Moyens d'extraction
Eau disponible	eau gravitaire	égouttage
Eau non-disponible	eau de rétention	eau pelliculaire
		eau adsorbée
		centrifugation
		dessiccation à 108°C



Les différentes liaisons de l'eau et du sol, d'après Brochet et Gerbier, 1974 in Cosandey

## Les milieux poreux

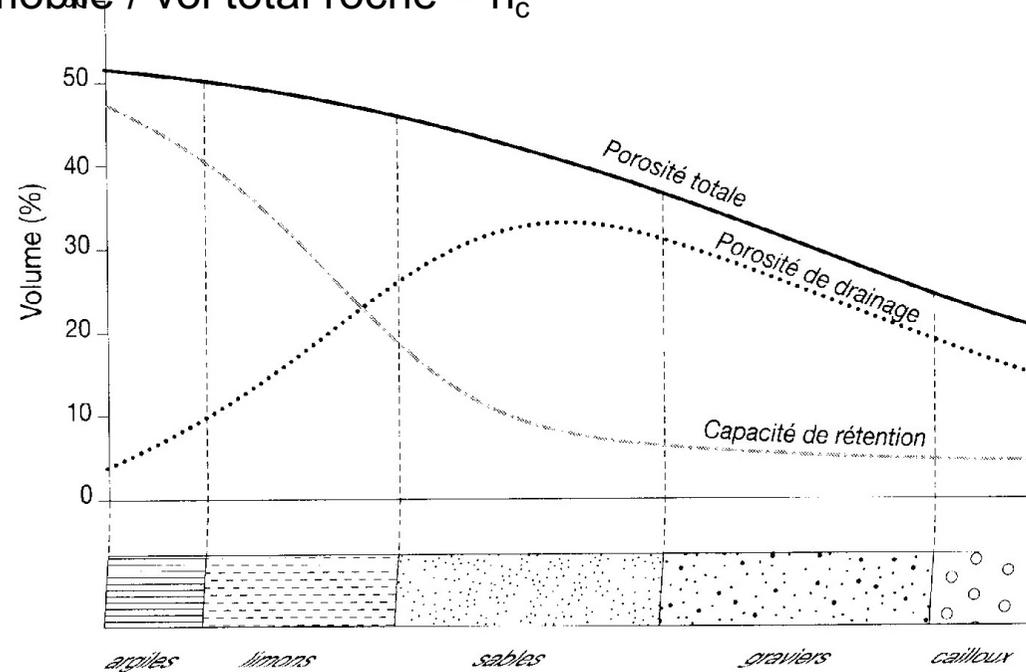
### Définition de la porosité (des porosités)

Porosité totale (%) = vol vides / vol total roche =  $n$

Porosité efficace (%) = vol eau gravitaire / vol total roche =  $n_e$   
Porosité de drainage

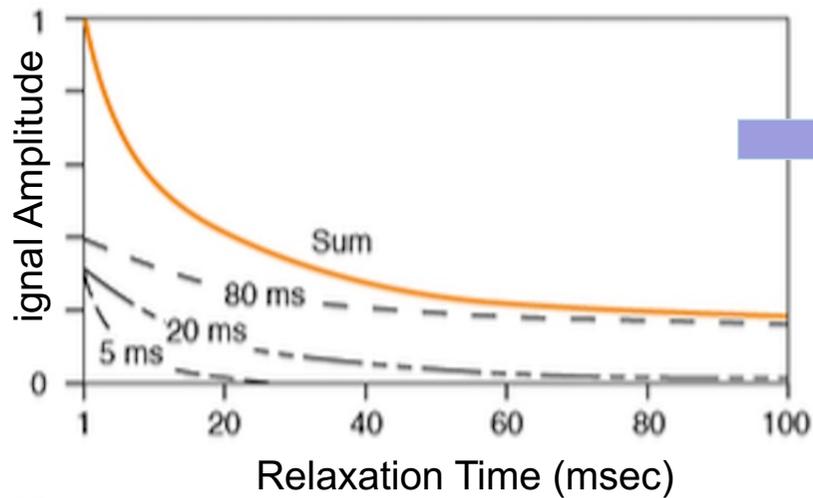
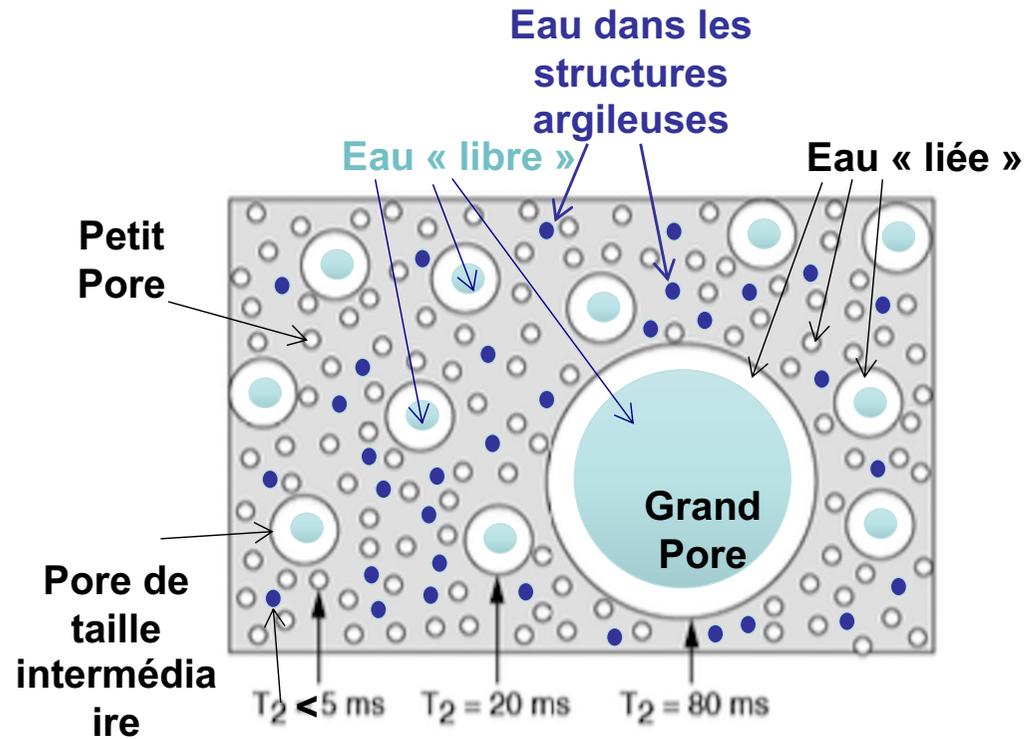
Porosité cinématique (%) = vol eau mobile / vol total roche =  $n_c$

$$n > n_c > n_e$$

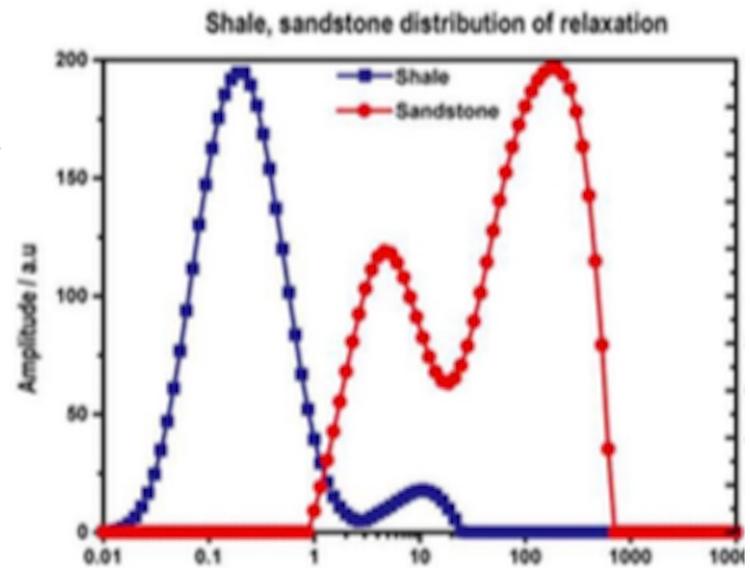
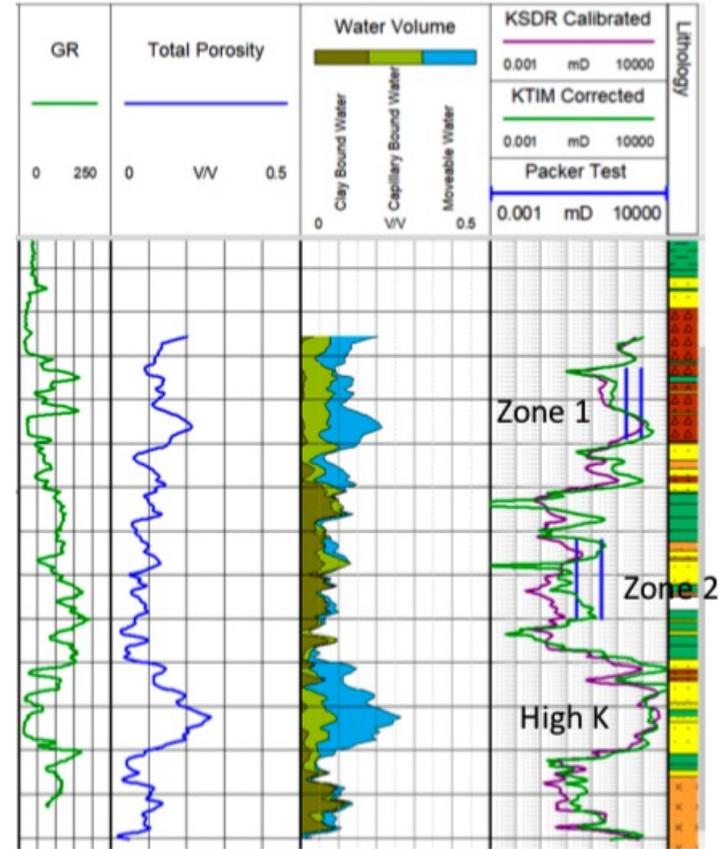


Relation entre porosité, porosité de drainage et capacité de rétention pour différents types de matériaux meubles, d'après Eckis, 1934 in Cosandey

# Les milieux poreux

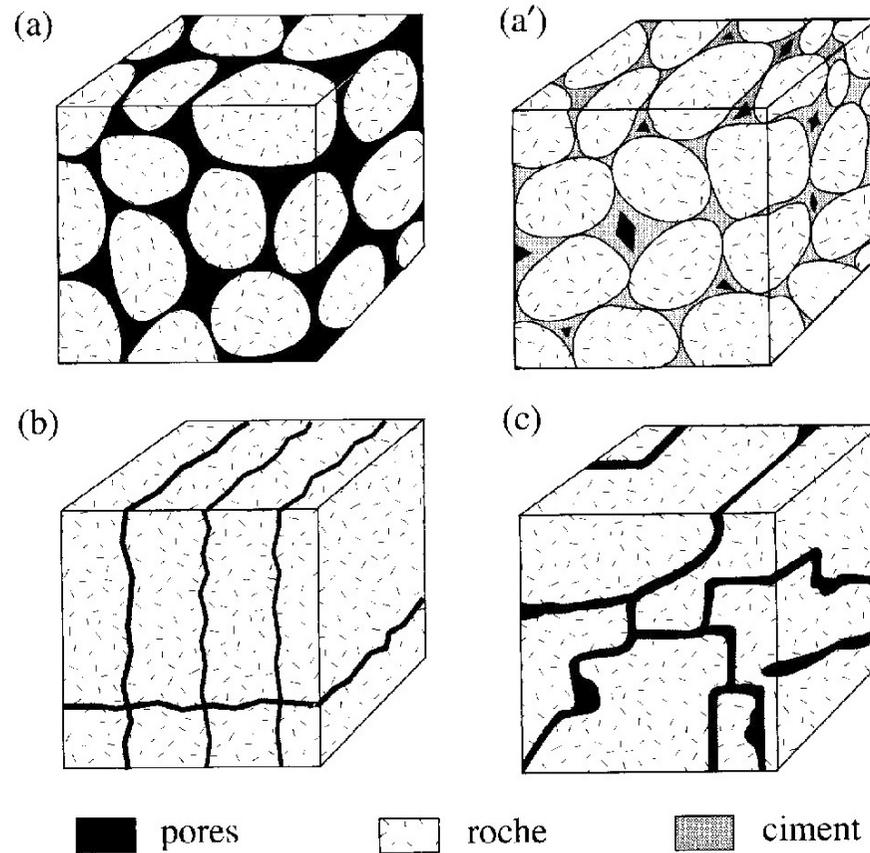


Principe de la RMP



# Les milieux poreux

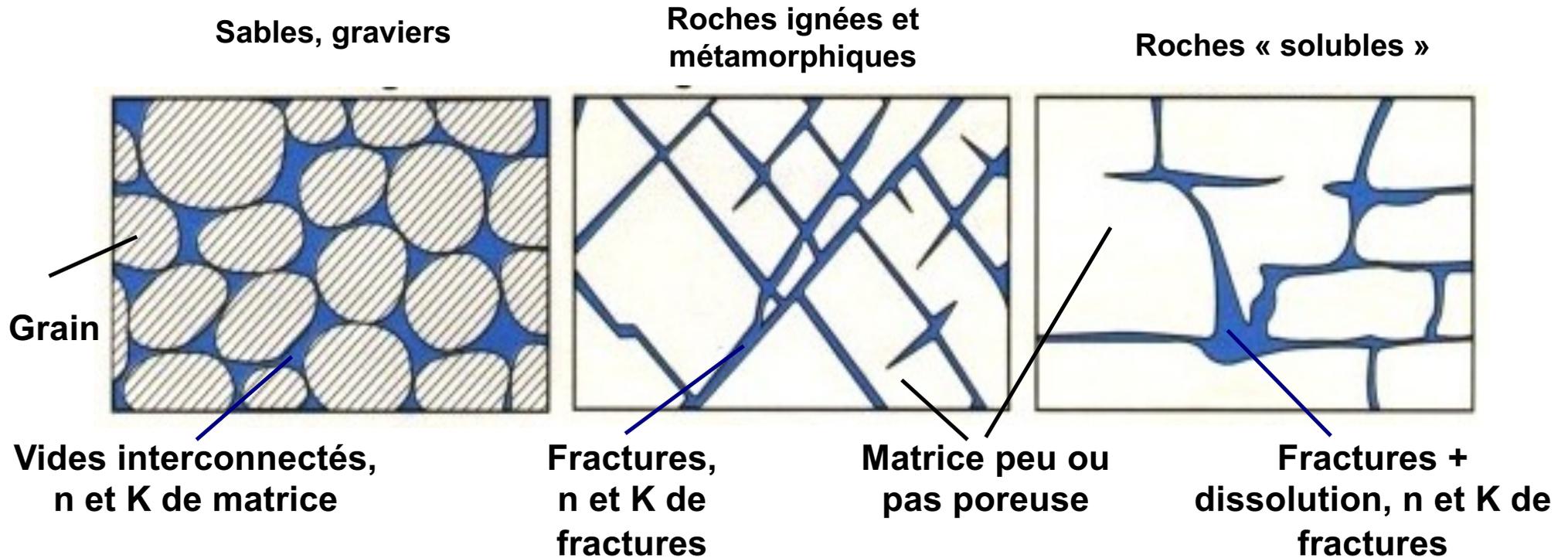
2 types de milieux : consolidés/non consolidés



*Différentes formes de porosités (Parriaux, 2006) : sable (a), grés (a'), roche fissurées (b), karst (c)*

# Les milieux poreux

## Types de réservoirs : poreux / fissurés



Notion de Porosité primaire / secondaire

## Les milieux poreux : karstiques



Vasseur F., [www.plongeesout.com](http://www.plongeesout.com)



## Les milieux poreux

### Valeurs typiques de porosités

<b>Types de sédiments</b>	<b>Porosité totale, n %</b>	<b>Porosité efficace, n<sub>e</sub> %</b>
<i>Graviers</i>	30 à 45	35 à 40
<i>Sables</i>	20 à 40	10 à 35
<i>Argiles</i>	45 à 50	<1

<b>Types de réservoirs</b>	<b>Porosité efficace, n<sub>e</sub> %</b>
<i>Graviers</i>	20 à 30
<i>Sables</i>	5 à 20
<i>Calcaire fissuré</i>	2 à 10
<i>Grès fissuré</i>	2 à 15
<i>Granite fissuré</i>	0.1 à 2
<i>Basalte fissuré</i>	8 à 10
<i>Schistes</i>	0.1 à 2

(Banton et al., 1997)

## Les milieux poreux

Contenu des vides

Les pores/fissures sont occupés par :  
une phase liquide (eau)  
et  
une phase gazeuse (air)

Teneur en eau (volumique)

La teneur en eau est la quantité d'eau contenue dans le matériau, rapporté au volume total.

Notation  $\rightarrow \theta = \text{volume d'eau} / \text{volume total}$

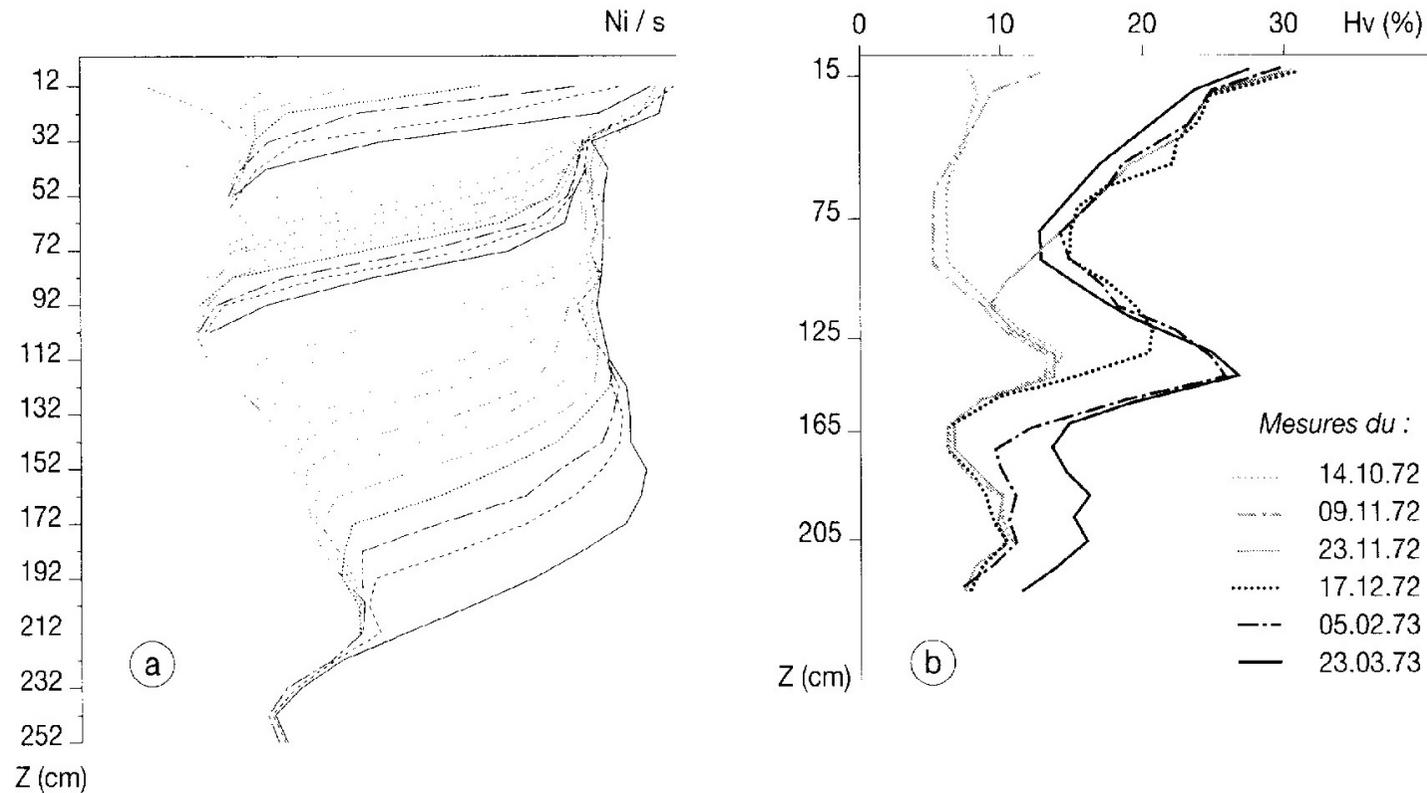
Unité  $\rightarrow \%$

Milieu saturé (eau + solide):  $\theta = n$

Milieu non-saturé (eau + air + solide):  $\theta$  est appelé humidité

## Les milieux poreux

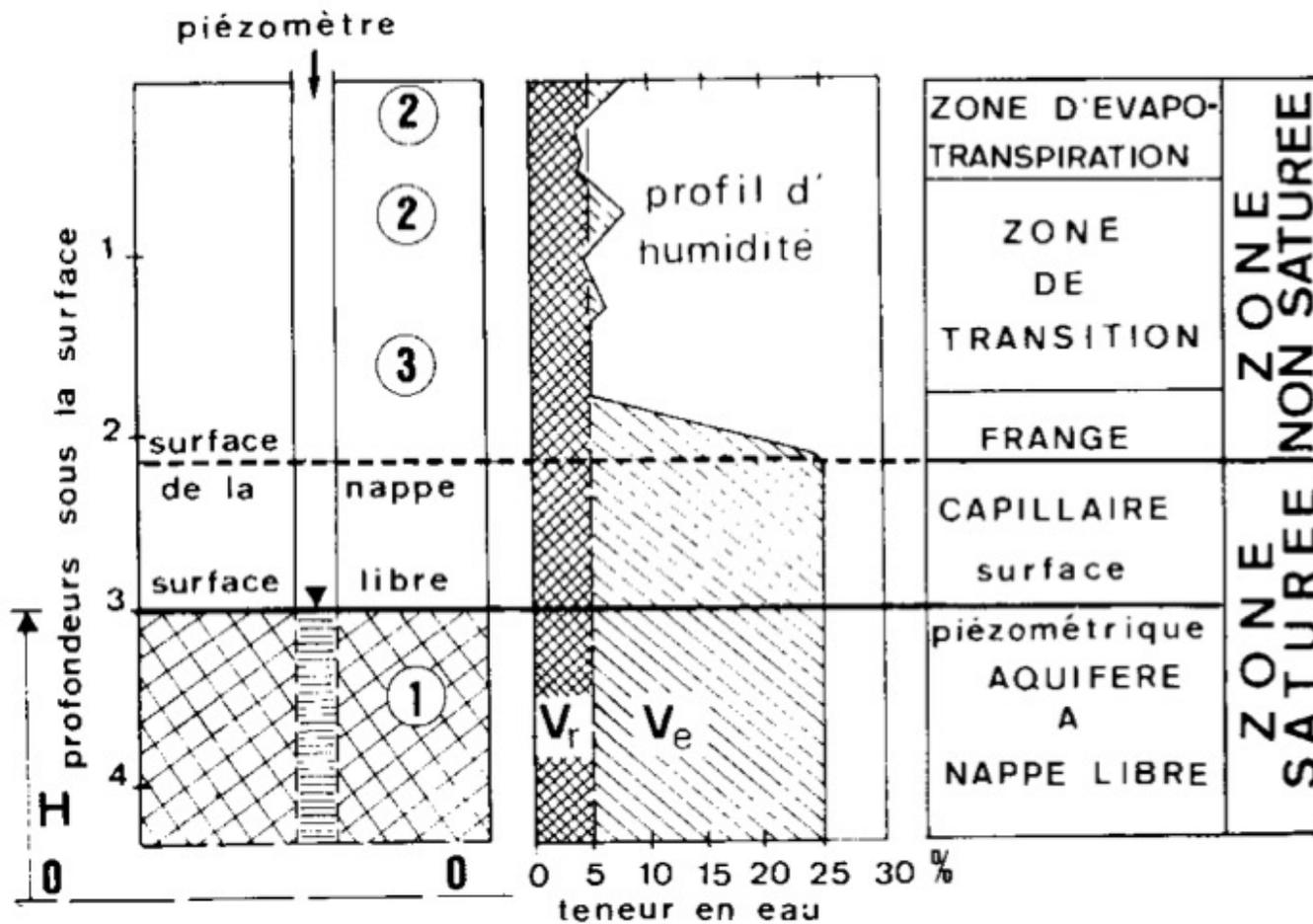
### Evolution de la teneur en eau (temps et profondeur)



*Positions successives des profils de teneur en eau en phase de réhumectation sous pluies artificielles (a) (Marcesse et Couchat, 1972) et sous pluies naturelles (b) Cosandey 1975 in Cosandey 2000*

# Les milieux poreux

## La recharge des nappes par percolation



## Les milieux poreux

### Hauteurs de la frange capillaire

Sable grossier : 12 - 15

Sable moyen : 40 - 50

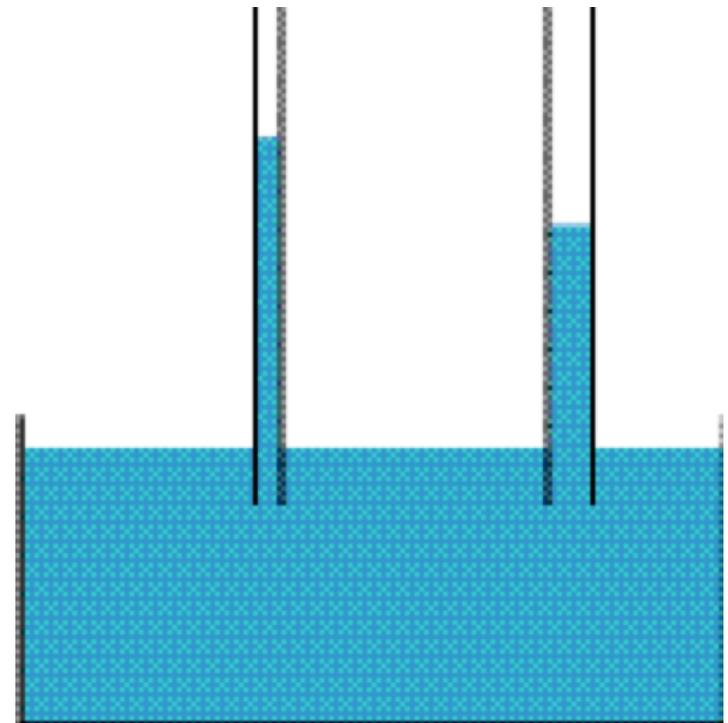
Sable fin : 90 - 110

Limon sableux : 175 - 200

Argile sableuse : 225 - 250

Craie : 120 - 938

*D'après Castany, 1967*



## Propriétés hydrodynamiques des milieux poreux

### Circulation de l'eau dans les milieux poreux

La conductivité hydraulique ( $K$ ) d'un matériau représente son aptitude à laisser circuler l'eau.

