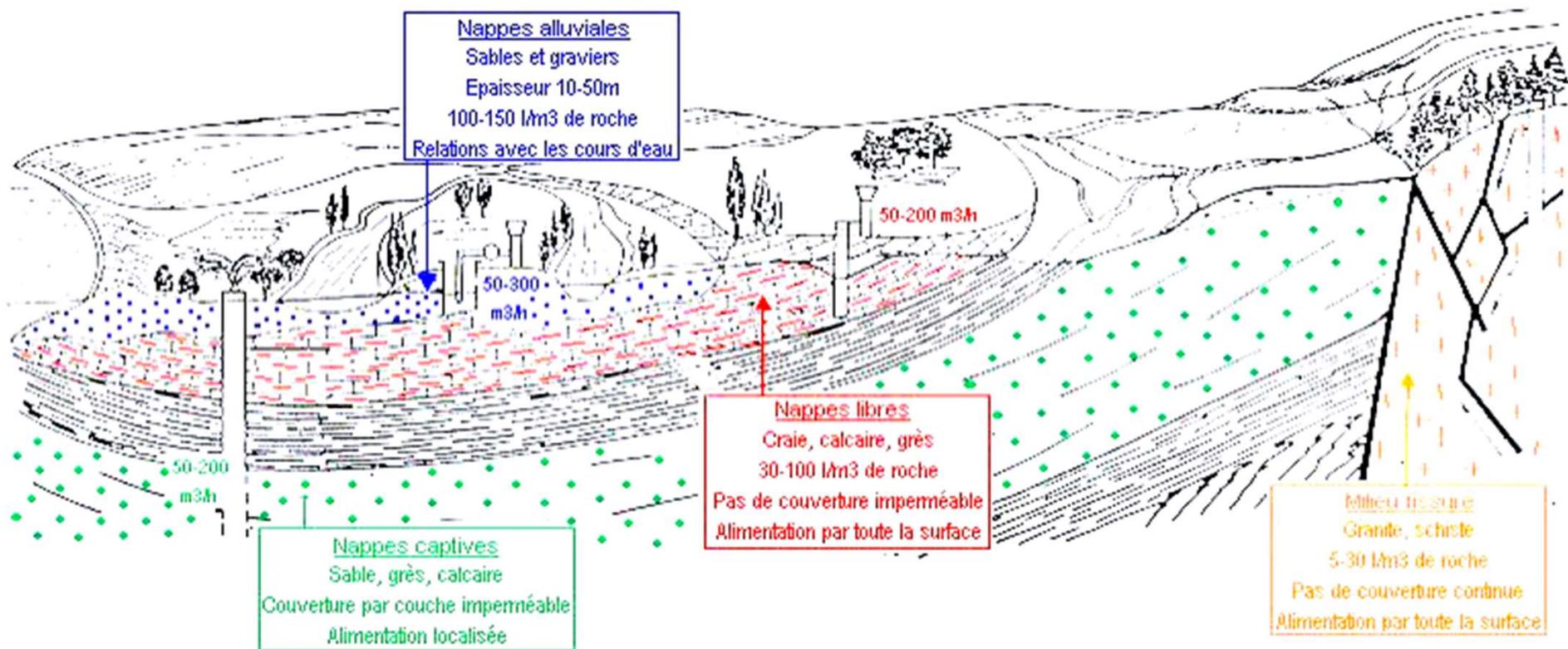


Master 1 STPE

Eléments d'hydrogéologie



Sébastien Lebaut

Master 1 STPE

Eléments d'hydrogéologie

Organisation

-CM → aquifère, nappe, hydrodynamique, loi de Darcy

-TD → coupe géologique, caractérisation des aquifères à partir d'une carte géologique

-TP → divers exercices, calcul des paramètres hydrodynamiques à partir d'un exemple théorique

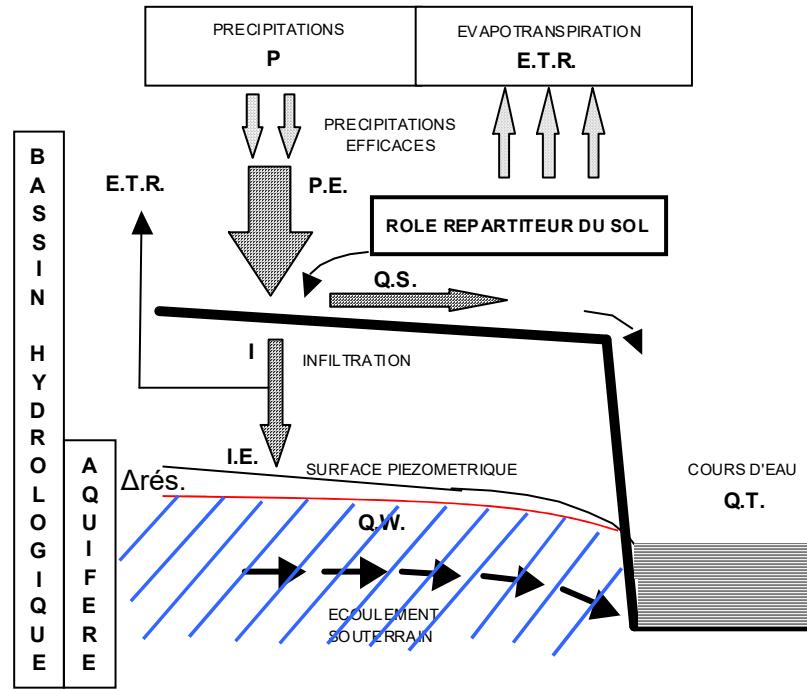
BIBLIOGRAPHIE

- Castany G., Margat J., 1977: Dictionnaire français d'hydrogéologie. Editions du BRGM.
- Castany G., 1968: Prospection et exploitation des eaux souterraines. Dunod.
- Castany G., 1982: Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod.
- Chamley H., 2002: Environnements géologiques et activités humaines. Vuibert.
- Cosandey C. (sous la direction de), 2003: Les eaux courantes. Belin.
- Gilli E., Mangan C., Mudry J., 2004: Hydrogéologie – Objets, méthodes, applications. Dunod.
- IFEN, 2003: L'état des eaux souterraines en France. Etudes et travaux n°43.
- UNESCO, 2003: World water resources at the beginning of the 21st century. Cambridge University Press.
- Lallemand-Barrès A., 1995: Méthodes de dépollution des eaux souterraines. Editions du BRGM.
- Margat J., 1996: les ressources en eau. Editions du BRGM.

SITES WEB

- <http://www.brgm.fr>
- <http://www.ifen.fr>
- <http://infoterre.fr>
- <http://webworld.unesco.org/water>
- <http://www.ades.eaufrance.fr>