Fonction conductrice des roches ou des sols

$K$  dépend du matériau et du fluide  $K = k ( \rho \cdot g / \mu )$

Avec  $k$  : perméabilité intrinsèque (ne dépend que du matériau)

En milieu non-saturé :  $V = K(\theta) \cdot \Phi$  eq. de Richards (1931)

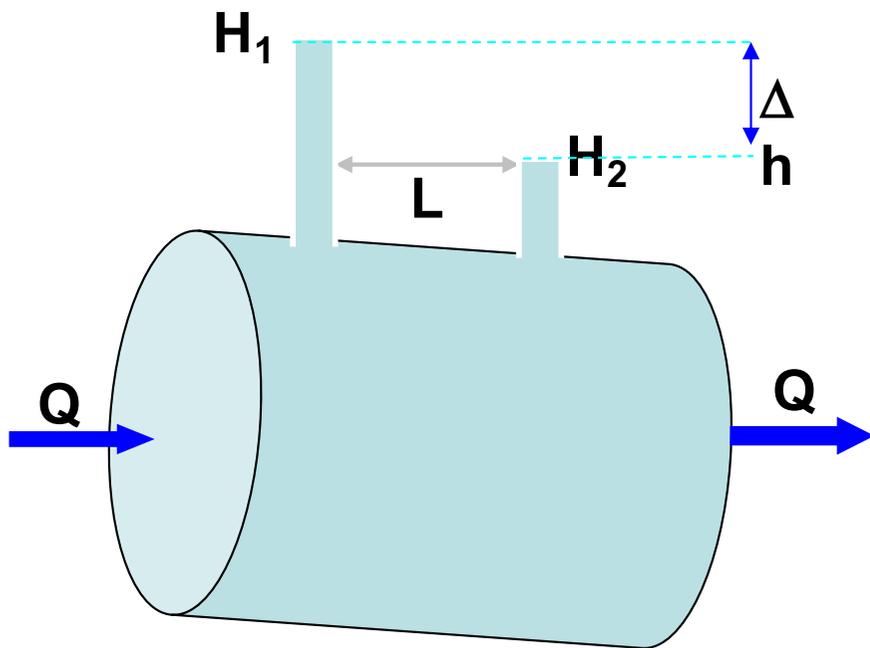
Remarque : Perméabilité isotrope  $K_x = K_y$   
anisotrope  $K_x \neq K_y$

## Propriétés hydrodynamiques des milieux poreux

### Circulation de l'eau dans les milieux poreux

Loi de Darcy (1856) :  $Q = A.K.i \rightarrow V = K.i$

Avec :  $Q$  : débit d'écoulement (constant) [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]  
 $V$  : vitesse de Darcy ou de filtration [ $\text{m}/\text{s}$ ]  
 $i = \Delta h / L$  : gradient de charge [ $\text{m}/\text{m}$ ]  
 $A$  : section d'écoulement [ $\text{m}^2$ ]  
 $K$  : conductivité hydraulique [ $\text{m}/\text{s}$ ]  
ou perméabilité (à l'eau)



**Relation applicable à un milieu homogène, continu et isotrope.**  
Applicable à l'échelle du VER, **pas à l'échelle du pore** (interaction eau-solide, écoulement tortueux, non linéaire).

➤ **Analogie entre l'écoulement d'eau souterraine et l'écoulement laminaire dans des conduites**

➤ **Conditions de validité restrictives, mais en réalité les cas où la loi de Darcy n'est pas applicable sont :**

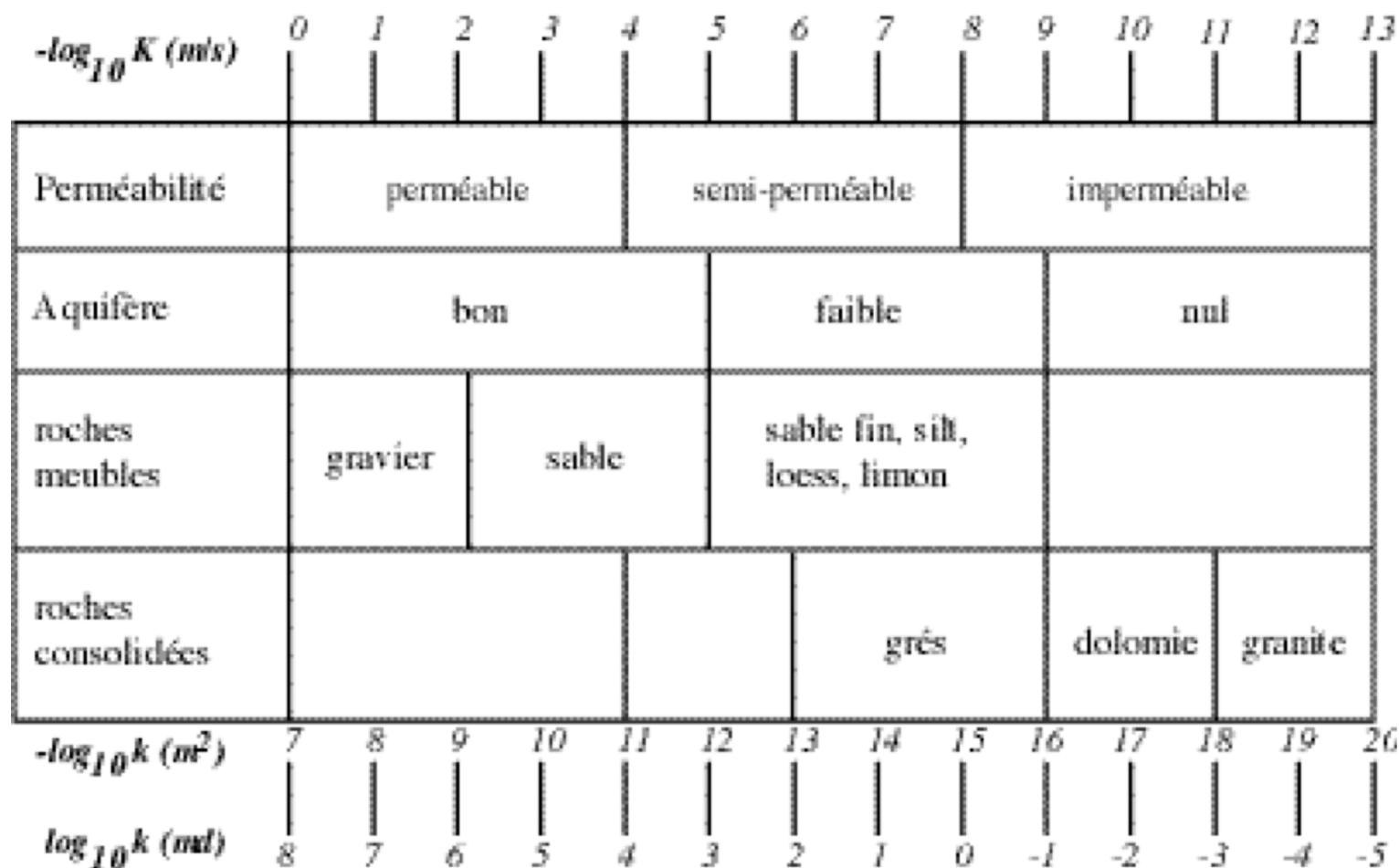
- les formations très hétérogènes,

- les réseaux karstiques

(milieu discontinu et vitesses d'écoulement élevées),

- les milieux où les vitesses d'écoulement sont très élevées  
(ex: au voisinage des captages).

# Valeurs typiques de conductivités hydrauliques



(Température de l'eau = 20°C)

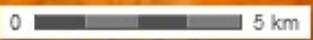
**Calcaire**

**Granite/Schiste**

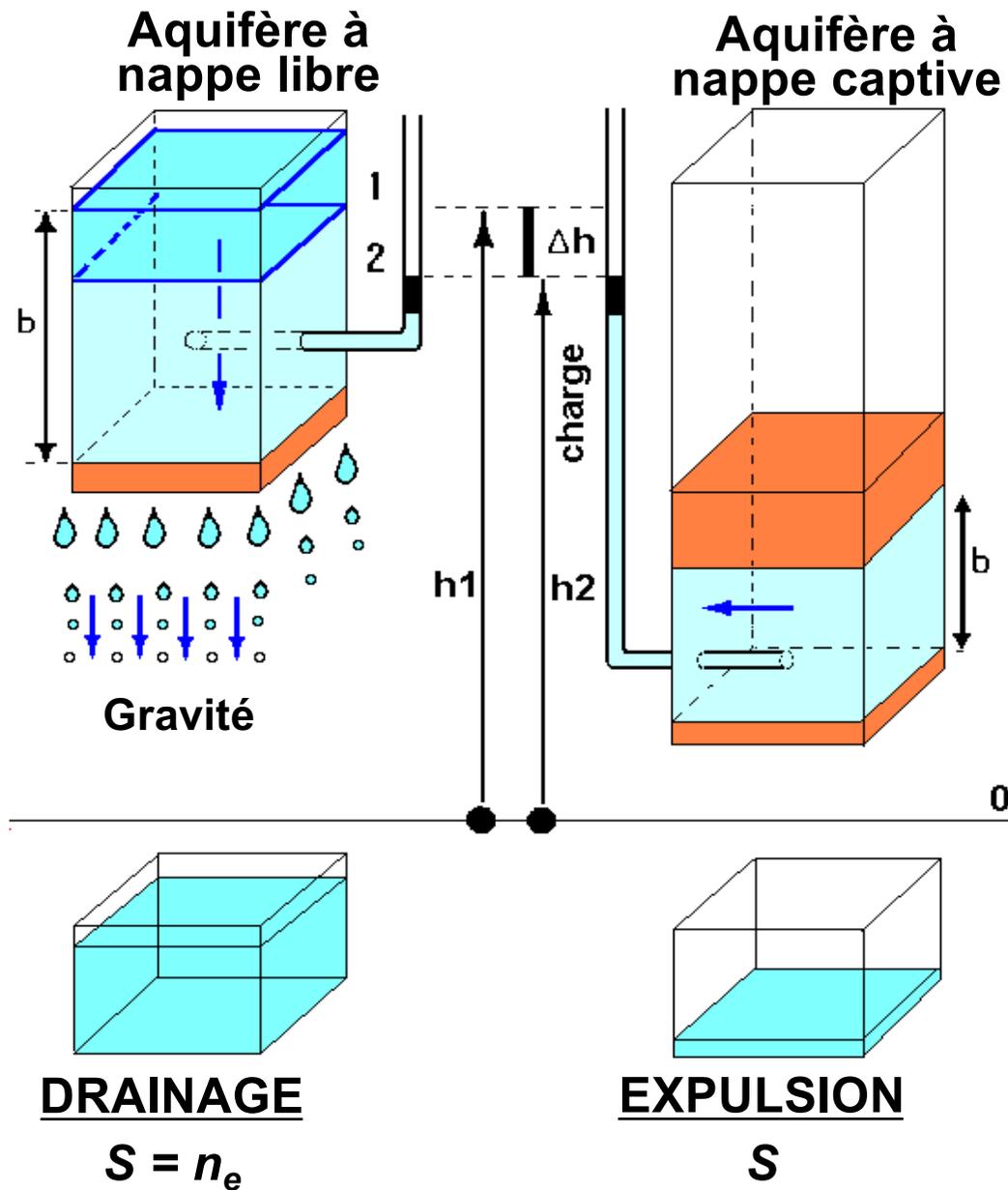
France métr...



Echelle 1 : 216.672



# Stockage d'eau dans les milieux poreux



## Emmagasinement Spécifique $S_s$

Volume d'eau obtenu pour  $1\text{m}^3$  de roche pour  $1\text{m}$  d'abaissement de charge

## Emmagasinement $S$ ( $S = S_s \times b$ )

Volume d'eau obtenu pour  $1\text{m}^2$  d'aquifère pour  $1\text{m}$  d'abaissement de charge

➤ Valeurs de  $S_s$  pour des aquifères libres

0,2 à 0,01 (moyennes)

➤ Valeurs de  $S$  pour des aquifères captifs

0,001 à 0,0001 (moyennes)

# Propriétés hydrodynamiques des milieux poreux

➤ **Transmissivité ( $m^2s^{-1}$ ) :**  $T = K.e$

avec  $K$ , conductivité hydraulique ( $ms^{-1}$ )

$e$ , épaisseur de l'aquifère (m)

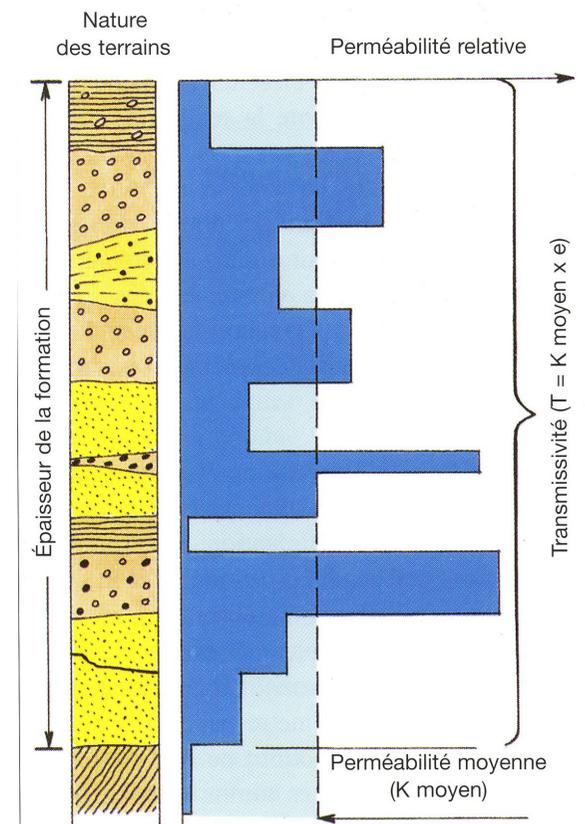
NB : Darcy,  $Q = K.A.i = K.e.L.i = T.i.L$

➤ **Diffusivité ( $m^2s^{-1}$ ) :**

avec  $T$ , transmissivité ( $m^2s^{-1}$ )

$S$ , coefficient d'emménagement

$$\frac{T}{S}$$



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

# **3- Les différents types d'aquifères**

# Etat des ressources en eaux souterraines - Situation début août 2024

## Légende

### LITHOLOGIE SIMPLIFIEE DES SYSTEMES HYDROGEOLOGIQUES

-  Calcaire - dolomie (aquifères karstiques)
-  Schiste, pélite, marne (peu aquifère)
-  Granite - gneiss (aquifères fissurés)
-  Formations sédimentaires indifférenciées
-  Alluvions récentes (nappes alluviales)
-  Alluvions anciennes (nappe villafranchienne)
-  Sables sous couverture (nappe astienne captive)

### DESIGNATION DES STATIONS

Abréviation Nom de la station de suivi (commune)

L'abréviation qui précède le nom de la station de suivi indique le type d'ouvrage :

- S. Source
- F. Forage exploité pour l'eau potable
- Pz Piézomètre = forage non exploité

La couleur et le style de l'écriture définissent le gestionnaire du réseau de suivi :

- en gras Conseil départemental de l'Hérault
- en italique OFB / BRGM
- en rouge SMETA (nappe astienne)

### SITUATION DES NAPPES

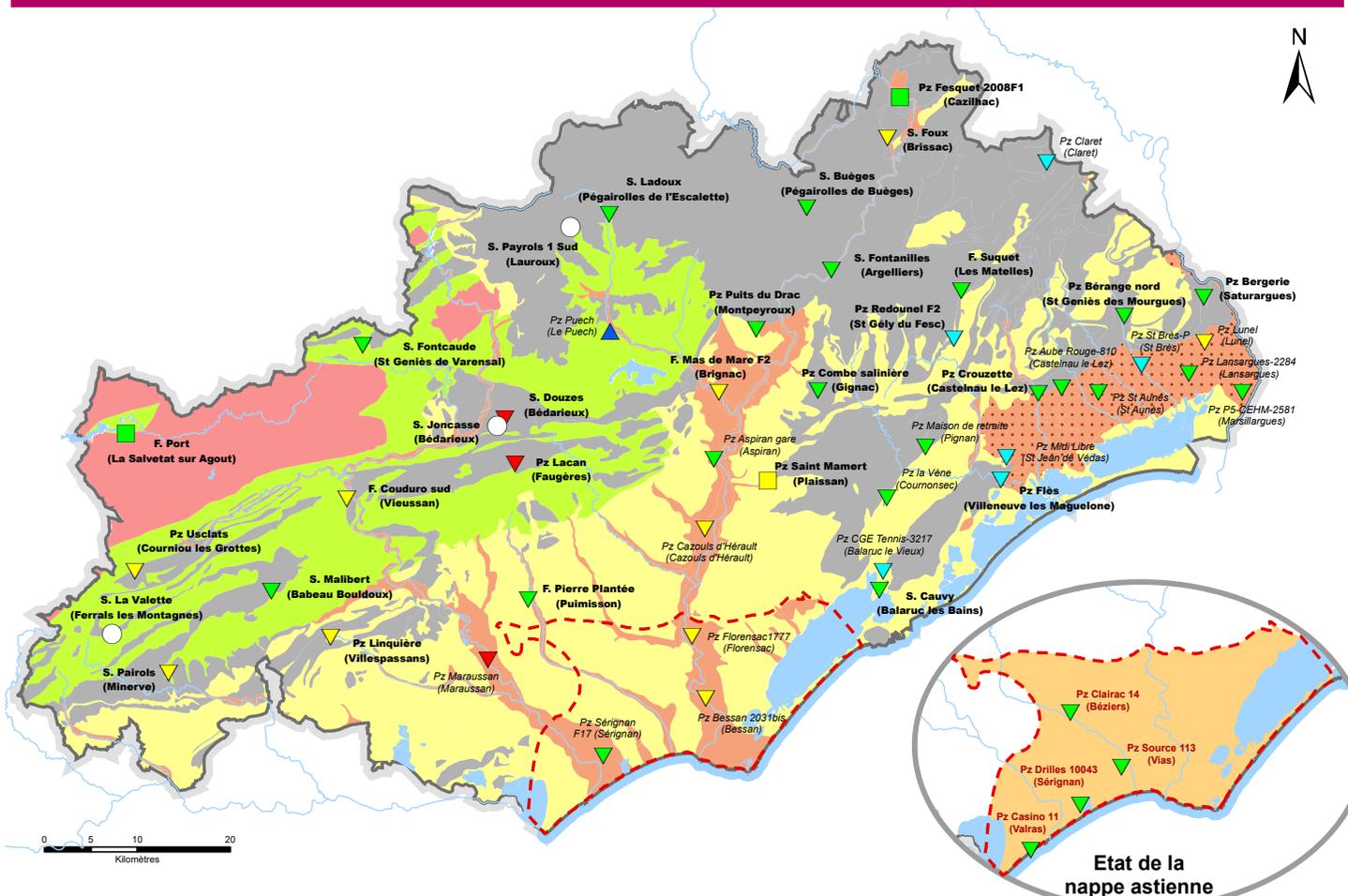
Chaque station de suivi est représentée par un symbole dont la couleur spécifie le niveau d'une nappe et dont la forme indique son évolution.

#### ETAT DES NIVEAUX (couleur du symbole)

-  Excédentaire - Niveau très supérieur à la normale
-  Haut - Niveau supérieur à la normale
-  Normal - Niveau normal
-  Bas - Niveau inférieur à la normale
-  Déficitaire - Niveau très inférieur à la normale

#### EVOLUTION DES NIVEAUX (forme du symbole)

-  Tendence à la hausse
-  Tendence stable
-  Tendence à la baisse
-  Station de suivi sans données actualisées ou pertinentes



Selon le bulletin infoclim34, le mois de juillet est marqué par des températures de saison à chaudes avec une fin de mois caniculaire. La pluviométrie est fortement déficitaire, excepté dans Biterrois, la Basse Vallée de l'Hérault et la partie sud du Montpellierais (proches des moyennes saisonnières). Cependant, ces quelques pluies ne sont pas suffisantes pour générer un impact positif sur les nappes, elles contribuent seulement à une diminution des prélèvements.

Les niveaux d'eau des nappes restent majoritairement normaux pour 55% des stations. La tendance à la baisse se poursuit passant de 85% à 91% des points. Les minimas historiques sont franchis sur 3 stations.

Les aquifères karstiques présentent des niveaux normaux en baisse. Les nappes alluviales affichent des niveaux bas en baisse. La nappe villafranchienne présente des niveaux normaux en baisse. Les aquifères fissurés montrent des niveaux normaux stables. La nappe astienne présente un niveau normal en baisse.

L'absence de pluie et les prélèvements d'eau impactent tous les aquifères, induisant une baisse généralisée. Les niveaux d'eau restent globalement normaux et classiques pour la saison, proche des moyennes saisonnières dans la partie Est du Département. A contrario, à l'Ouest, les aquifères sont bas et poursuivent également leur décroissance. La ressource est sous tension et des premiers portages d'eau sont nécessaires. Seules une vraie sobriété et des restrictions d'usages peuvent permettre de diminuer la pression sur la ressource.

Sources : Dept34 / SMETA / OFB - BRGM

## Notions d'hydraulique

La loi de Bernoulli (1738) traduit la conservation de l'énergie des particules d'eau (1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique). La charge hydraulique  $h$  est donnée par :

$$h = z + \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \quad (\text{en J/N ou m}) \quad \text{pour une particule de 1N}$$

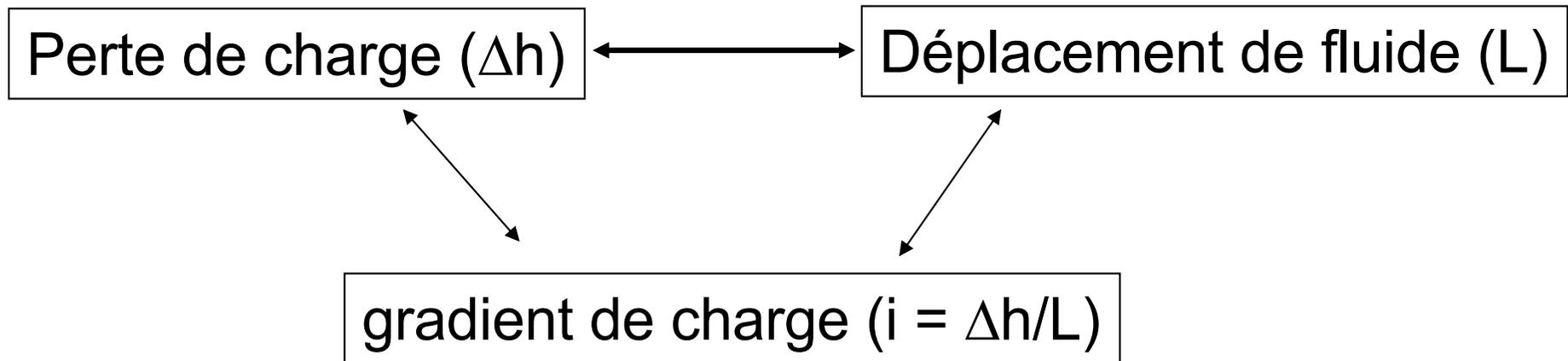
$z$ ,  $P$ , et  $V$  : cote (référence), pression et vitesse de la particule

La **piézométrie** est définie par :  $z + \frac{P}{\rho g}$

Dans le cas des fluides visqueux :

**Déplacement de fluide = perte de charge** (+ transformation d'énergie)

Entre 2 points de l'écoulement A (amont) et B (aval) :  $h_A > h_B$



### En Hydrogéologie :

$z$  est déterminé par rapport à une référence altimétrique, généralement considérée au niveau de la mer = niveau NGF

La pression atmosphérique n'est usuellement pas considérée elle sert de référence aux pressions.

Dans le cas des eaux souterraines, les vitesses sont généralement faibles = énergie cinétique faible

Finalement : charge  $\approx$  piézométrie

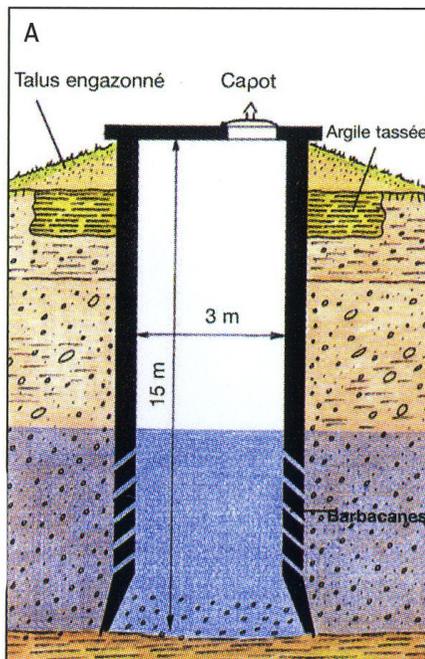
Finalement, la charge, confondue avec la hauteur piézométrique, correspond à la hauteur d'équilibre de l'eau au point considéré de l'espace, c'est à dire à la hauteur à laquelle se stabiliserait l'eau pour se mettre en équilibre avec la pression atmosphérique.

En pratique: niveau piézométrique en 1 point = niveau dans un forage en ce point

= altitude d'une source

Remarque : forage pompé = puits / forage non pompé + piézomètre

A : puits classique en nappe alluviale



*Principaux types d'ouvrages de captage (BRGM, 2009)*



## Définitions :

**Aquifère (nom)** : domaine souterrain perméable et continu qui constitue un gisement d'eau souterraine.

**Aquifère (adjectif)** : qui a la capacité de laisser circuler l'eau.

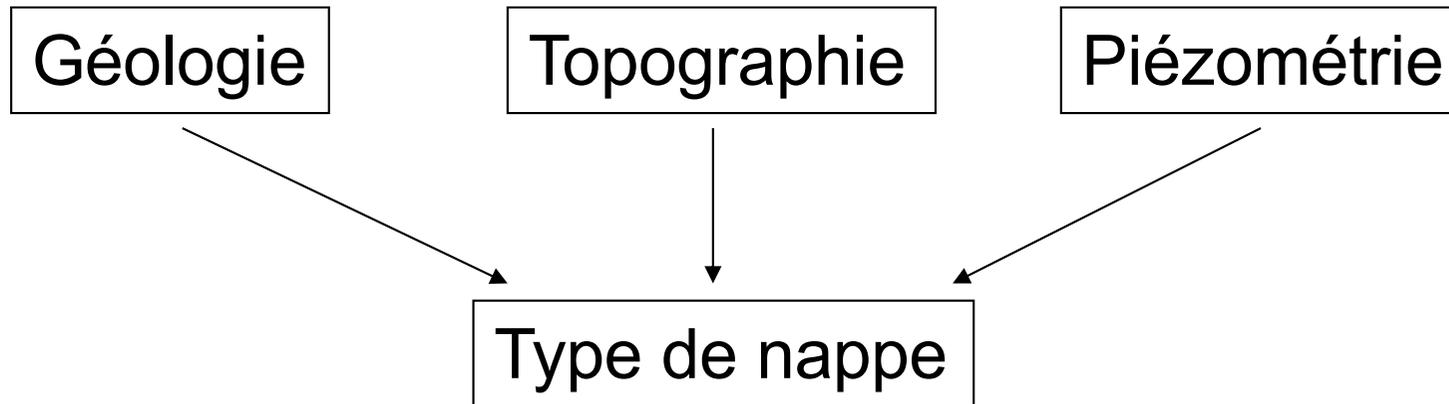
**Nappe d'eau souterraine** : partie saturée de l'aquifère

**Réservoir aquifère** : ensemble rocheux (meuble ou consolidé) qui a des propriétés aquifères

**Aquitard** : formation peu perméable (semi- perméable) capable de fournir de l'eau aux aquifères adjacents à vitesses faibles.

**Aquiclude** : formation imperméable qui peut contenir de l'eau.

## Types de nappes :



## Caractéristiques principales d'un aquifère :

- position spatiale et forme : situation géographique et profondeur (toit/mur)
- nature des limites :
  - perméables (flux ou potentiel imposé)
  - imperméables (flux nul)
- propriétés hydrodynamiques liées à sa structure : roche, fractures...

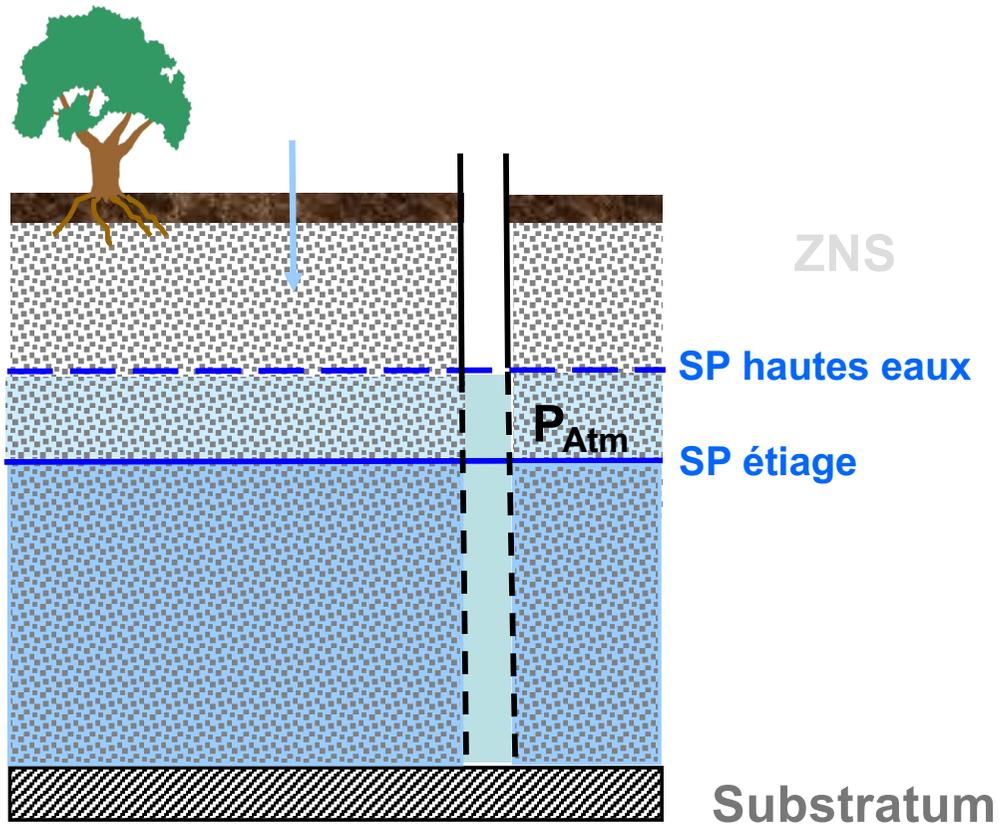
# Principaux paramètres hydrodynamiques

(Isotrope/anisotrope - homogène/hétérogène)

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)	$V_D$	$\text{ms}^{-1}$

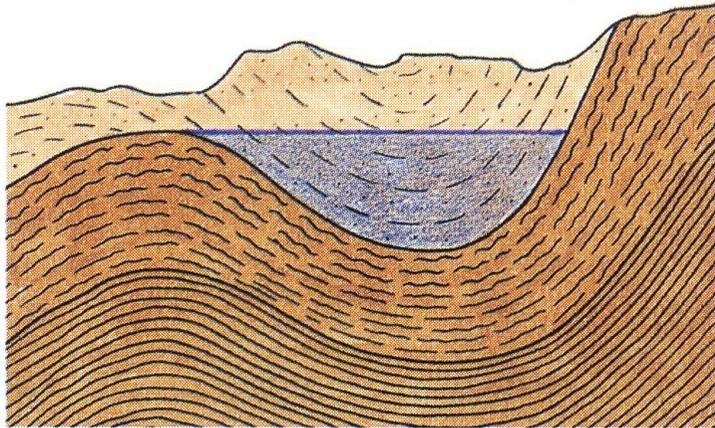
## Types de nappes : nappe libre

terrain perméable, partiellement saturé,  
reposant sur une couche imperméable

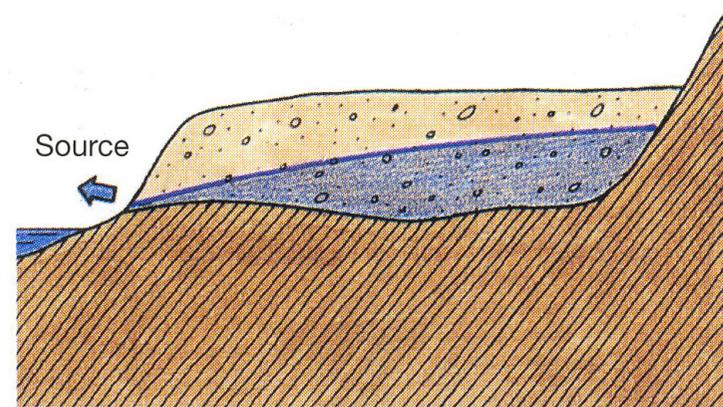


**ZS temporaire :**  
réserves renouvelables

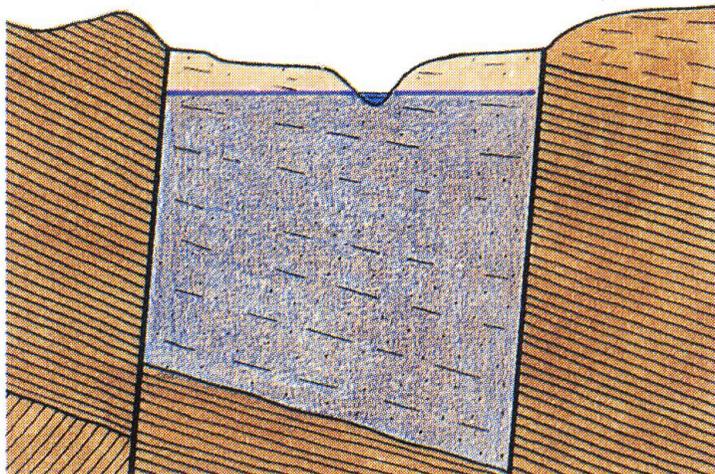
**ZS permanente :**  
réserves permanentes



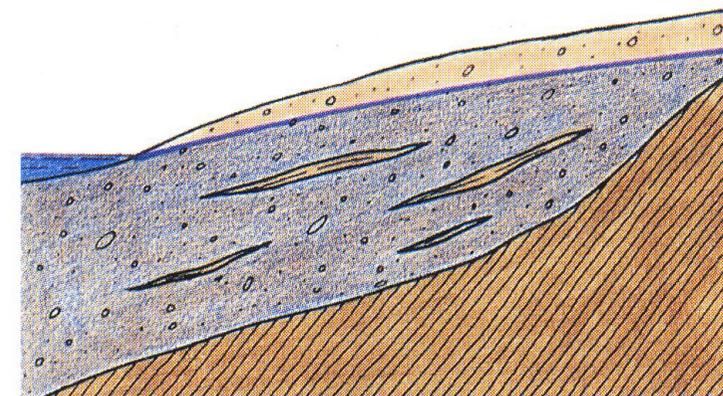
Pli (synclinal)



Terrasse alluviale

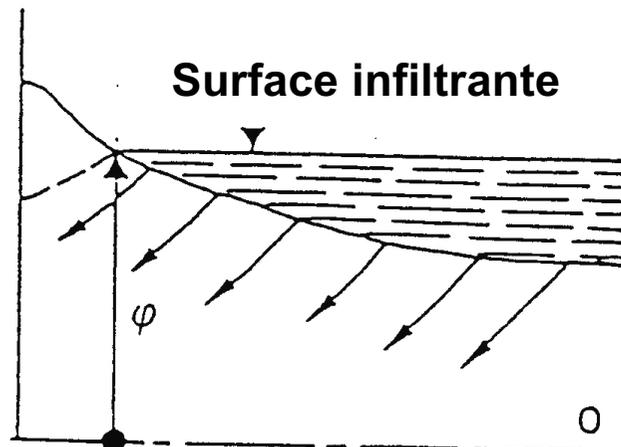
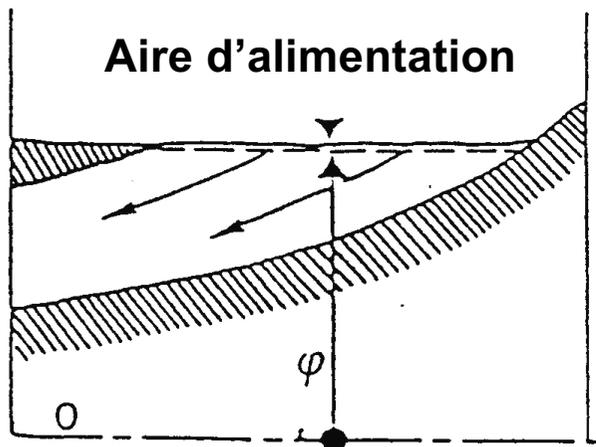
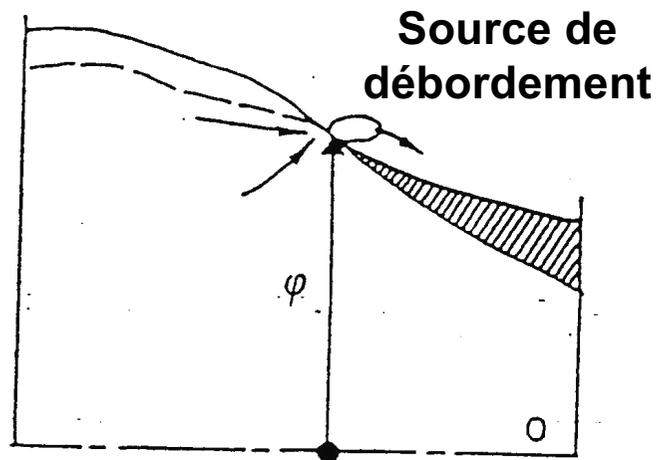
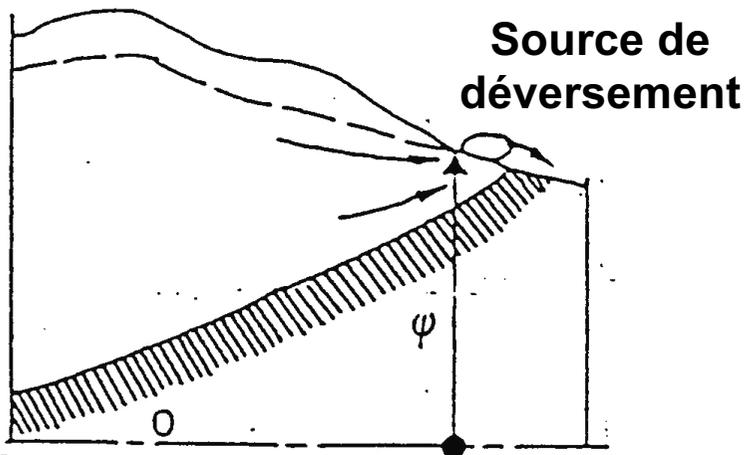
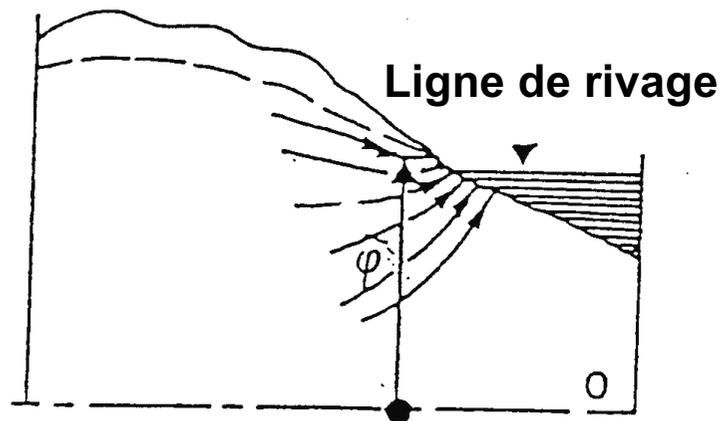
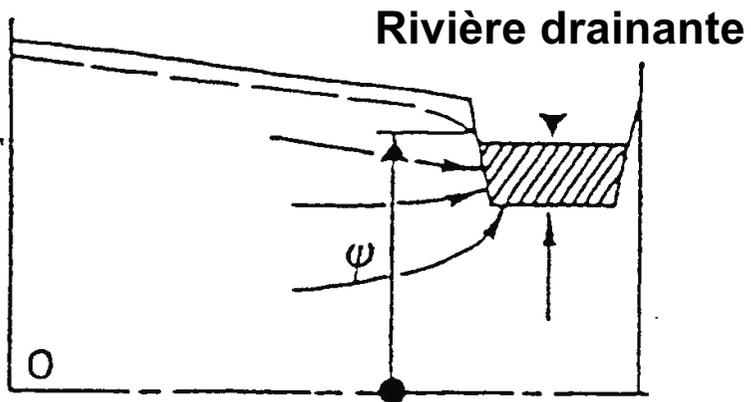


Fossé d'effondrement ou *graben*



Cône de déjection

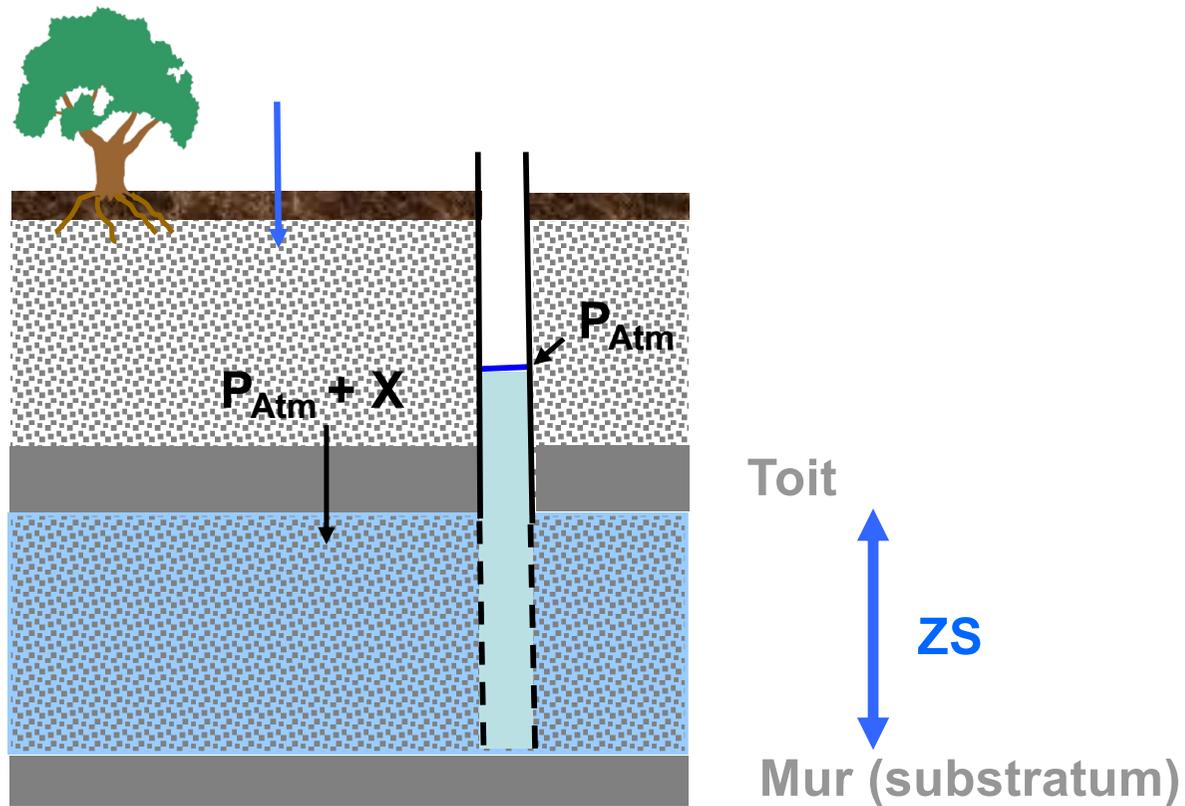
Exemples de structures favorables à la présence de nappes libres (Collin, 2006)