Les enseignements des bilans hydrologiques



$$\text{Sortie} = \text{Entrée} \pm \text{variation} \cdot \text{du stockage}$$

en un point (ou sur une petite surface): $P = E + Q_s + I$

dans un bassin: $P = E + Q_t + \Delta_{r\acute{e}s}$

$$Q_t = Q_s + Q_w$$

Infiltration

➤ Les **précipitations efficaces** se répartissent en deux fractions

↳ **Ruisseaulement** R directement collecté par le réseau hydrographique

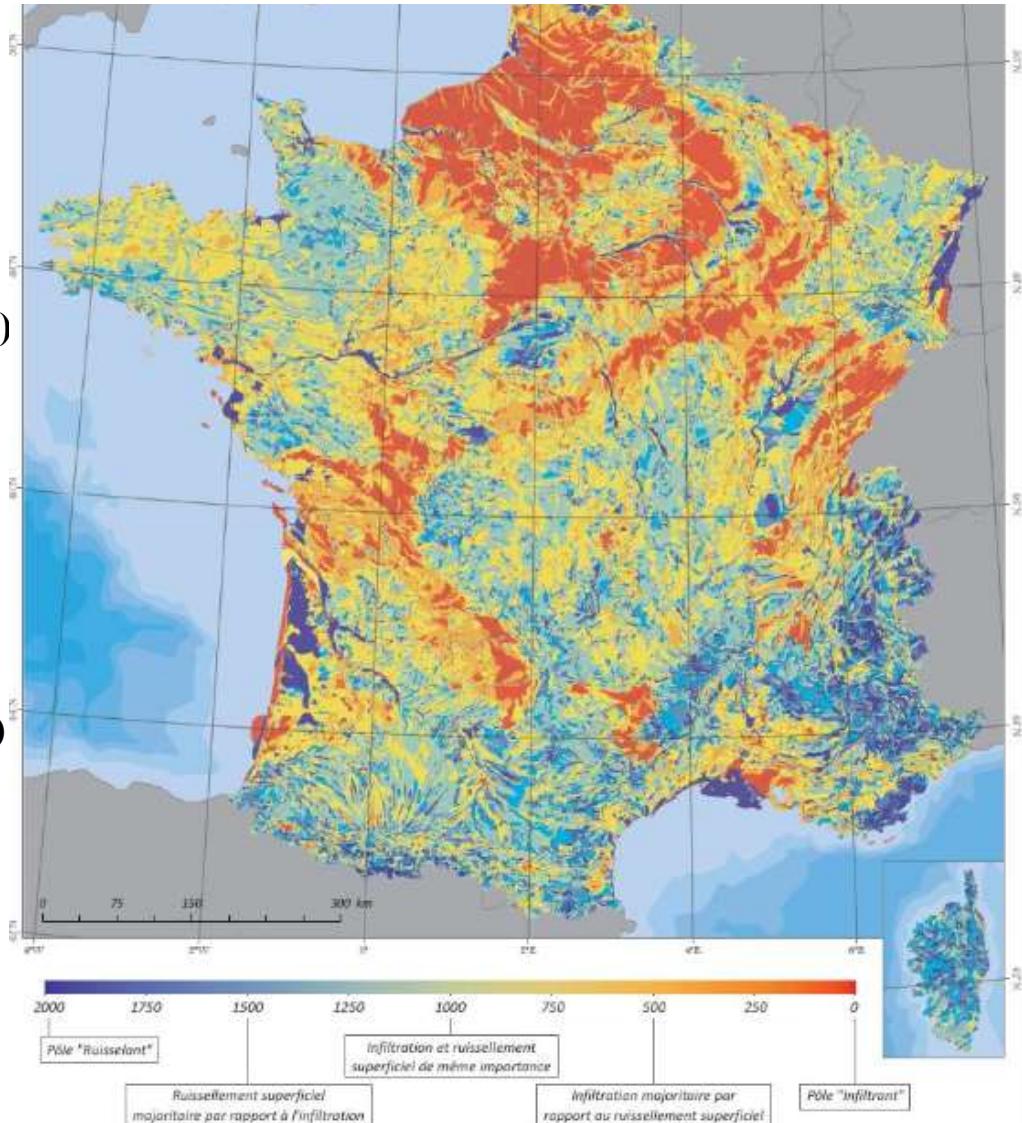
↳ **Infiltration** Q ou I correspondant à l'eau franchissant la surface du sol

Ces deux fractions sont évaluées en débit (m^3/s)

Les enseignements des bilans hydrologiques

➤ **L'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR)**
est utilisé comme indicateur de la capacité d'infiltration, il dépend :

- ↳ Géomorphologie
- ↳ Géologie de subsurface
- ↳ Etat de la surface du sol (pédologie, couvert, humidité)
- ↳ Profondeur de la surface piézométrique
- ↳ Aménagement humains (drainage, urbanisation, barrages)