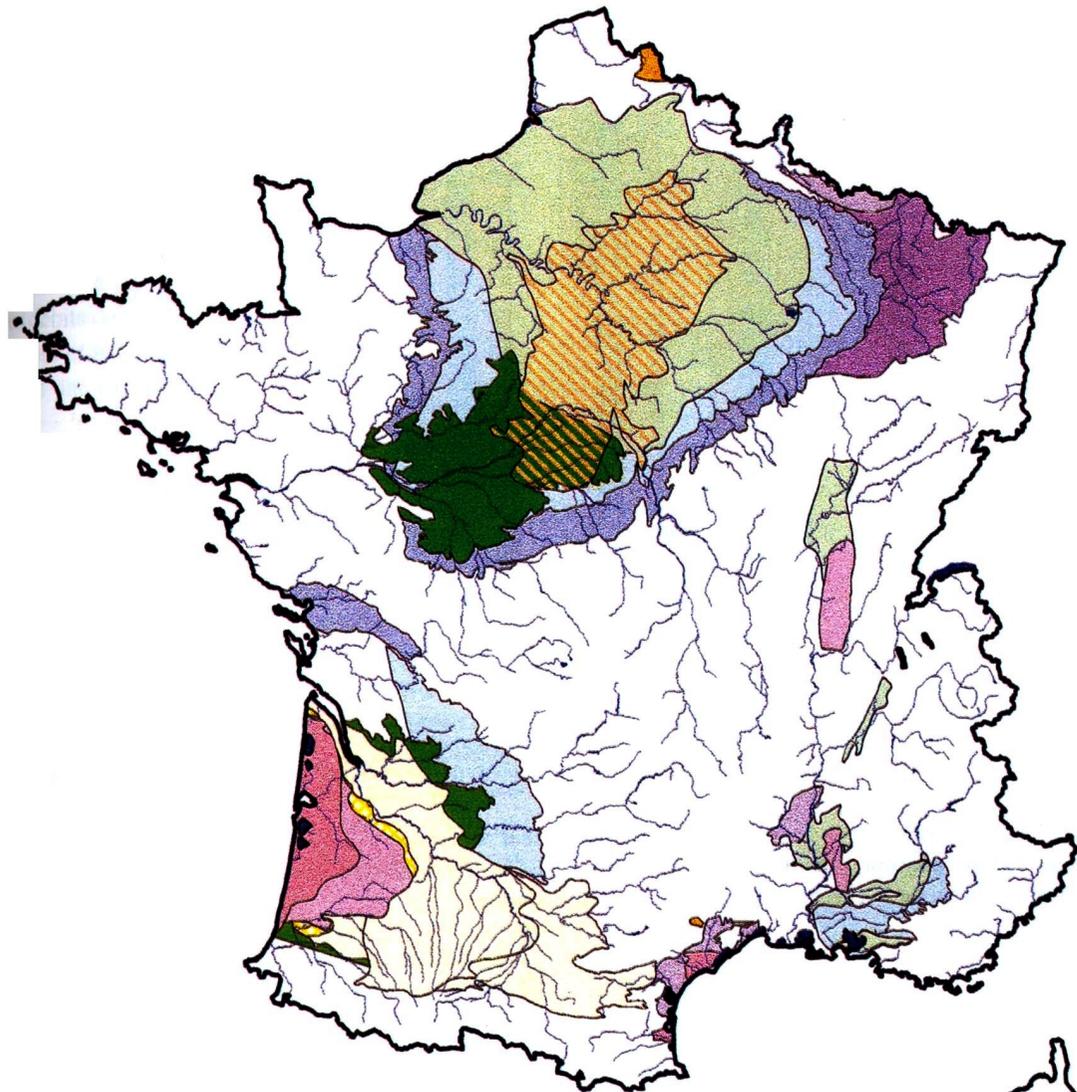


**LIMITES  
A  
POTENTIEL  
IMPOSE**

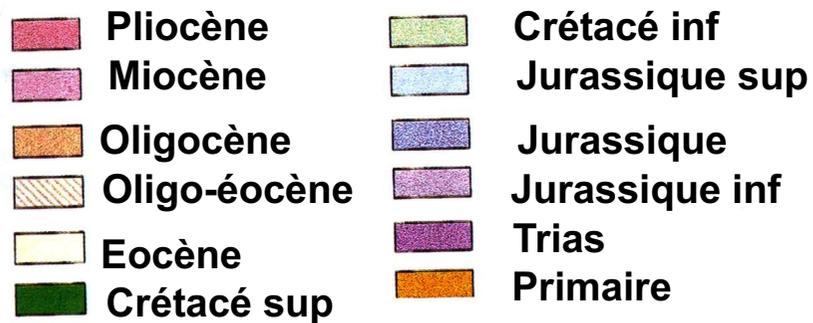
## Types de nappes : nappe captive

terrain perméable, entièrement saturé,  
compris entre 2 couches imperméables (toit et mur)

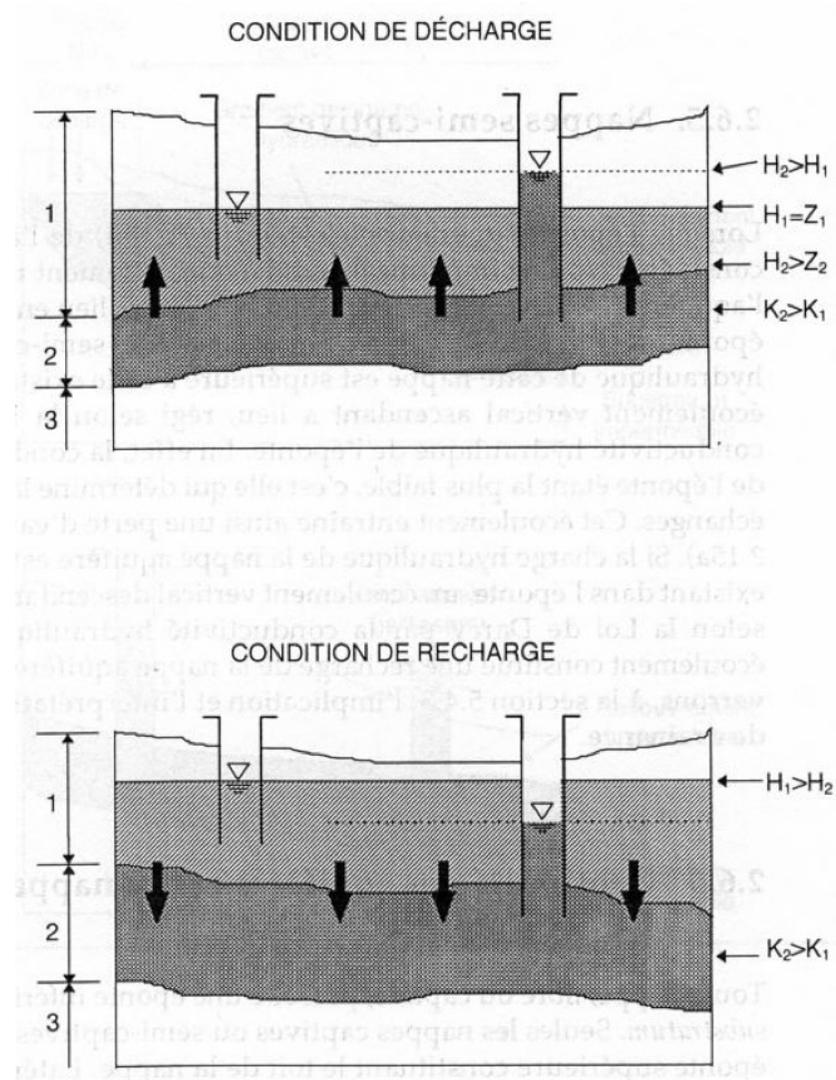




*Principaux aquifères captifs de France (Collin, 2004)*

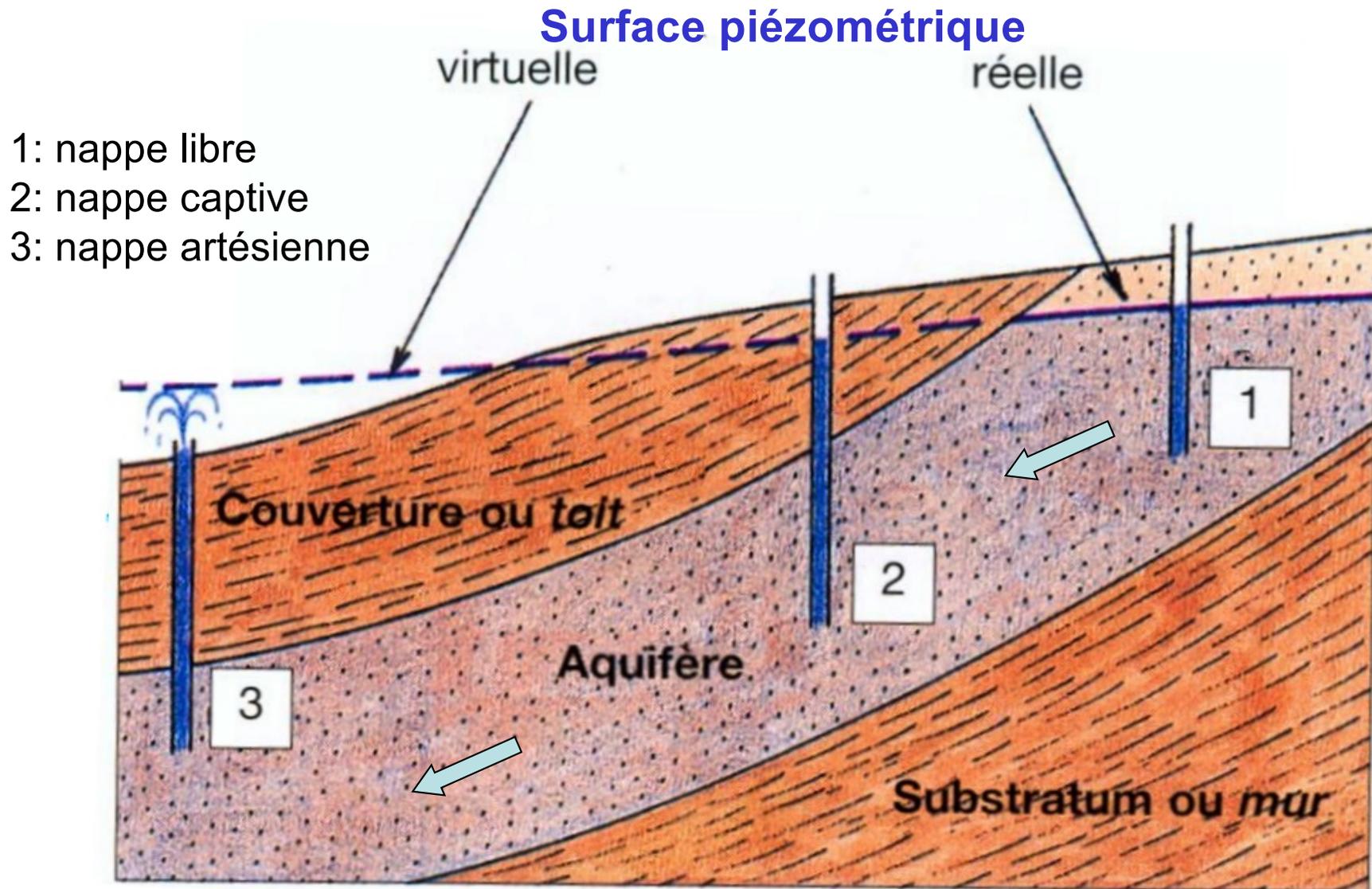


# Types de nappes : nappe semi-captive

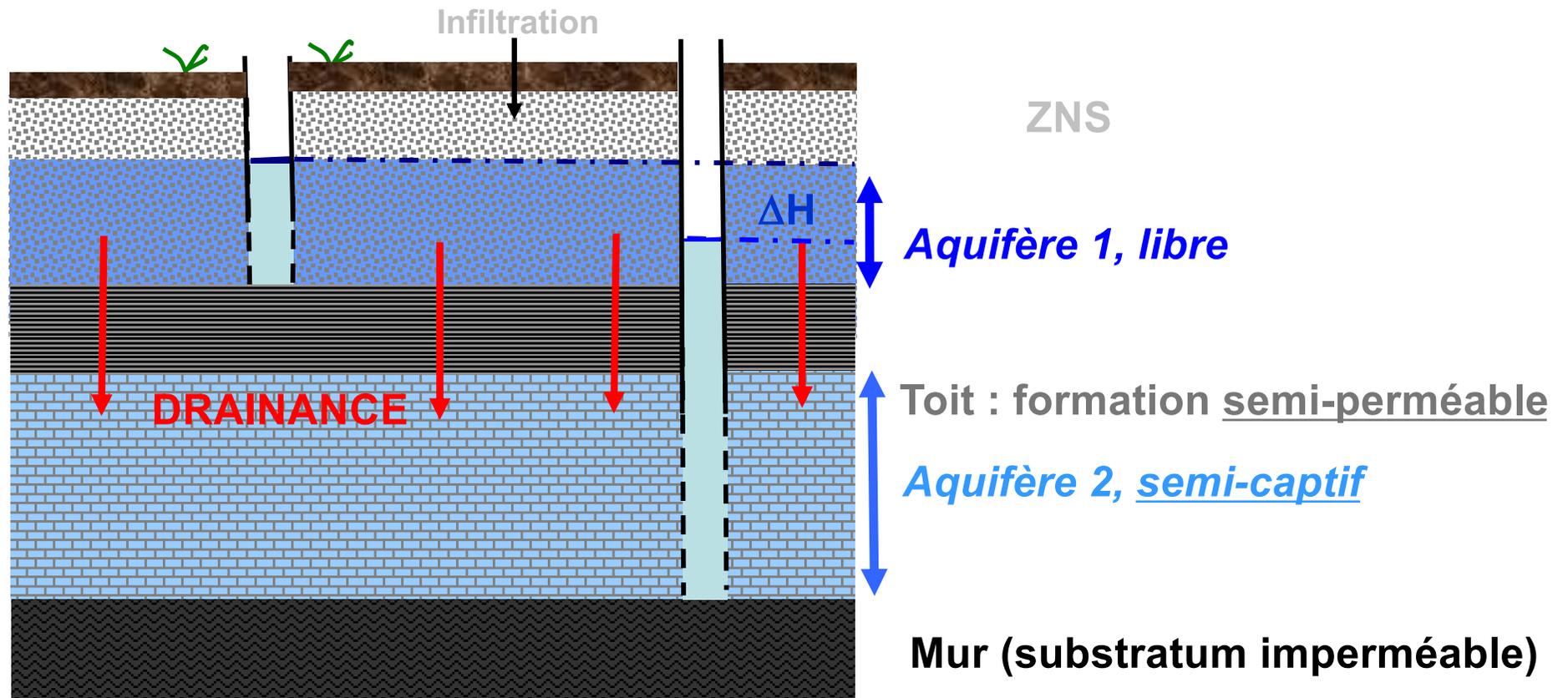


## Types de nappes : nappe mixte

nappe à surface libre, pouvant être localement captive



## Types de nappes : aquifères multi-couches



$$\text{Bilan de nappe : } \Delta S = Q_e - Q_s$$

### **Recharge ( $Q_e$ ) :**

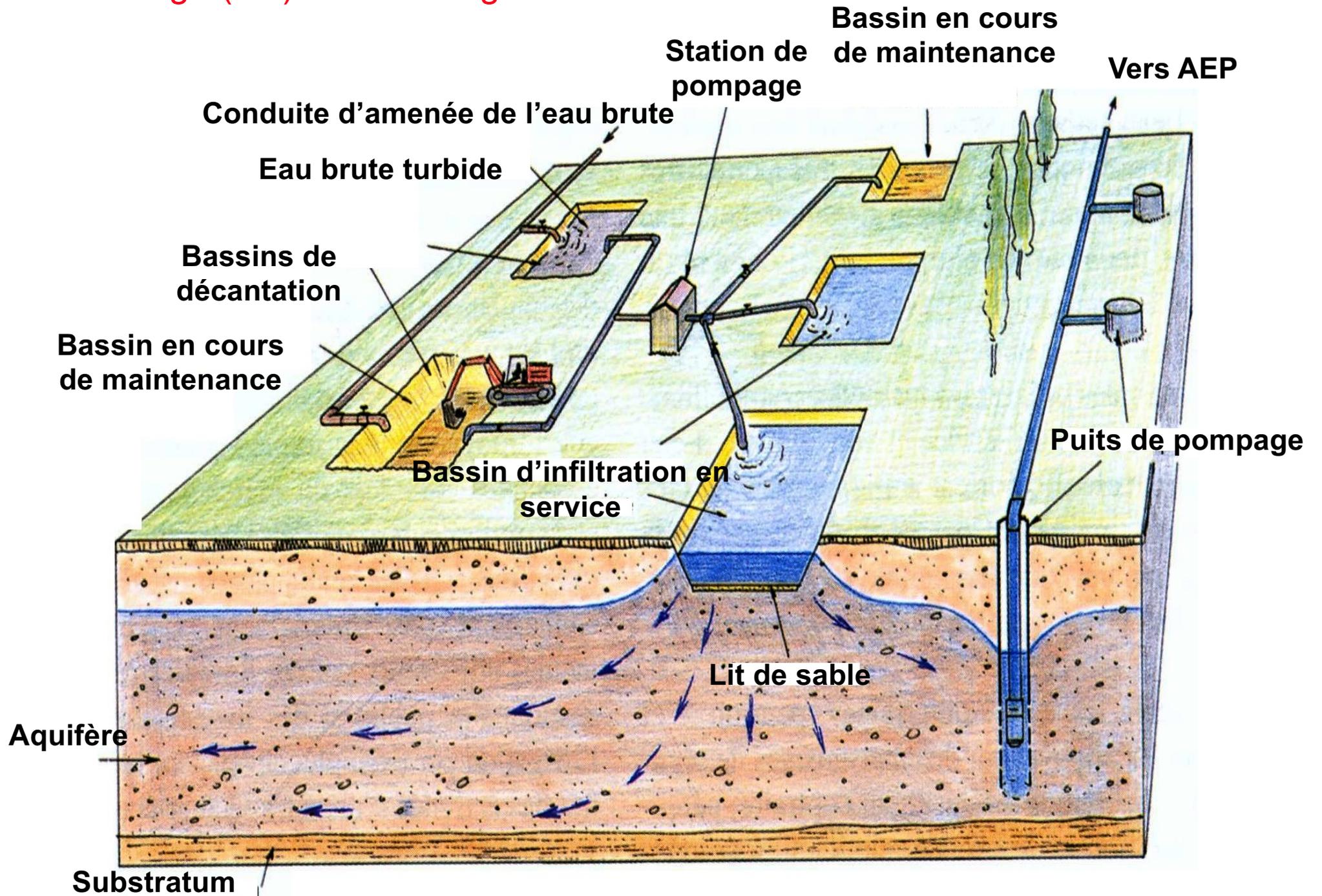
- précipitations / percolation
- aquifères ou aquitards
- échanges nappes rivières/lacs (+): diffus ou localisé
- recharge artificielle

### **Vidange ( $Q_s$ ) :**

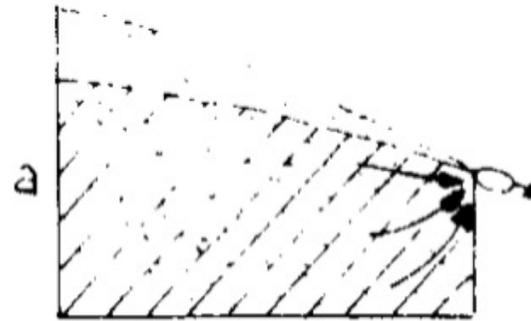
- évapotranspiration
  - sources pérennes ou temporaires
  - échanges nappes rivières/lacs (-)
  - prélèvements = exutoires artificiels
- | Exutoires naturels



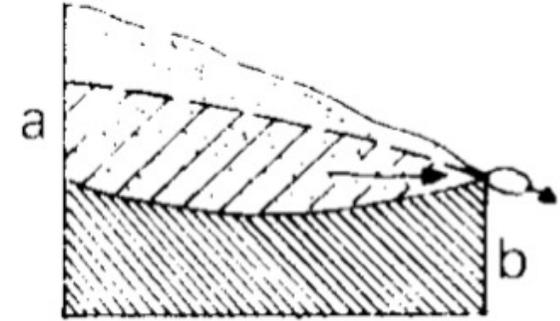
# Recharge (Qe) : La recharge artificielle



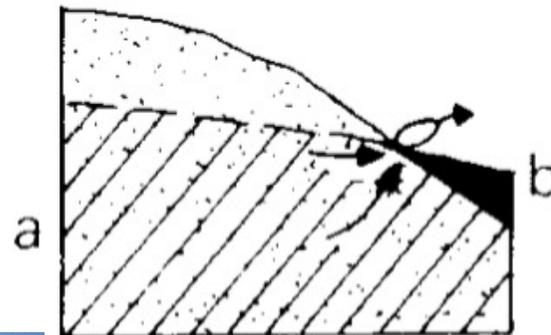
## Vidange (Qs) : Les sources



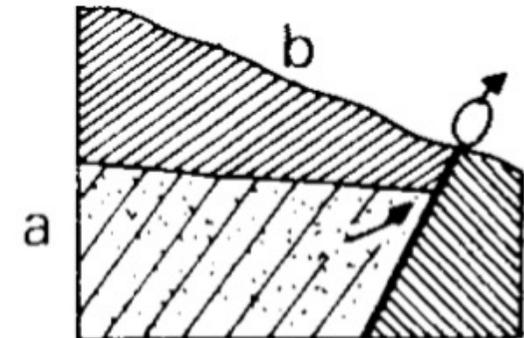
émergence



déversement



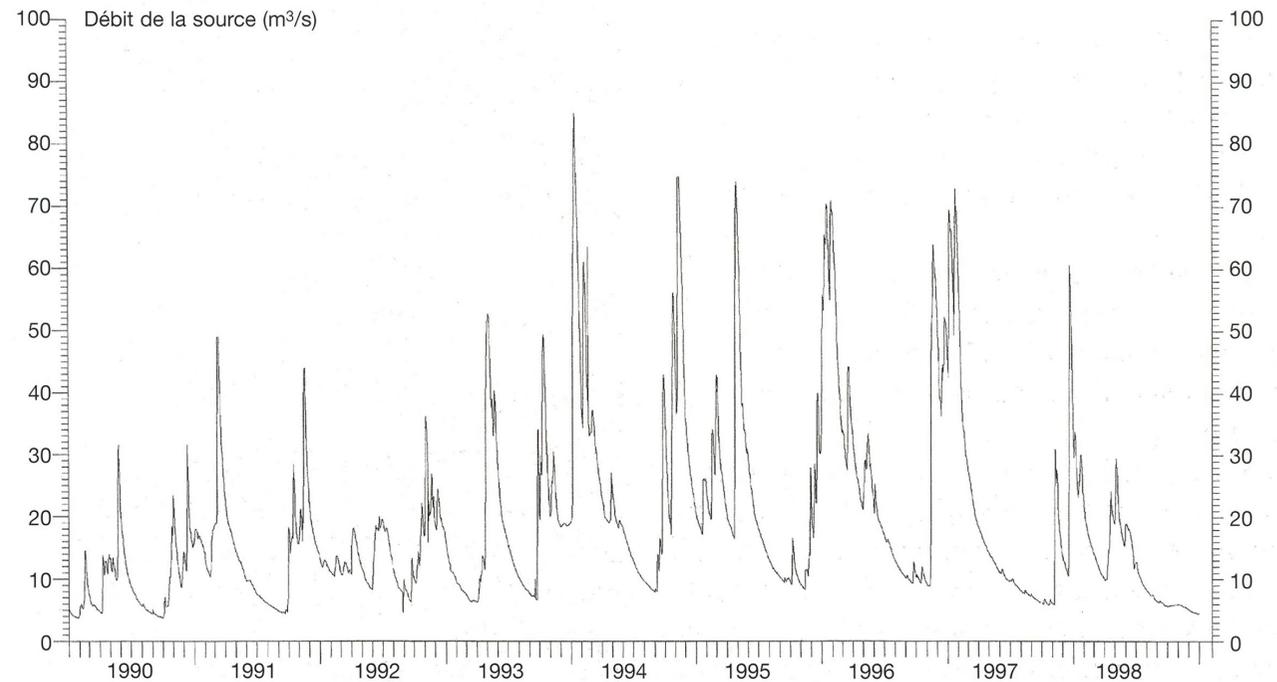
débordement



artésienne



## Vidange (Qs) : Les sources



*Variation de débit à la Fontaine de Vaucluse (Collin, 2006)*

Phase de tarissement

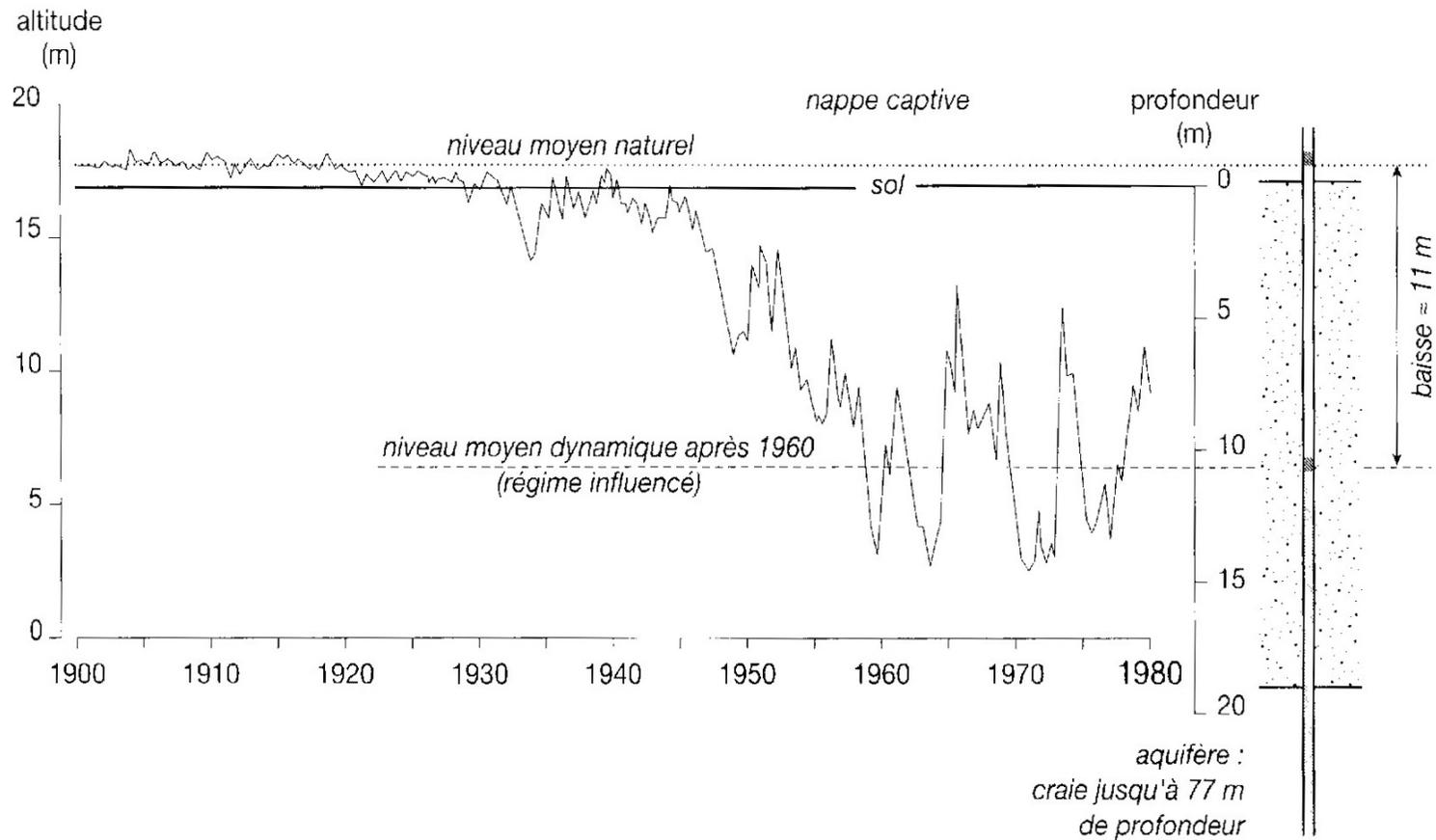
Loi de Maillet :  $Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$

Avec :  $Q_t$  : débit au temps  $t$

$Q_0$  : débit au temps 0 pris comme origine du tarissement

$\alpha$  : coefficient de tarissement

## Vidange (Qs) : prélèvements



*Niveau moyen dynamique de la nappe d'Artois à Rieulay, Nord (source INSEE 1985 in Cosandey, 2000)*

## Types d'aquifères

- poreux : roches sédimentaires (sables, alluvions...)
- fissurés : roches magmatiques, métamorphiques
- karstiques (calcaires, dolomies, craies...)

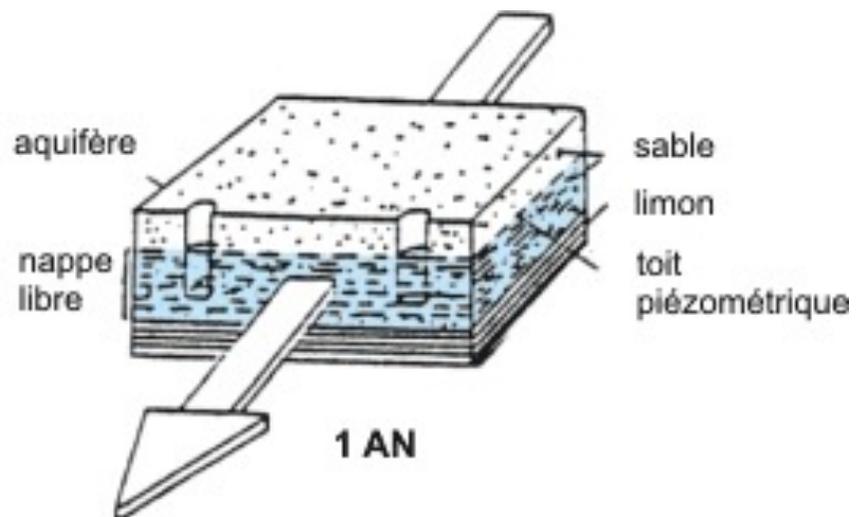
## Environnements hydrogéologiques

- Le socle fissuré (granitique)
- Les plaines alluviales
- Les systèmes karstiques
- Les aquifères littoraux
- Les ensembles volcaniques
- Les bassins sédimentaires

## MILIEU POREUX



Hétérogène à grande échelle  
Homogène à petite échelle

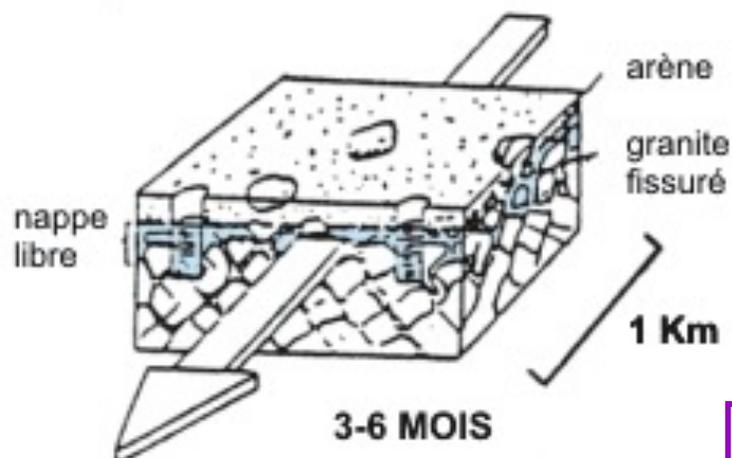


Perméabilité d'interstices  
Milieu homogène  
Ecoulement lent  
et régulier (m/an)  
Bonne capacité de filtration

## MILIEU FISSURE



Hétérogène à grande échelle  
Homogène à petite échelle

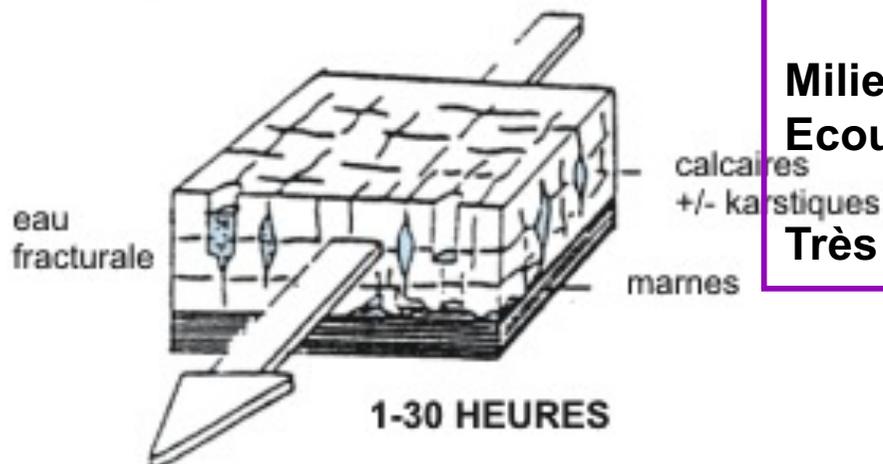


Perméabilité de fissures  
et de chenaux  
Milieu hétérogène  
Ecoulement rapide  
et turbulent (km/jour)  
Très faible capacité de filtration

## MILIEU KARSTIQUE

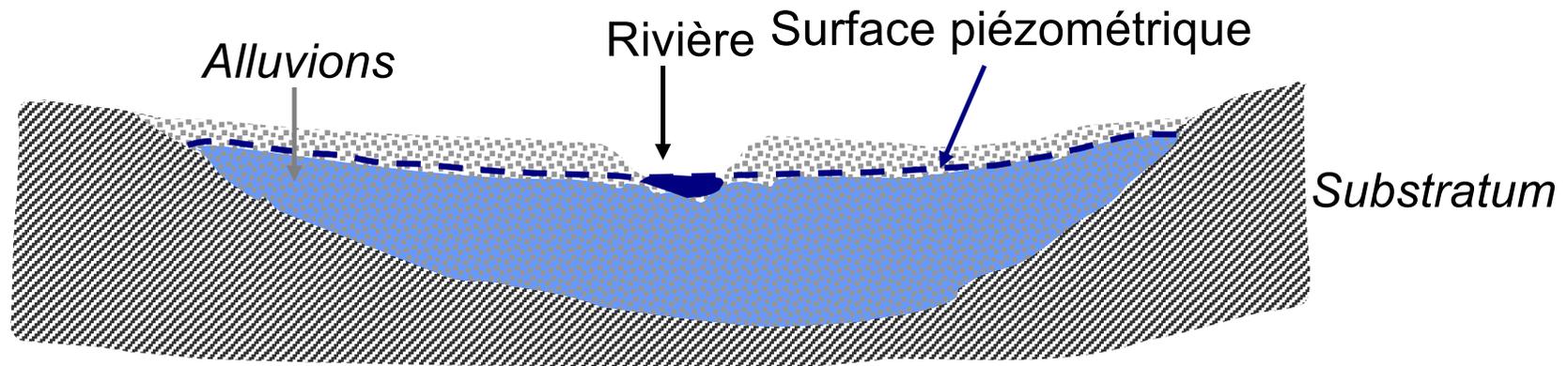


Hétérogène quelle que  
soit l'échelle



# La nappe alluviale

---



**Nappe alluviale libre** : relation nappe rivière. 2 cas possibles:

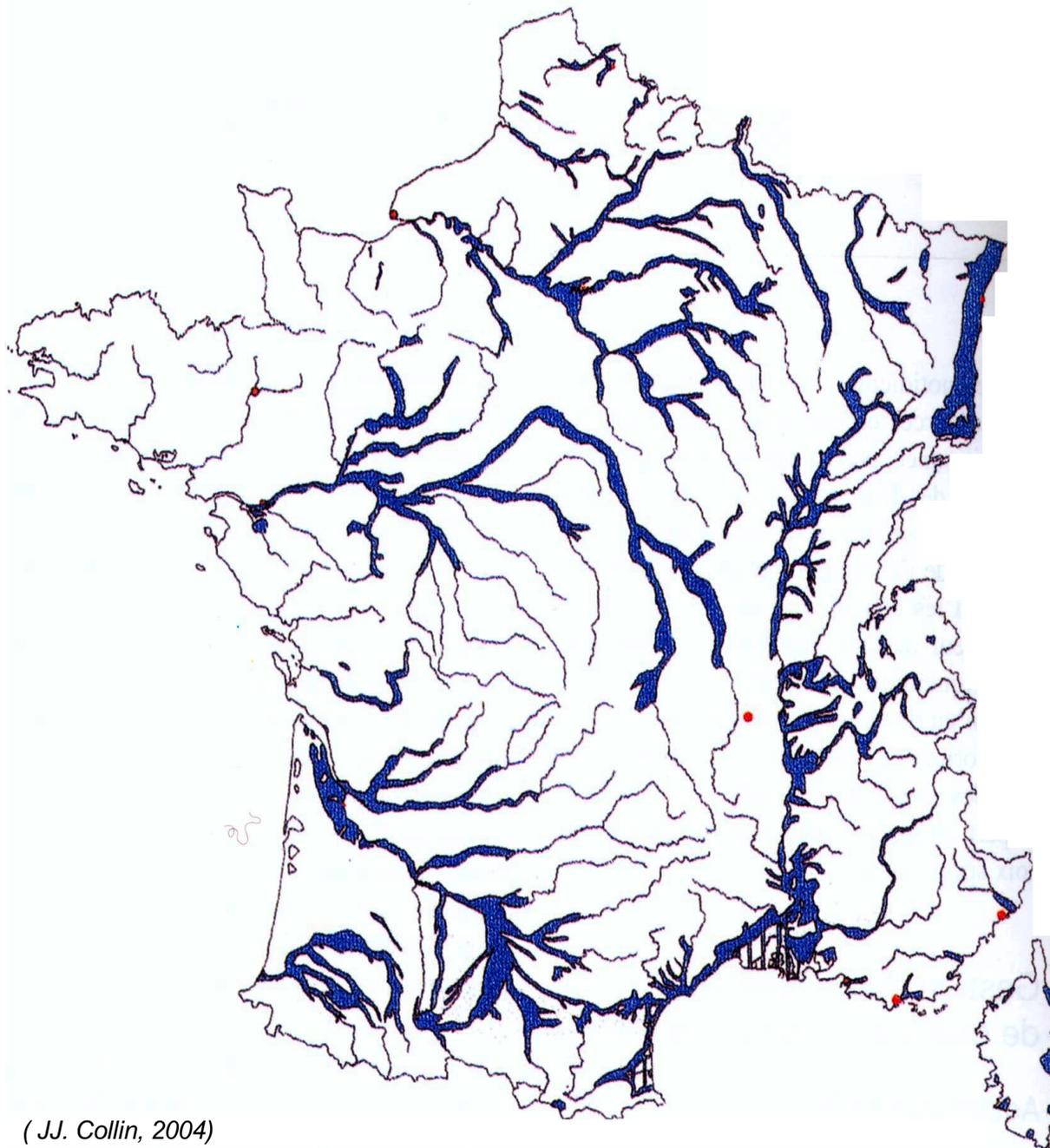
- la rivière alimente la nappe,
- la nappe alimente la rivière (la rivière draine la nappe)

**Nappe alluviale captive** : 2 scénarii

- aucun lien entre la nappe et la rivière
- niveau perméable creusé par la rivière et relation nappe-rivière

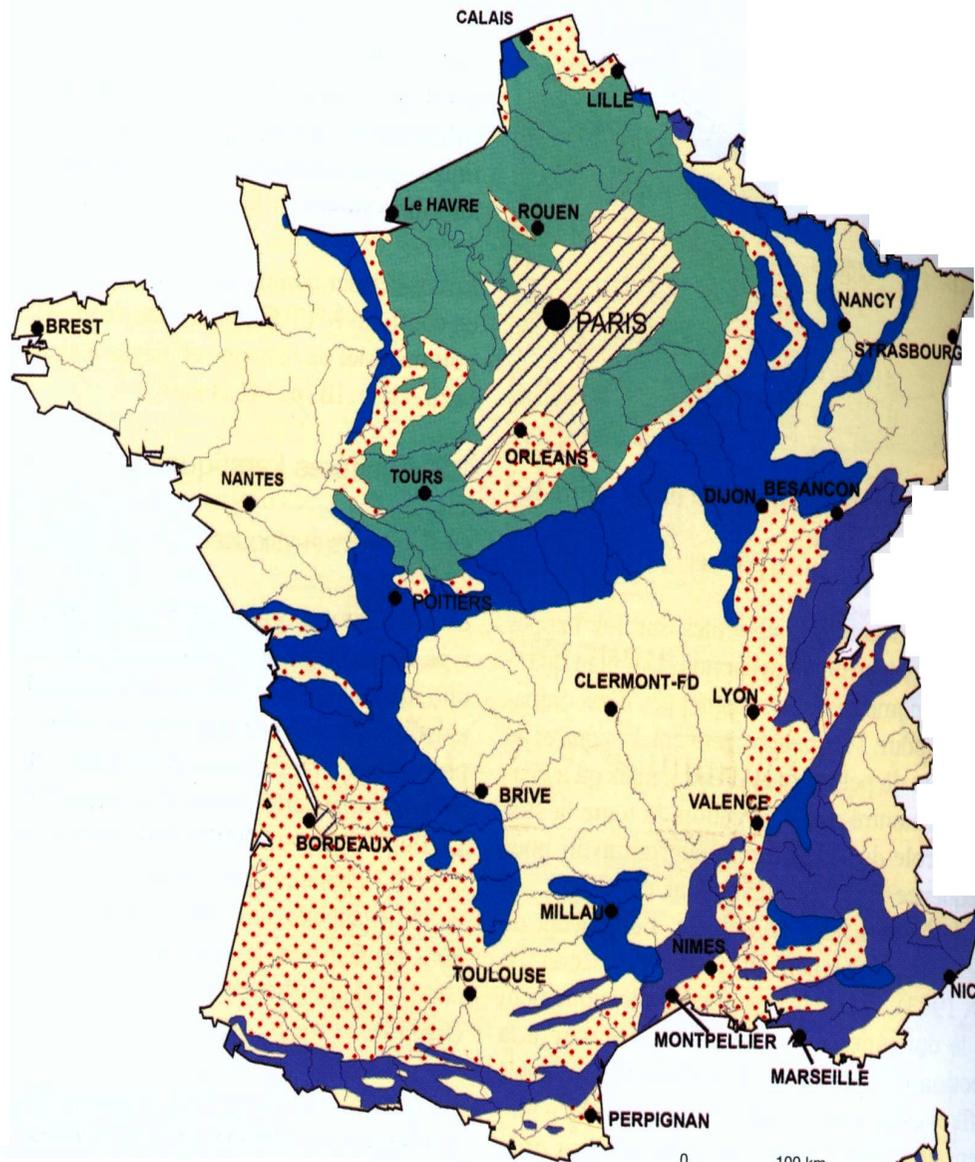
# Carte hydrogéologique des nappes alluviales de France

---



( JJ. Collin, 2004)

# Carte hydrogéologique des formations carbonatées karstifiables de France (d'après B. Marsaud)



## DOMAINES AVEC FORMATIONS CARBONATEES

-  Formations plissées et fortement tectonisées
-  Formations tabulaires faiblement tectonisées
-  Formations à forte porosité primaire (craie...)
-  Formations partiellement carbonatées
-  Formations sous couverture

## DOMAINES SANS FORMATIONS CARBONATEES NOTABLES



**World Karst Aquifer Map (draft)**

Zhao Chen, Augusto Auler, Michel Bakalowicz, David Drew, Franziska Griger, Jens Hartmann, Guanghui Jiang, Nils Moosdorf, Andrea Richits, Zoran Stevanovic, George Veni & Nico Goldscheider  
 Corresponding author: zhao.chen@kit.edu / project leader: nico.goldscheider@kit.edu