Les enseignements des bilans hydrologiques

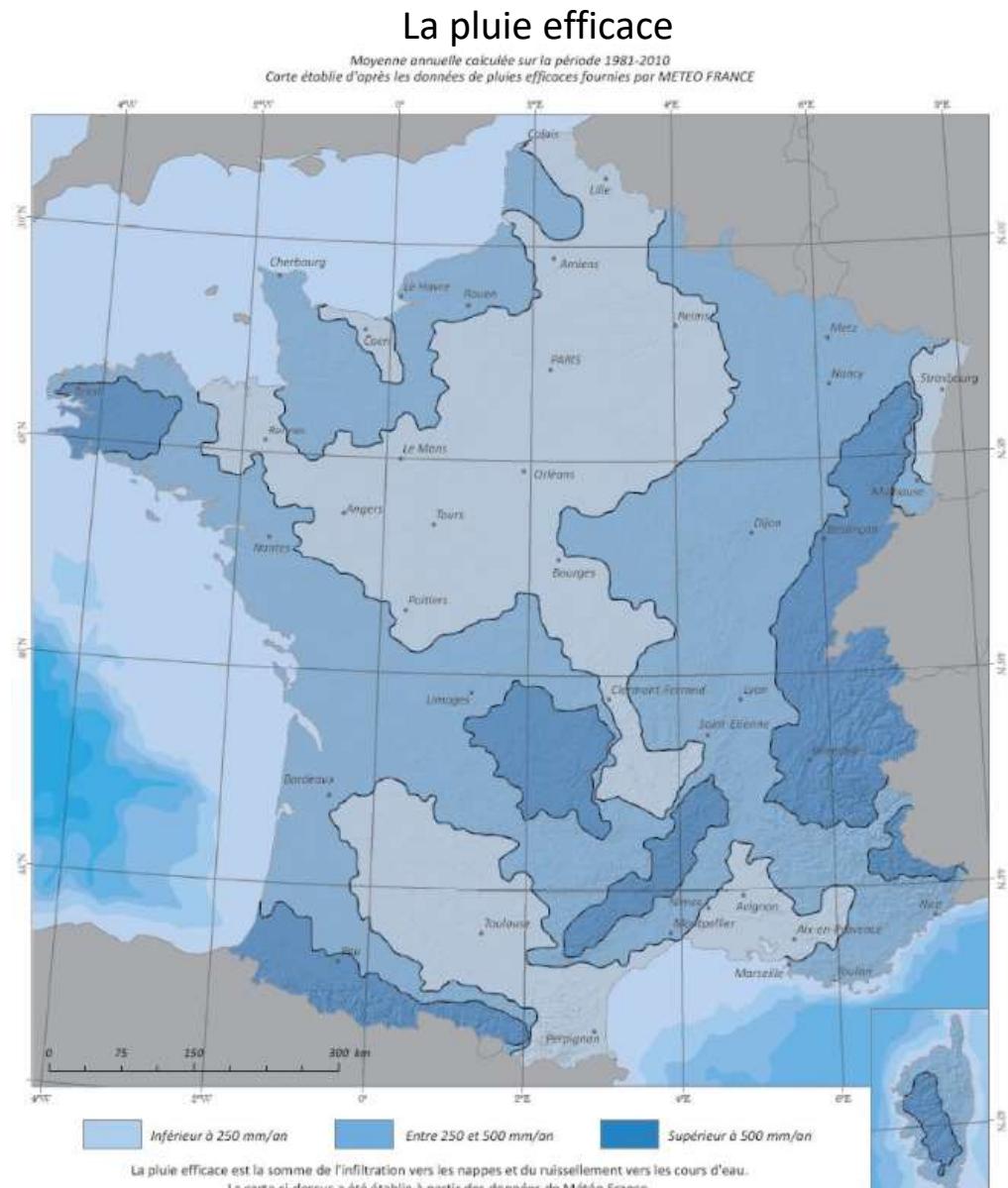
Infiltration

➤ Il existe d'autres indicateurs utilisés pour évaluer l'efficacité de l'infiltration

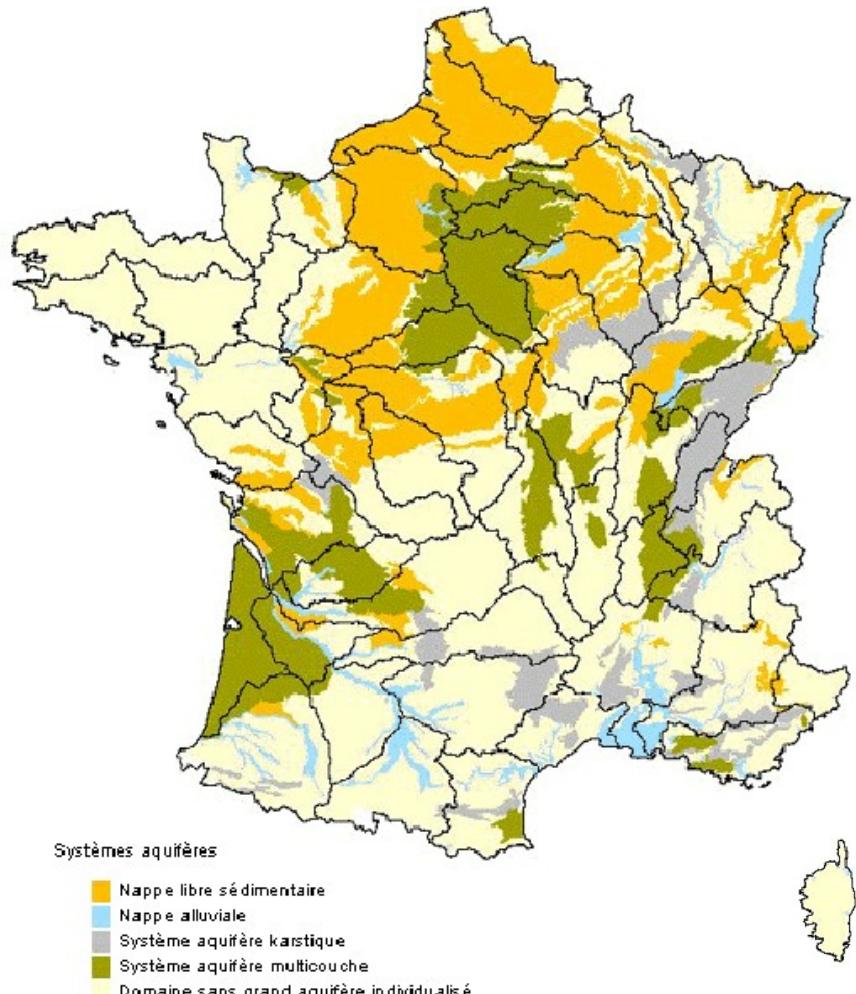
↳ La Hauteur d'Infiltration (HI) : quantité d'eau infiltrée par unité de temps

↳ Le Taux d'infiltration (TI) : rapport HI/HPE (hauteur de précipitation efficace)

➤ Alimentation spécifique : quantité d'eau apportée à l'aquifère, rapportée à la surface du toit de celui-ci



Les eaux souterraines en France



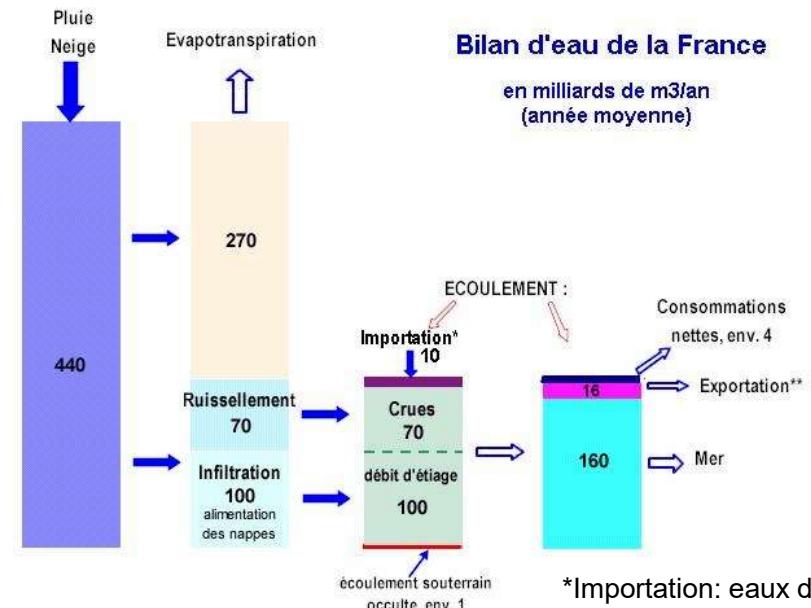
Les ressources:

On a répertorié en France environ 450 aquifères dont 200 aquifères régionaux de tailles variées (100 à $100\,000\text{ km}^2$) à ressource exploitable: 25 nappes captives et 175 nappes libres.

On estime que ces 200 aquifères renferment 2 000 milliard de m^3 d'eau dont environ 100 milliard de m^3 s'écoulent annuellement vers les sources et les cours d'eau.