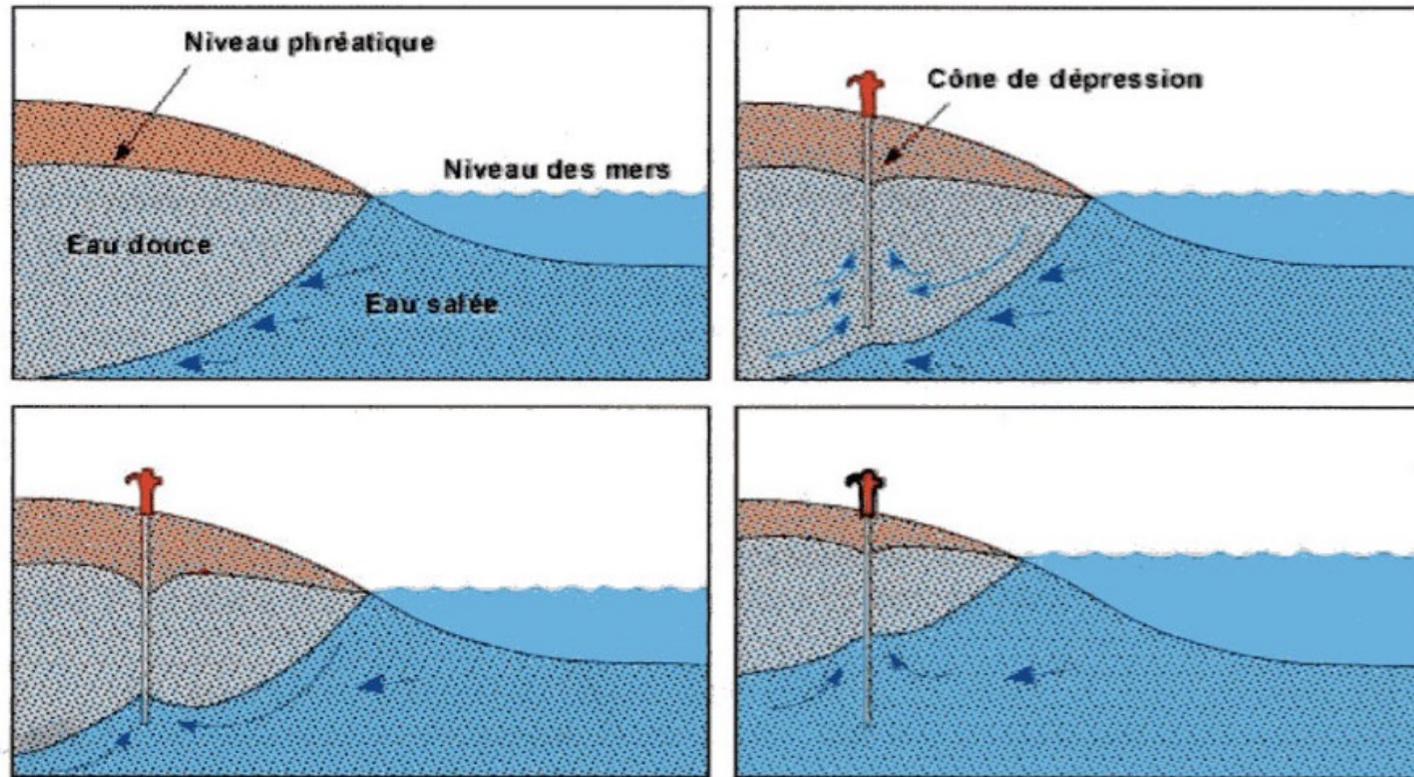


# Carte hydrogéologique des formations carbonatées karstifiables d'Afrique

*(carte à paraître)*

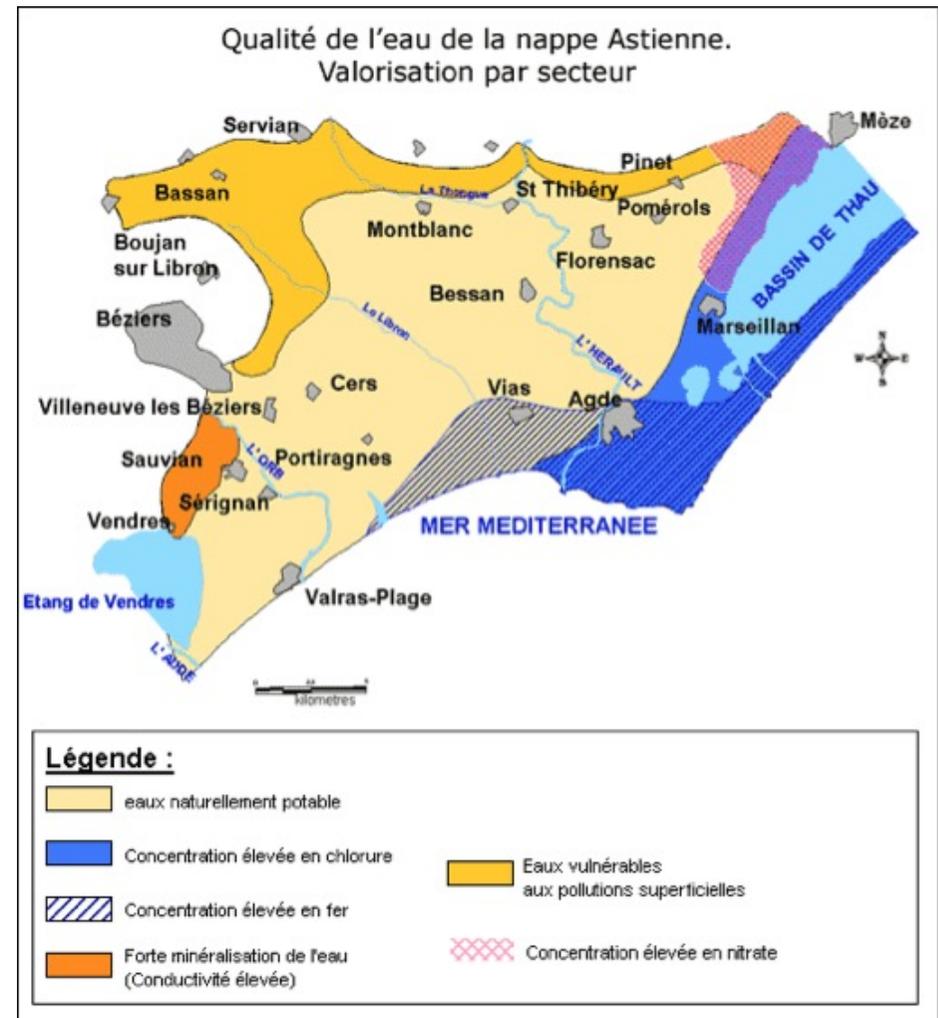
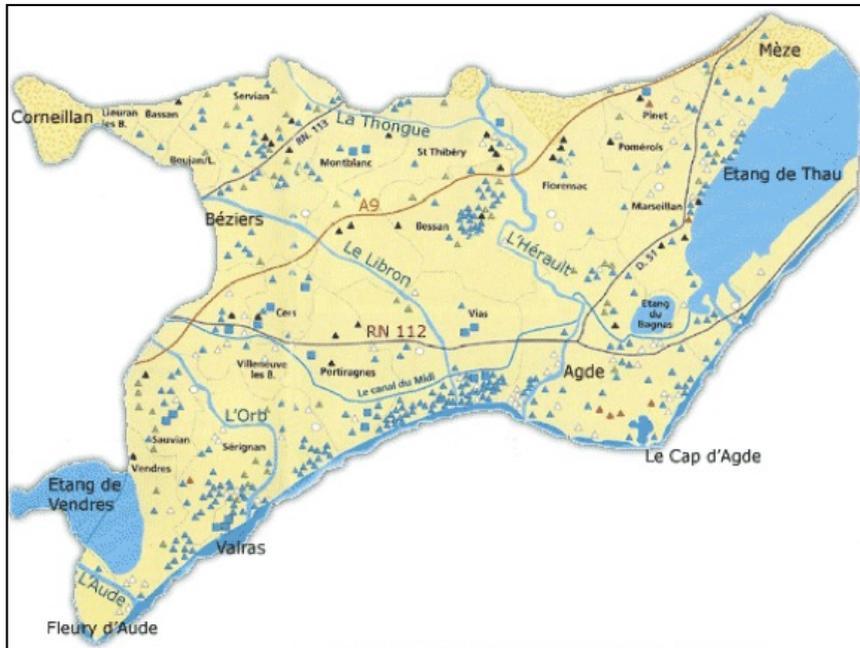
 **ROCHES CARBONATEES +/- KARST**

## Environnements hydrogéologiques : Les aquifères littoraux « biseau salé » et up-coning



Remarque : la position de l'interface eau douce/eau salée est donnée par la Loi de Ghyben-Herzberg

# Environnements hydrogéologiques : Les aquifères littoraux



*Exemple : la nappe astienne au sud de Béziers (34)*

# **4- niveaux piézométriques et cartes piézométriques**

# Variations temporelles de la piézométrie en 1 point

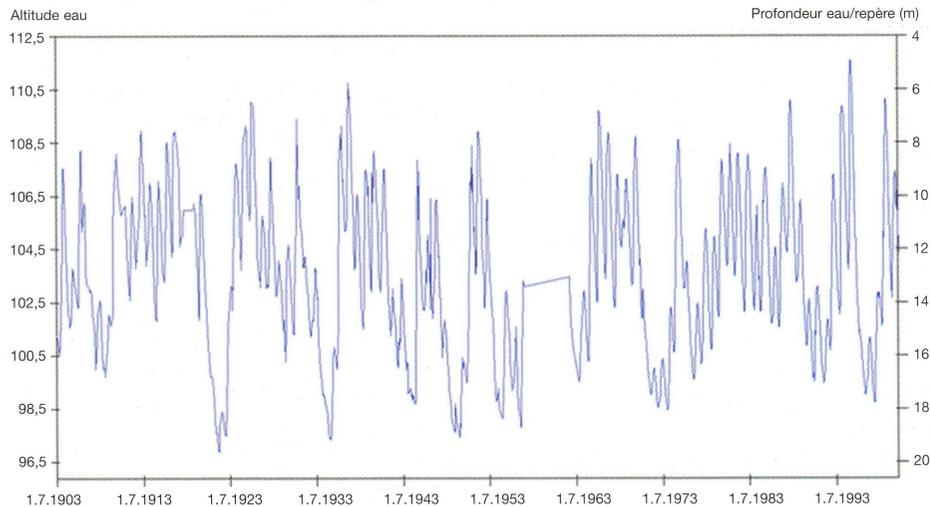
Mesure : - mesure manuelle ponctuelle  
- sonde de pression fixe (pas de mesure)

→ graphe : piézométrie =  $f(t)$  appelée « chronique piézométrique »

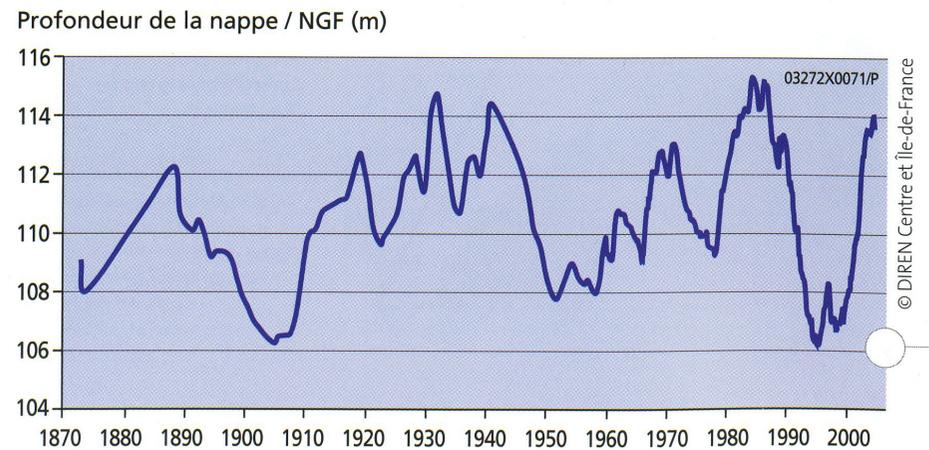


Réseau : RB  
Prof. ouvrage : 30  
Cote du repère : 116.5  
Cote du sol : 116.5  
Code nappe : ART02,.....+L  
Système aquifère : 001G  
Nom nappe : Craie 1 - Nappe de la craie

Indice BRGM : 00254X0003  
Désignation : P1  
Commune : Tincques  
Lieu-dit : Station SNCF  
Département : Pas-de-Calais (62)  
Région : SGR/NPC



Exemple de chronique piézométrique de longue durée (Collin, 2006)



Fluctuations piézométriques de la nappe de Beauce à la sucrerie de Toury (BRGM, 2009)

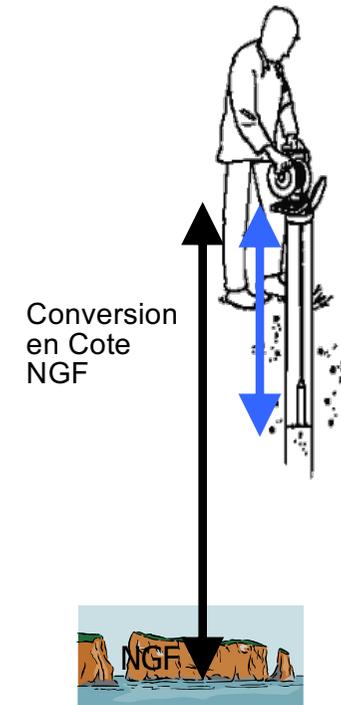
# Mesures piézométriques



Mesure piézométrique  
manuelle en nappe libre  
Egypte

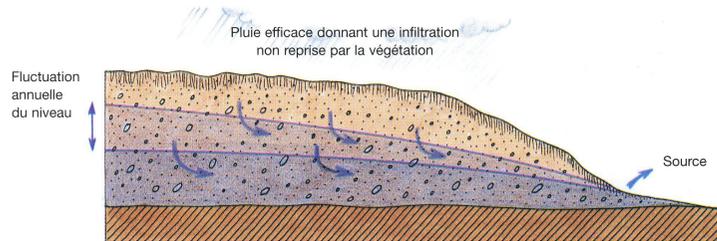


Mesure piézométrique  
manuelle en nappe  
artésienne  
Indonésie

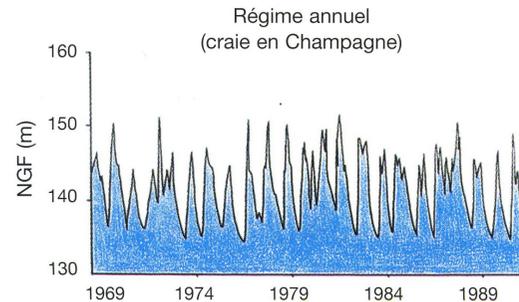


Conversion  
en Cote  
NGF

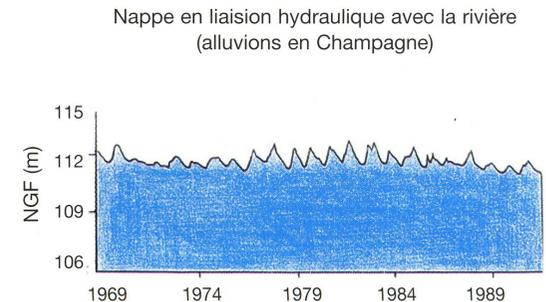
# Variations temporelles de la piézométrie en 1 point : Effets de la recharge naturelle



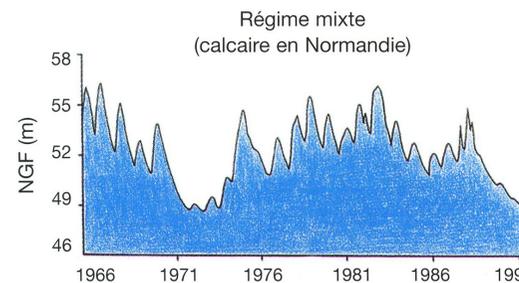
*Effet de la recharge par les pluies sur la piézométrie et sur le débit des sources (Collin, 2006)*



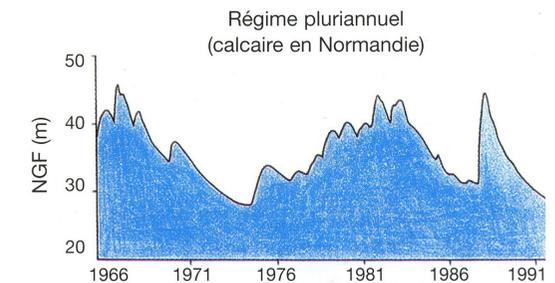
Des recharges de même ordre, néanmoins non identiques, se produisent presque tous les ans.



Les fluctuations imposées par le régime du cours d'eau se propagent dans la nappe, qui reste néanmoins toujours très proche du niveau des eaux de surface qui les soutiennent.



Ce régime peut résulter de la superposition d'une périodicité annuelle assez régulière et d'une tendance pluriannuelle aperiodique, c'est-à-dire que l'on observe une alternance de séquences pluriannuelles déficitaires et excédentaires.

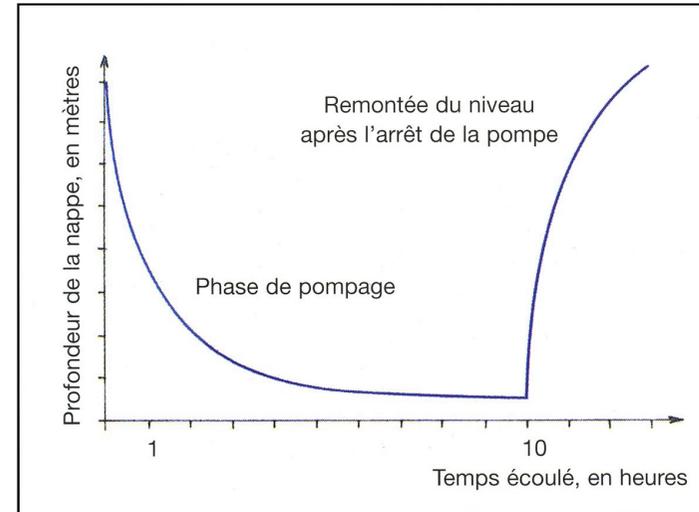


Apériodique et irrégulière, l'amplitude pluriannuelle, sur 10 ou 20 ans, est nettement plus grande que les amplitudes annuelles, parfois nulles. Des recharges exceptionnelles, de fréquence annuelle faible, structurent la périodicité.

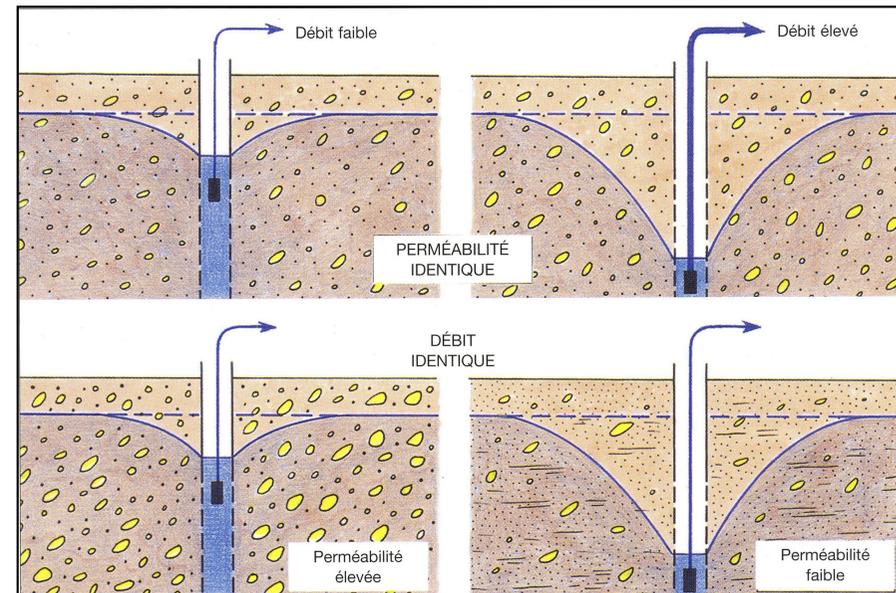
*Différents régimes de fluctuation naturelle des nappes (Collin, 2006)*

# Variations temporelles de la piézométrie en 1 point : Effets des pompages

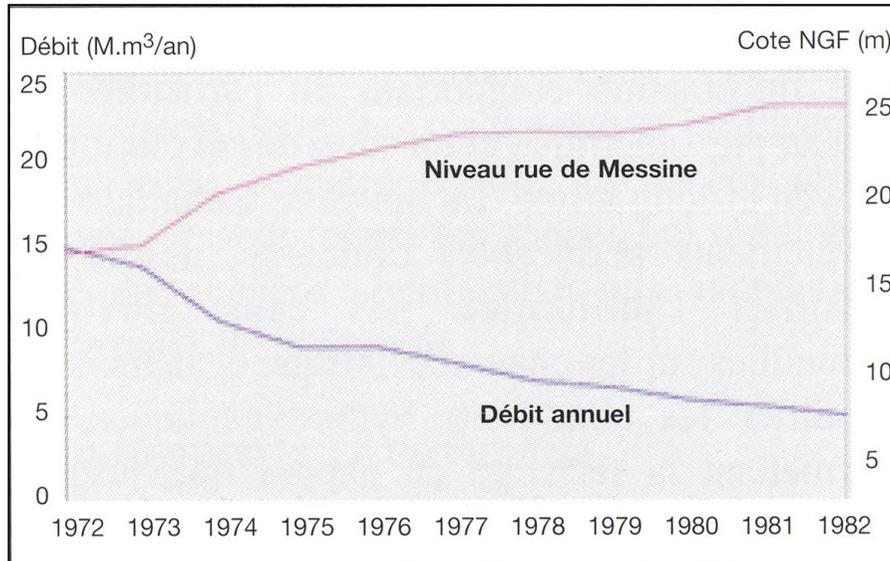
*Abaissement du niveau d'une nappe soumise à un pompage à débit constant et remontée après son arrêt (Collin, 2006)*



*Effet du débit pompé et de la nature du terrain sur le cône de rabattement (Collin, 2006)*

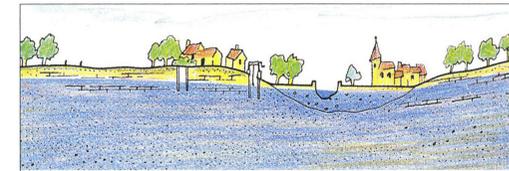


# Variations temporelles de la piézométrie en 1 point : Effets de l'arrêt des pompages

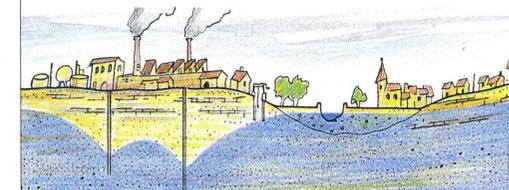


*Remontée de nappe consécutive à la diminution des pompages en ville de Paris (in Collin, 2006)*

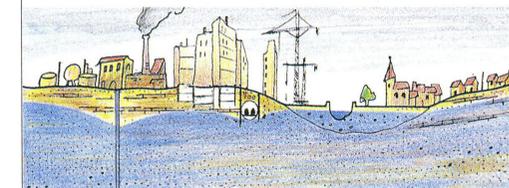
*Remontée des nappes en zone urbaine (Collin, 2006)*



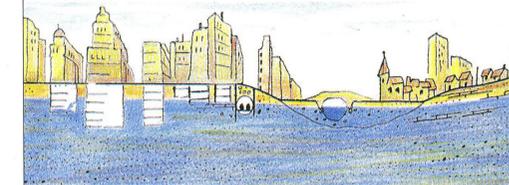
Avant l'ère industrielle, les prélèvements sont négligeables (puits domestiques). La nappe est drainée par le fleuve, elle est partout plus haute que l'eau de surface.



L'industrie lourde est active à proximité des grandes villes. La nappe est fortement déprimée par les pompages.

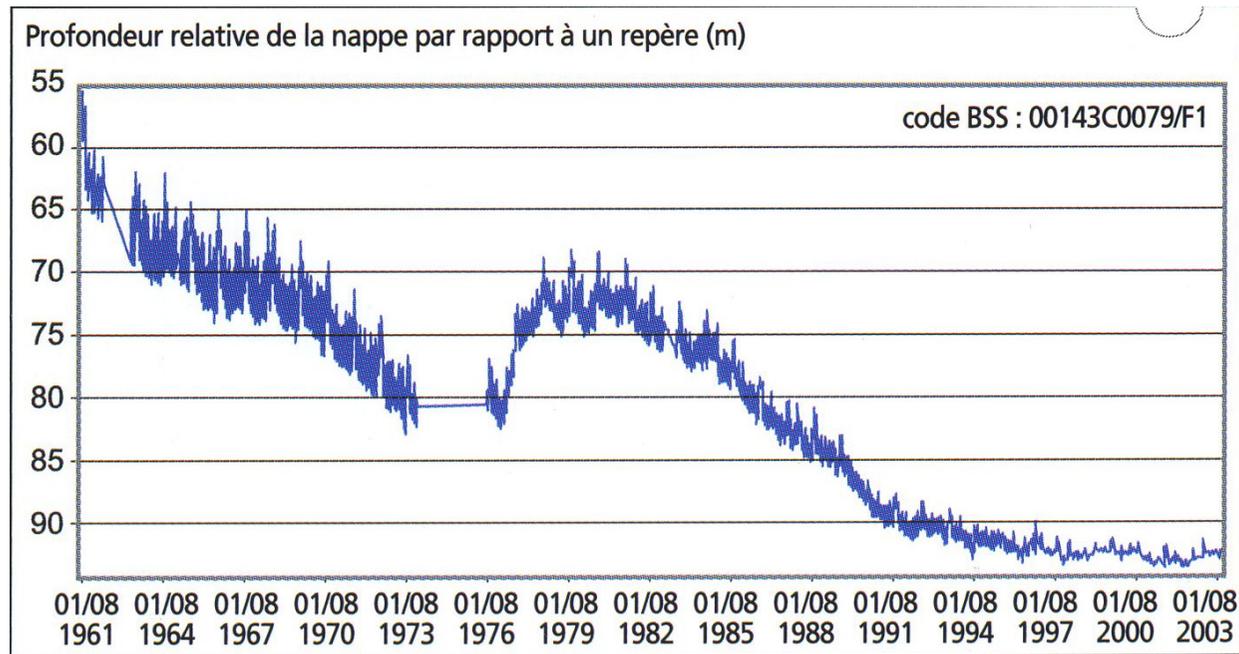


Les pompages pour dénoyage des grands travaux prennent le relais des pompages industriels, qui sont peu à peu interrompus. La nappe est encore déprimée.



Avec l'arrêt quasi total des prélèvements, la nappe a repris sa surface initiale, noyant ou menaçant de déstabiliser les constructions souterraines qui n'ont pas été conçues en fonction de ce phénomène.

## Variations temporelles de la piézométrie en 1 point : Effets combinés des pompages et de la recharge naturelle



*Variations piézométriques des calcaires carbonifères à Bondues (BRGM, 2009)*

Variations temporelles de la piézométrie en 1 point :  
Effets combinés des pompages et de la recharge naturelle



# Variations spatiales de la piézométrie à un moment donné

Mesure : - mesure manuelle dans les forages dans une période courte et météorologiquement stable (dans une même nappe)

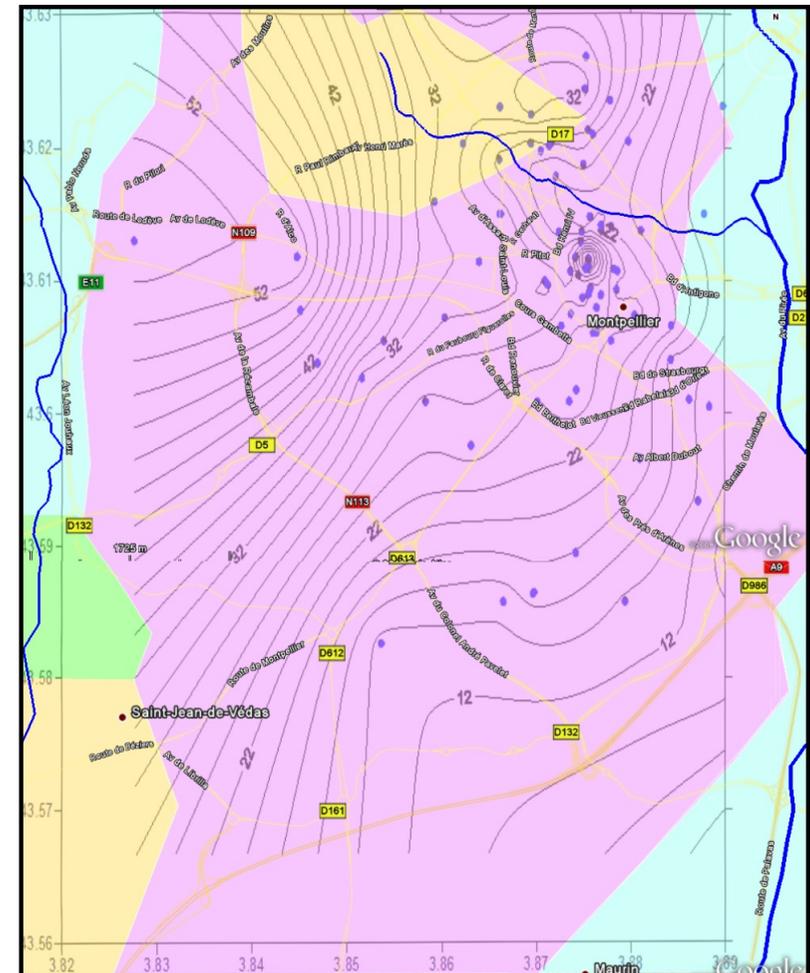
→ tableau : piézométrie =  $f(x,y)$

→ « carte piézométrique »

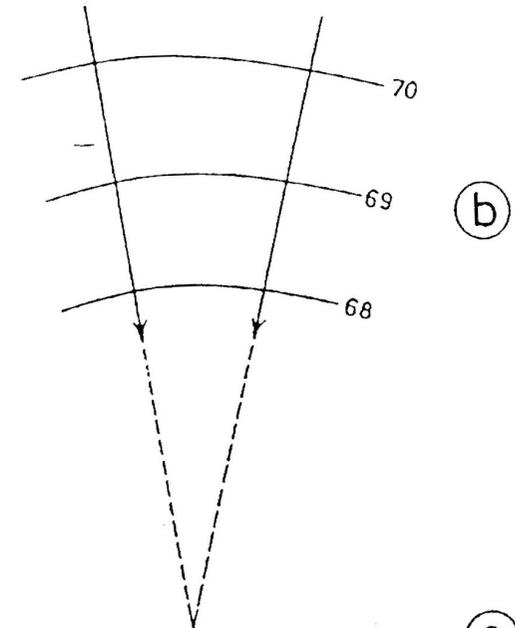
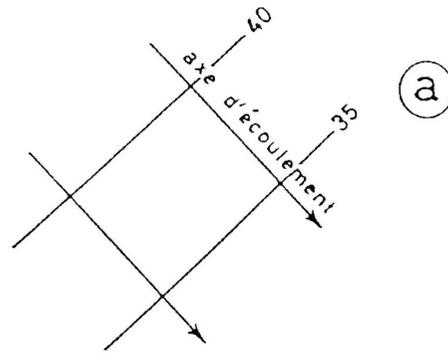


Mesure piézo,  
Egypte 2019

Carte piézométrique de  
la nappe astienne de  
Montpellier, Mai 2010  
(HSM, 2010)



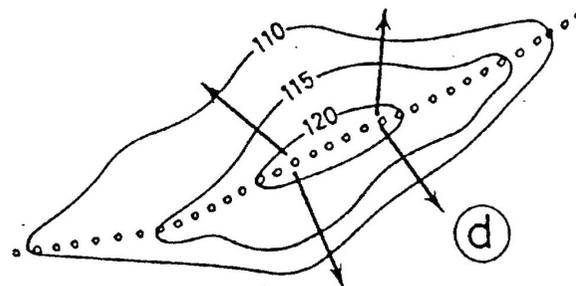
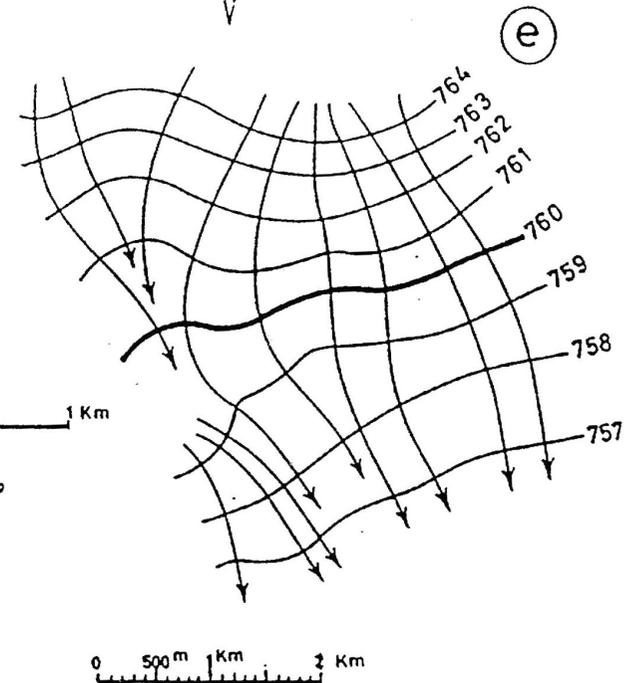
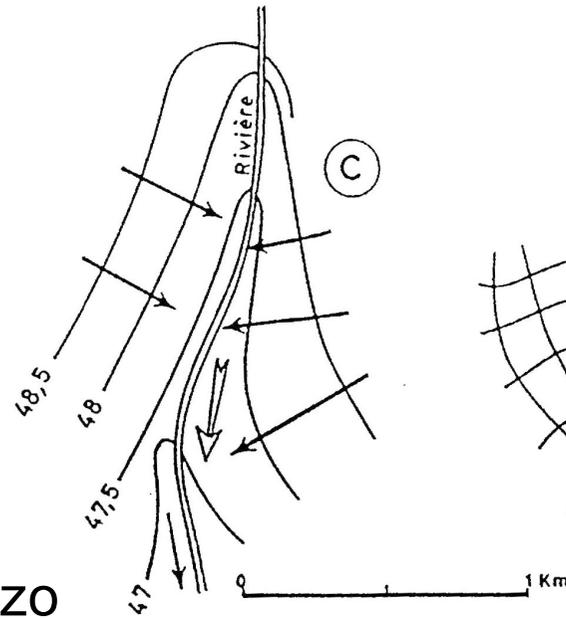
# Interprétation des cartes piézométriques



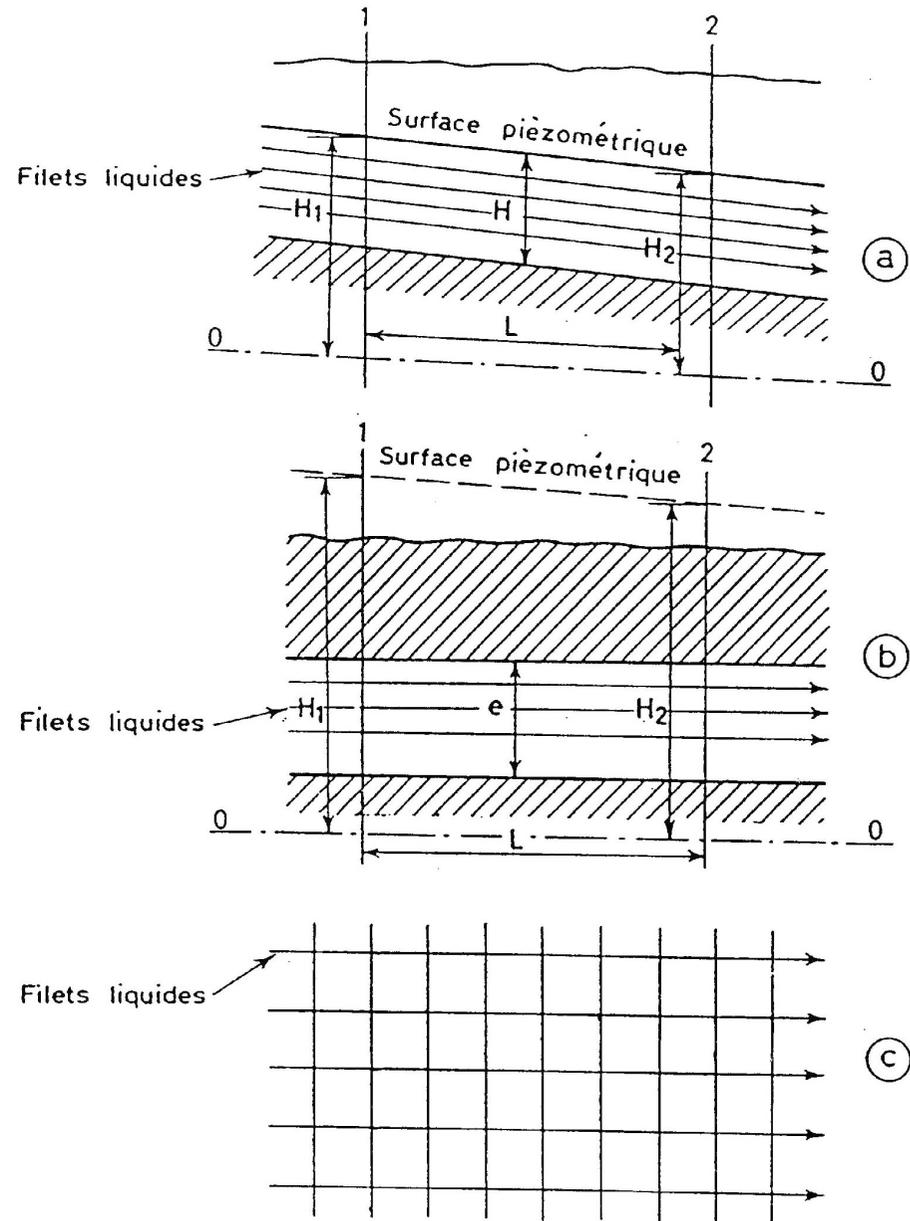
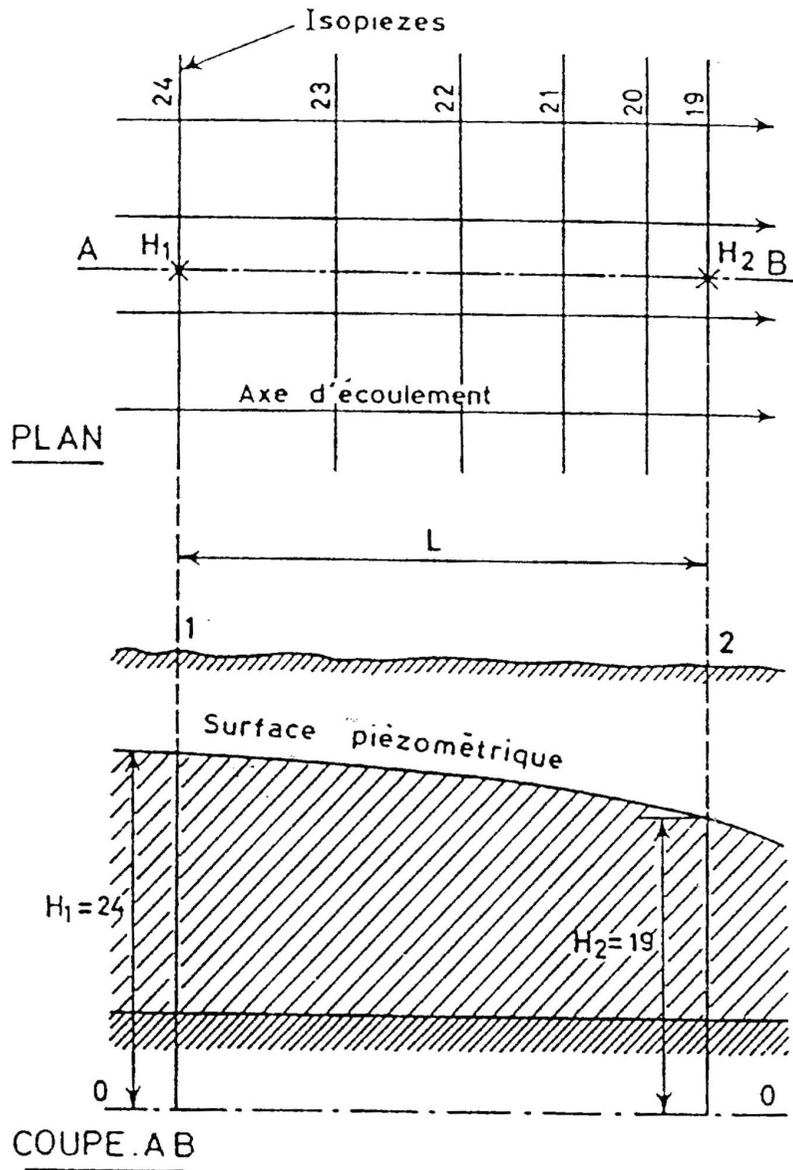
Représentation des isopièzes

Écoulements  $\perp$  isopièzes  
(gradient hydraulique)

Axes de drainage = vallées piezo



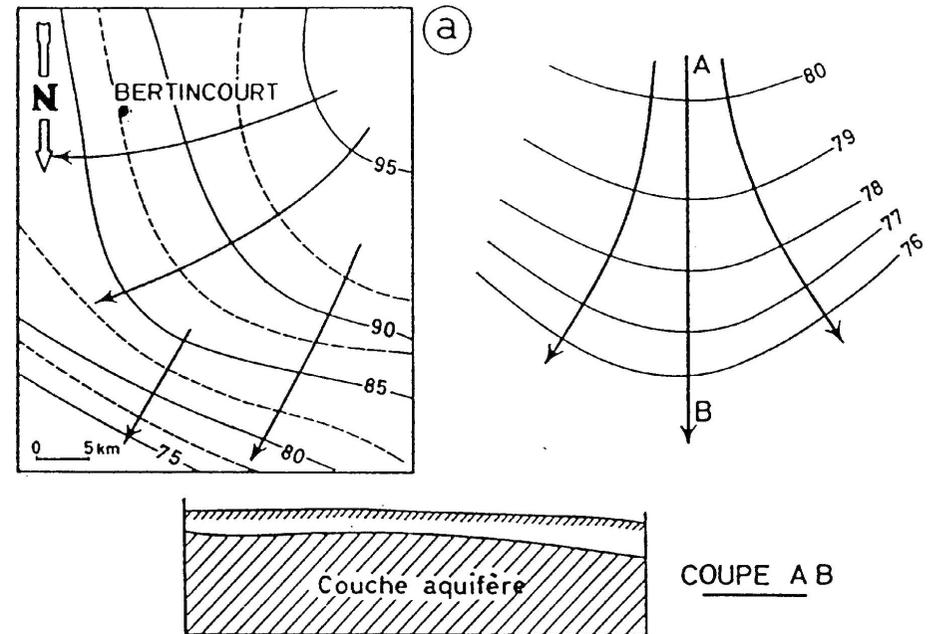
# Interprétation des cartes piézométriques



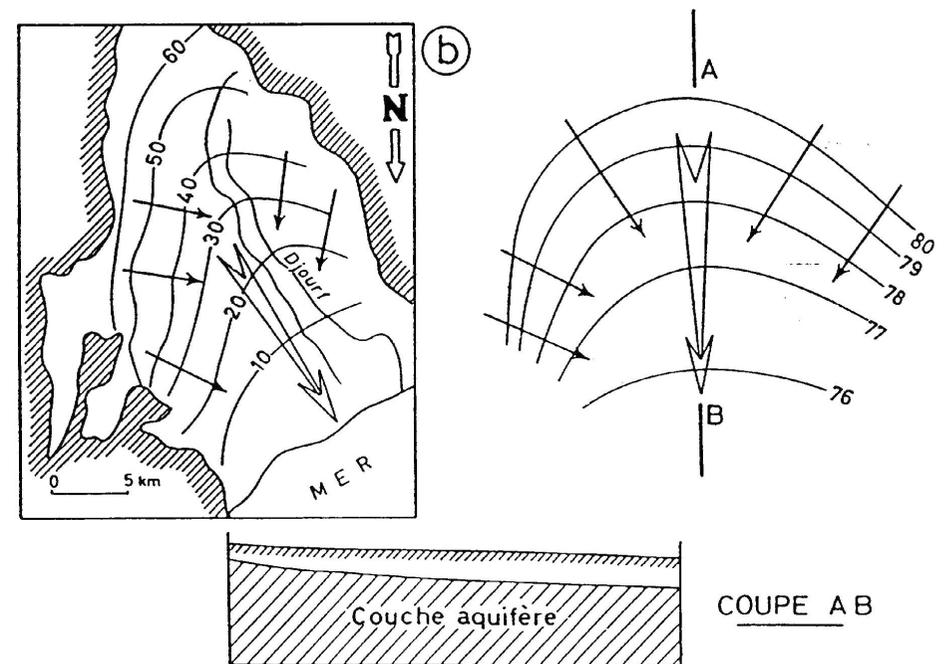
# Interprétation des cartes piézométriques

## Forme des isopièzes

Cas d'un écoulement divergent



Cas d'un écoulement convergent

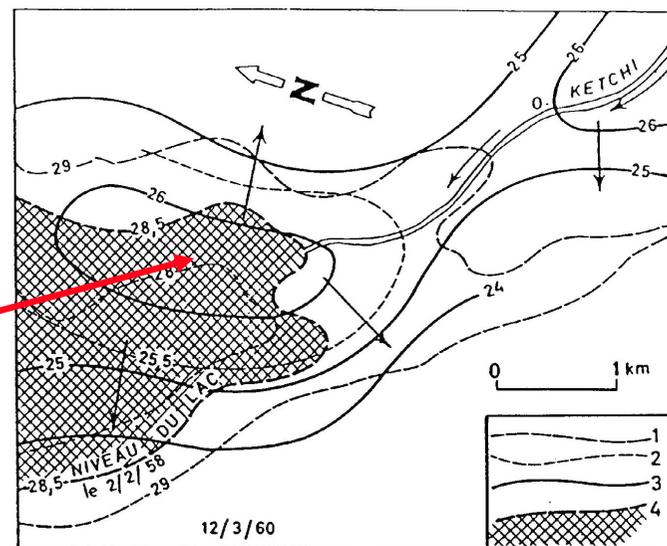


# Interprétation des cartes piézométriques

## Formes des isopièzes

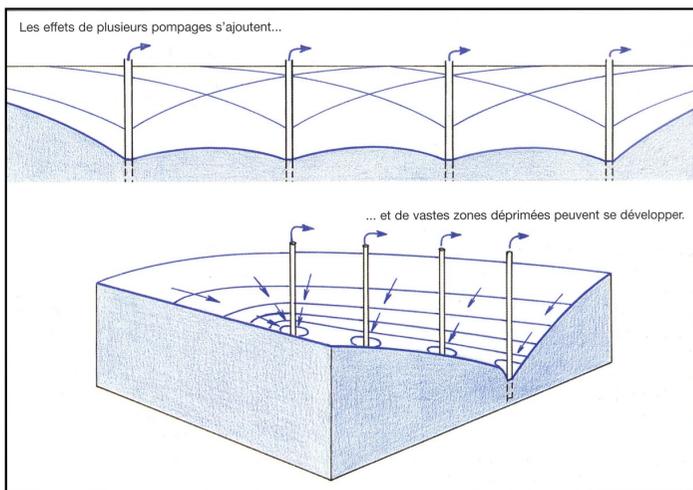
### Dômes et dépressions piézo.

Dôme piézométrique  
(alimentation par un lac)

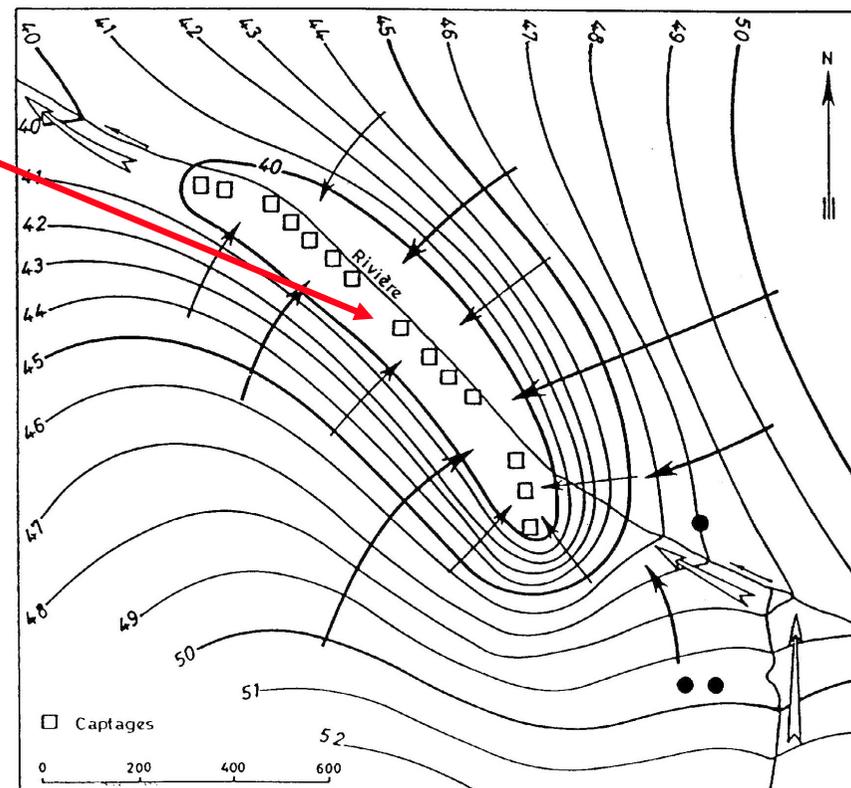


— Protubérance de la surface piézométrique due à une alimentation directe par les eaux de surface.

Dépression piézométrique  
(champ captant)

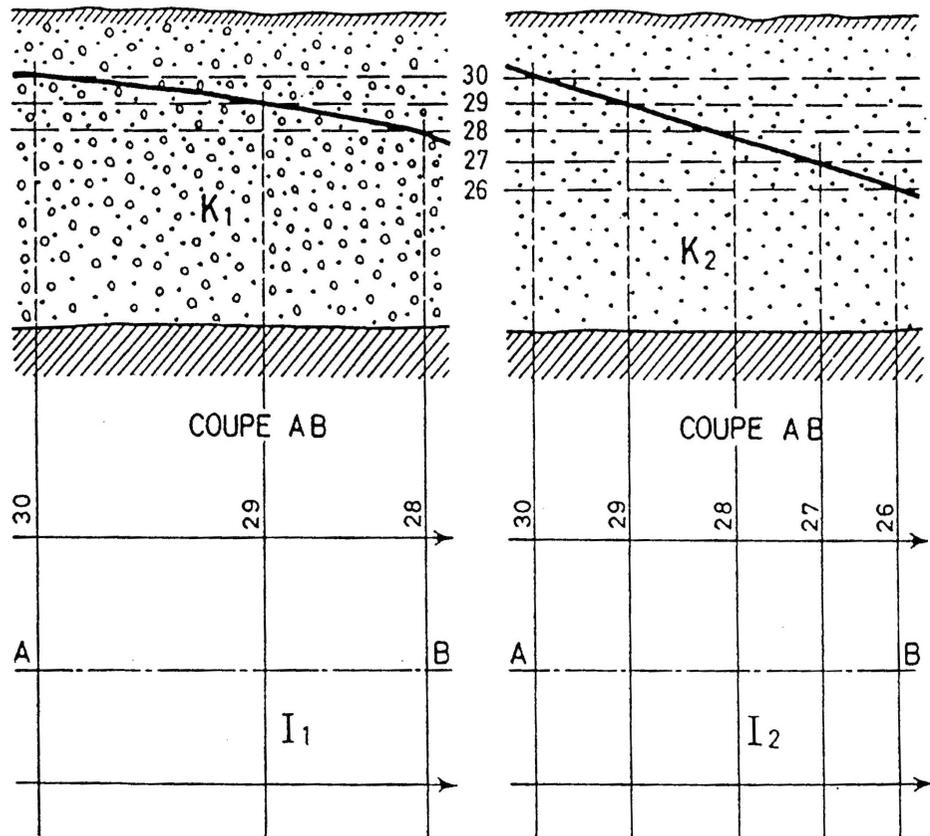


Les effets de plusieurs pompages s'ajoutent  
(Collin, 2006)

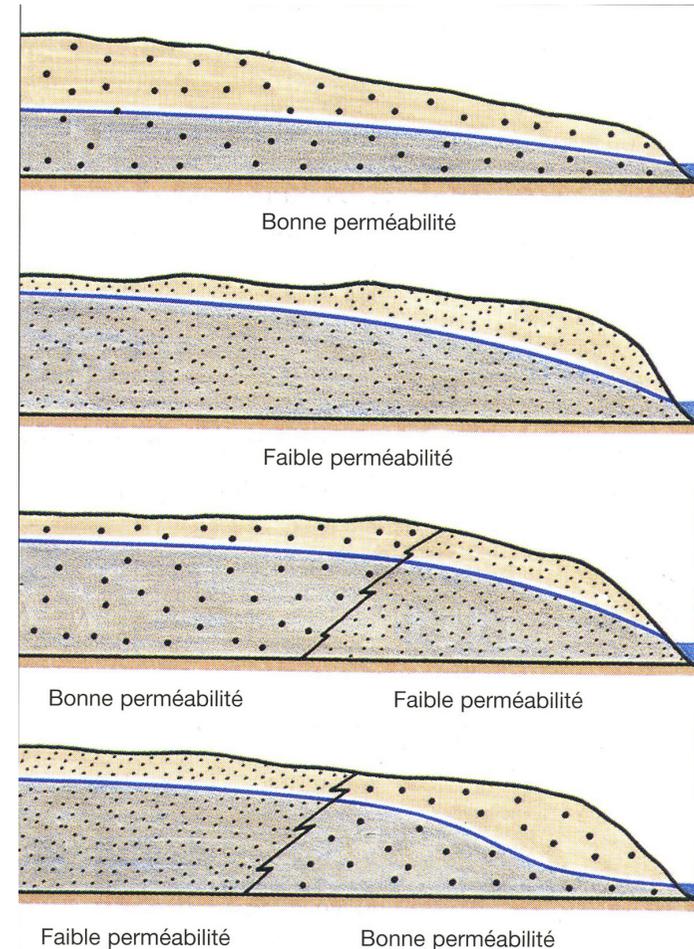


— Dépression de la surface piézométrique due à une exploitation intensive des eaux souterraines... Rheinisch-Westfalischen.

# Interprétation des cartes piézométriques : espacement des isopièzes Effets de la perméabilité



Loi de Darcy  
 $Q = A K i$   
Si K diminue  
Alors i augmente



*Effets des variations de perméabilité du terrain sur le profil en travers d'une nappe  
(Collin, 2006)*

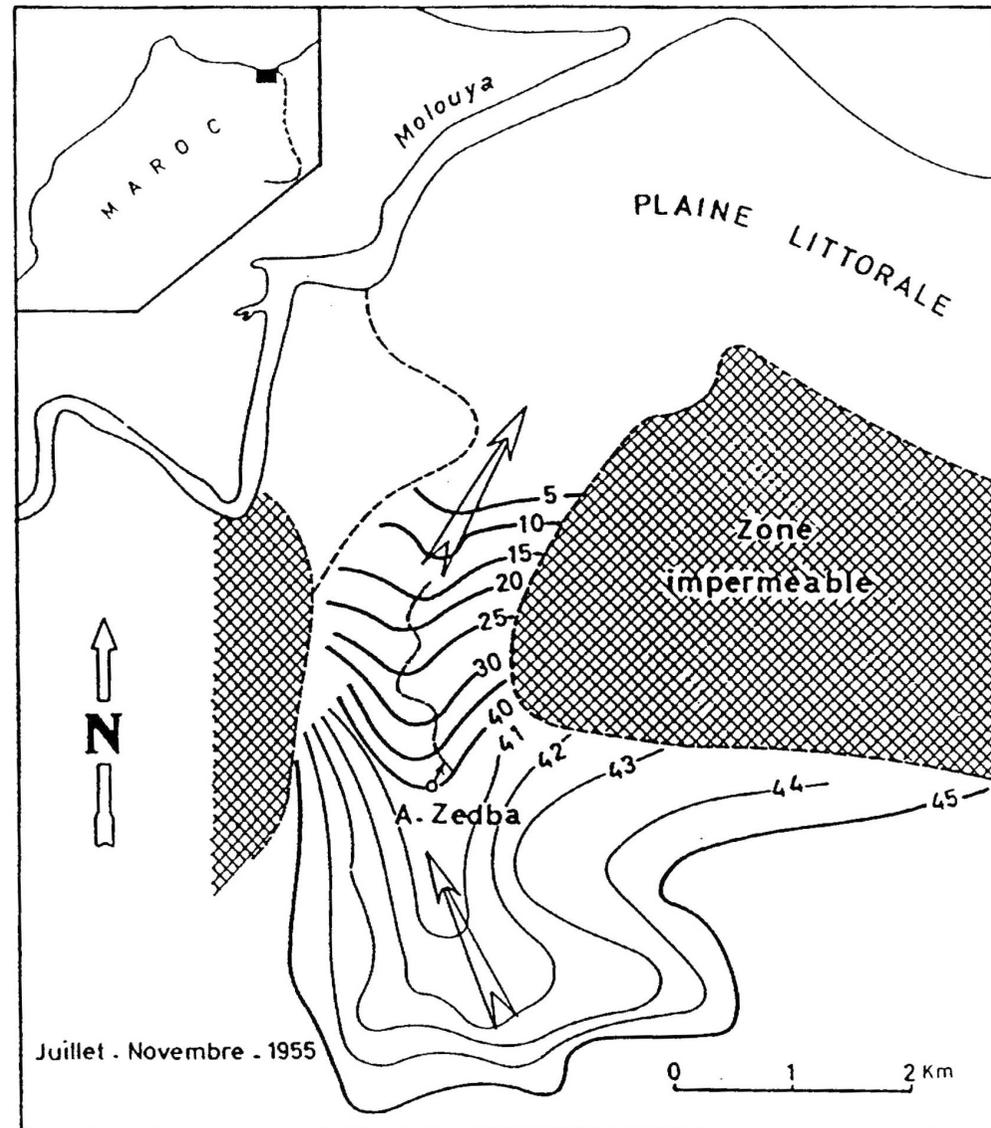
# Interprétation des cartes piézométriques : Espacement des isopièzes Effet des variations de la section d'écoulement

Loi de Darcy

$$Q = AKi$$

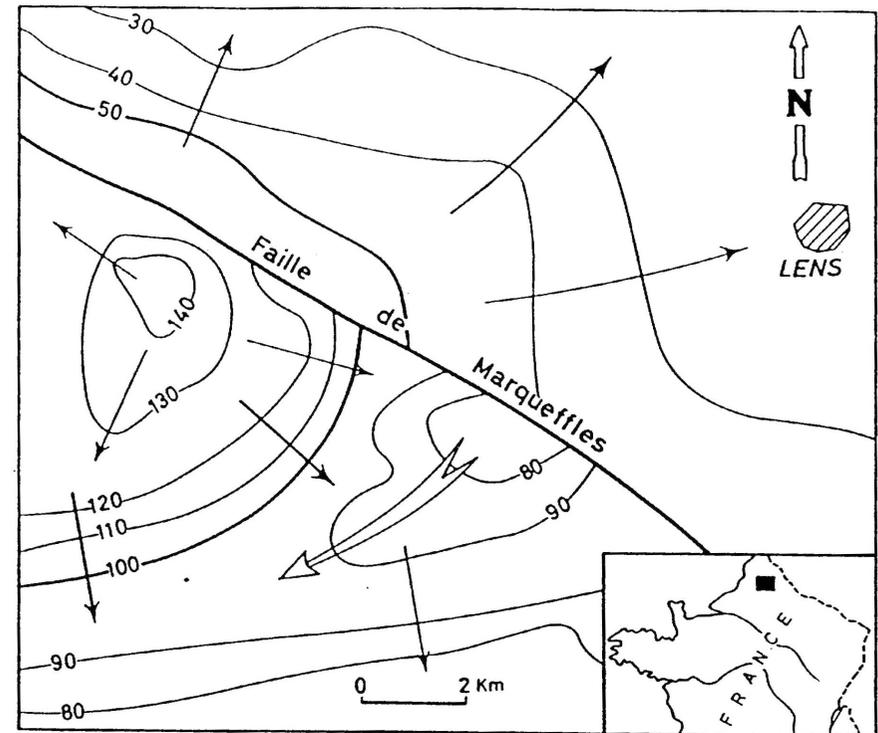


Si A diminue  
Alors i augmente



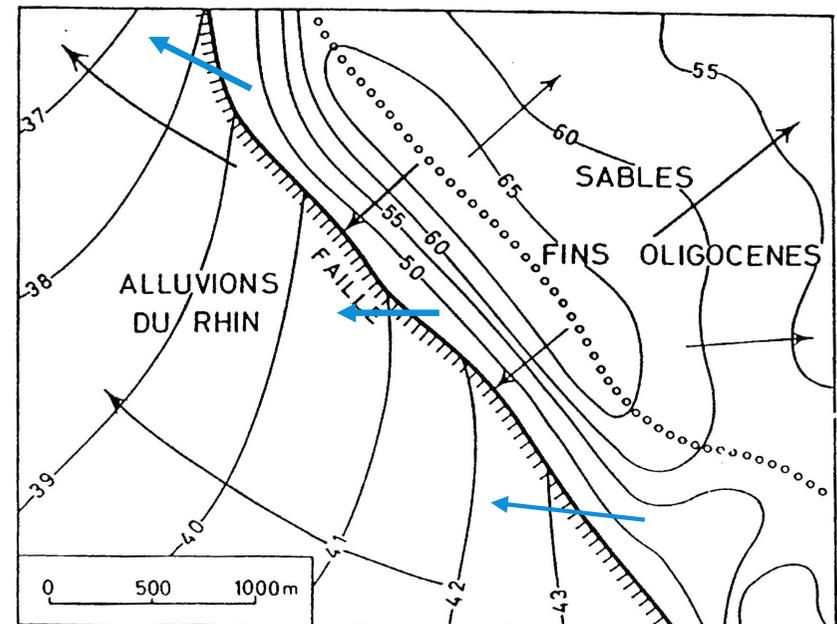
# Interprétation des cartes piézométriques Effets des failles

Cas d'une faille « étanche » →

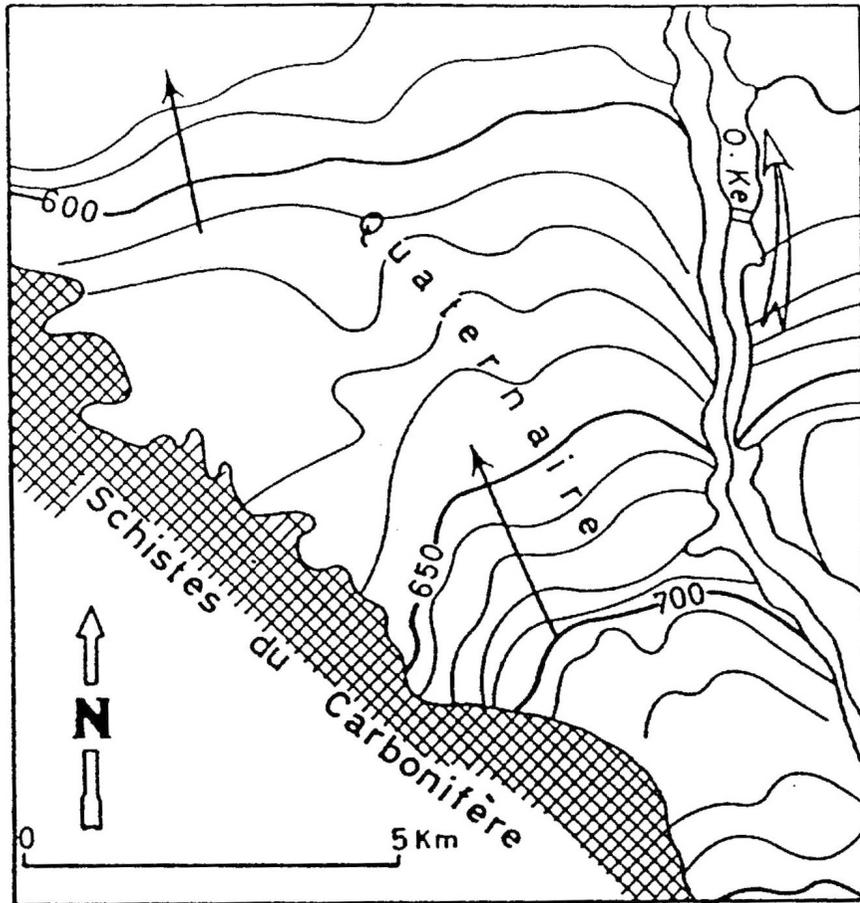


— Influence, sur la surface piézométrique, d'une faille importante, affectant la couche aquifère et le substratum.

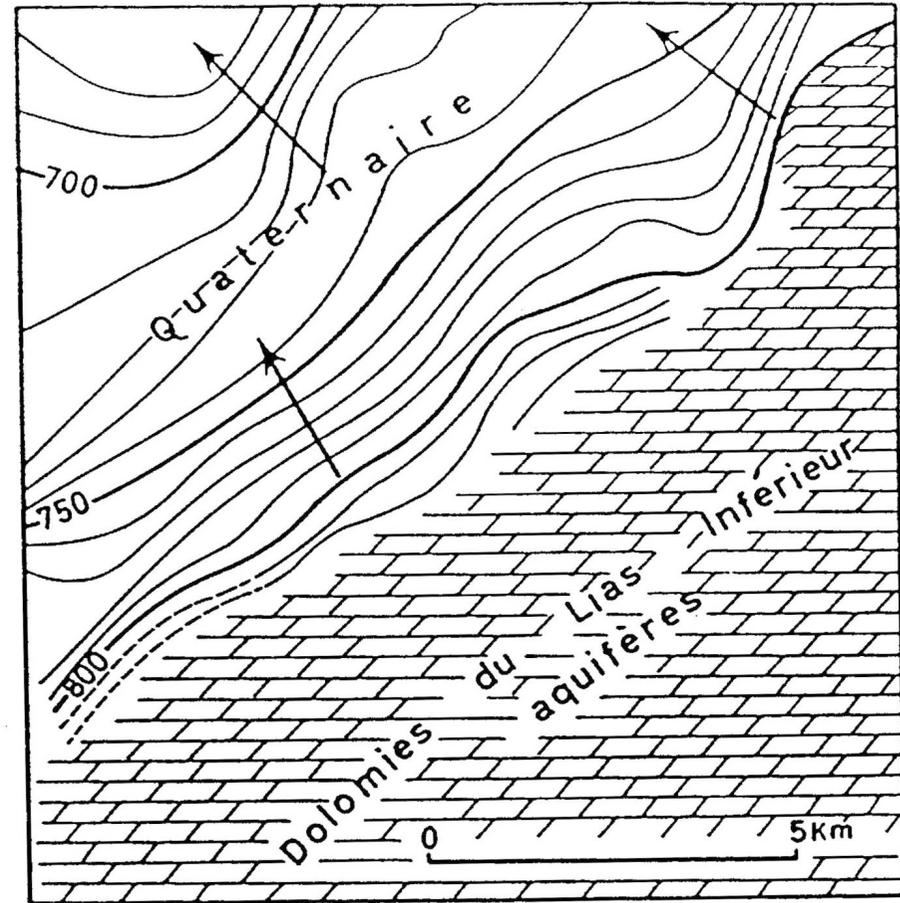
Cas d'une faille perméable →



## Interprétation des cartes piézométriques Effets des limites géologiques



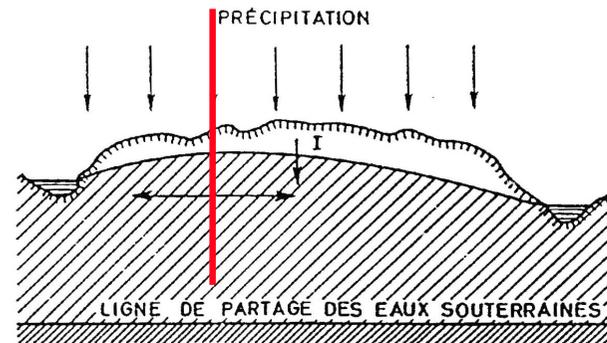
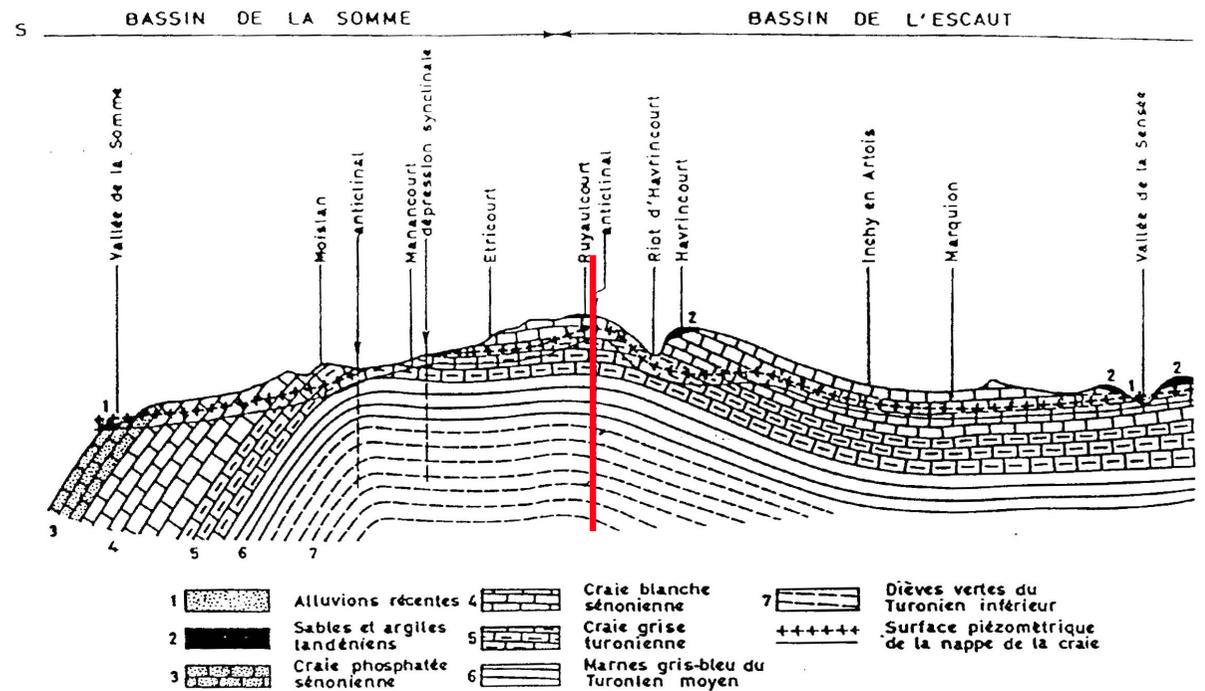
Cas d'une limite « étanche »  
(schistes imperméables)



Cas d'une limite perméable  
(alimentation par les dolomies)

# Interprétation des cartes piézométriques

## Détermination des limites de BV hydrogéologique ou BV souterrain



— Nappe elliptique. Schéma et coupe hydrogéologique dans le Nord de la France.

## Interprétation des cartes piézométriques

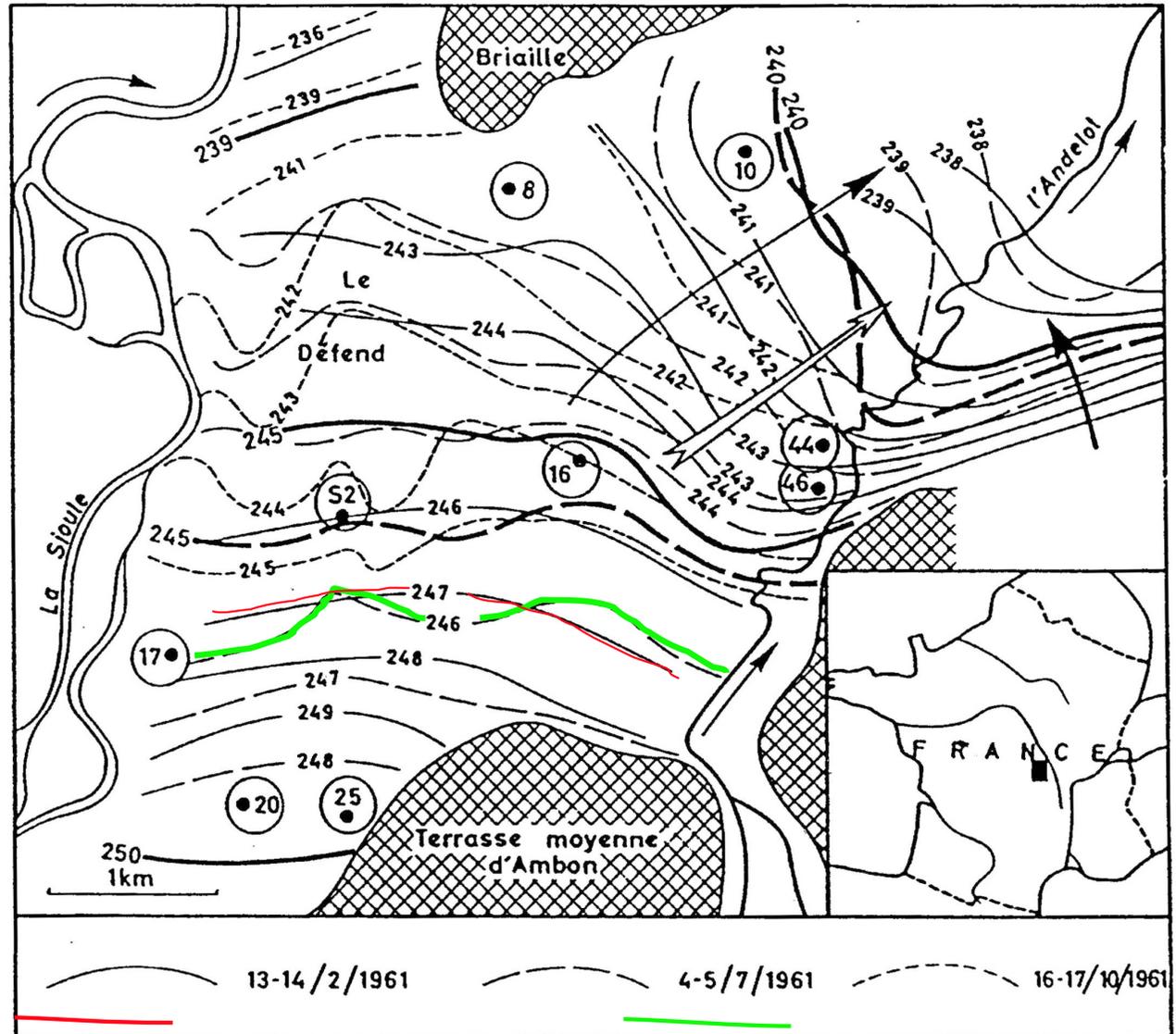
### Zones favorables pour l'implantation de forages

Espacement	Concavité orientée vers	Type	Gradient hydraulique	Perméabilité ou transmissivité	Débit unitaire	Schéma
diminution profil parabolique	aval convergent	I	augmente	décroît	croît	
	amont divergent	II	augmente	décroît	décroît	
augmentation profil hyperbolique	aval convergent	III	décroît	croît	croît	
	amont divergent	IV	décroît	croît	décroît	

## Interprétation des cartes piézométriques : campagnes successives

### Objectifs :

- battement de nappe
- variations limites BV
- calcul de la ressource exploitable



Piezo Hte eaux - piezo étiage =  $\Delta S \rightarrow \Delta S \times S =$  ressource exploitable