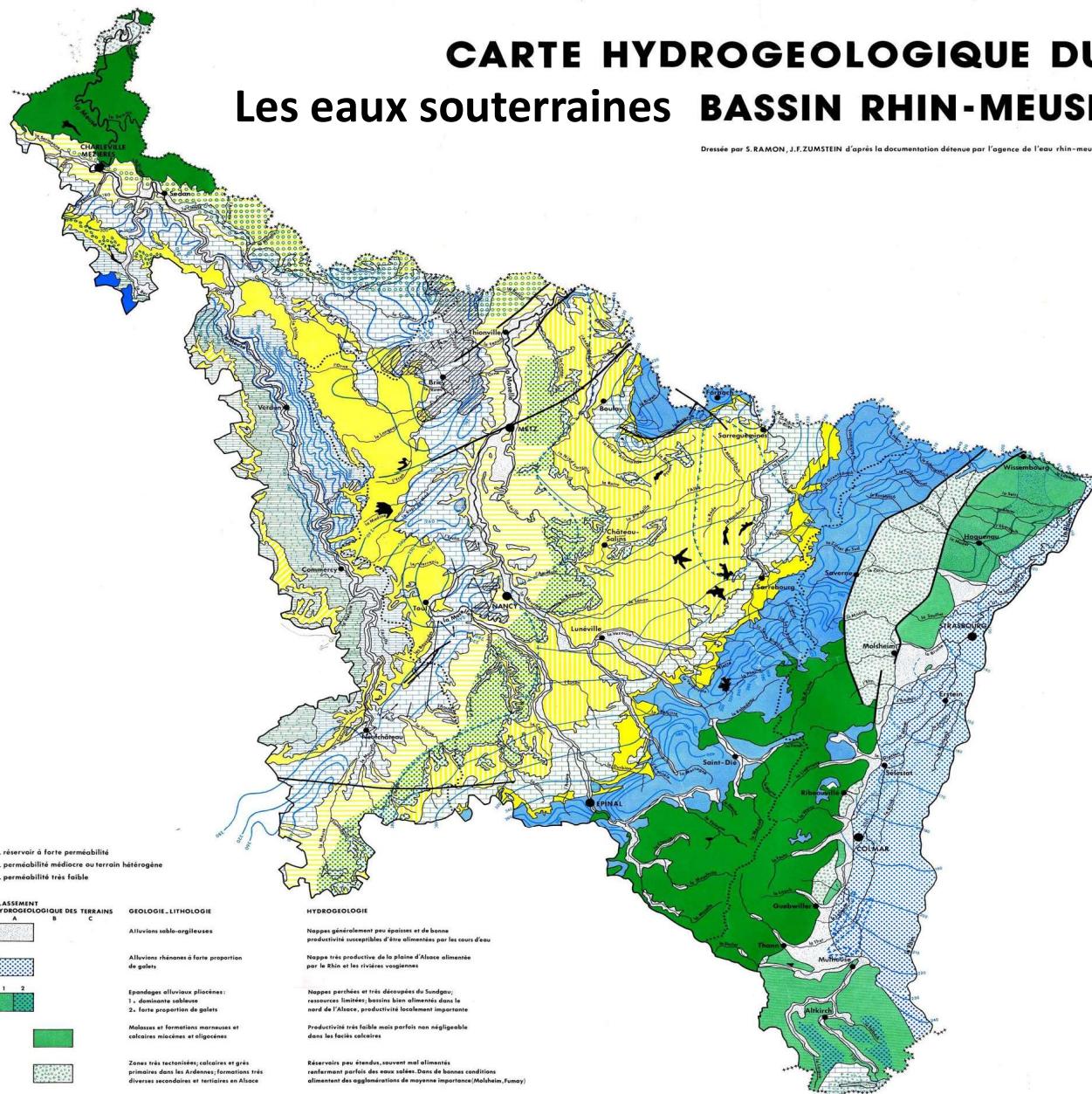
Les ressources en eau souterraines sont bien réparties sur les 2/3 du territoire.

7 km³/an sont puisés dans les nappes d'eau souterraine



CARTE HYDROGEOLOGIQUE DU Les eaux souterraines BASSIN RHIN-MEUSE

Dressée par S.RAMON, J.F.ZUMSTEIN d'après la documentation détenue par l'agence de l'eau rhin-meuse

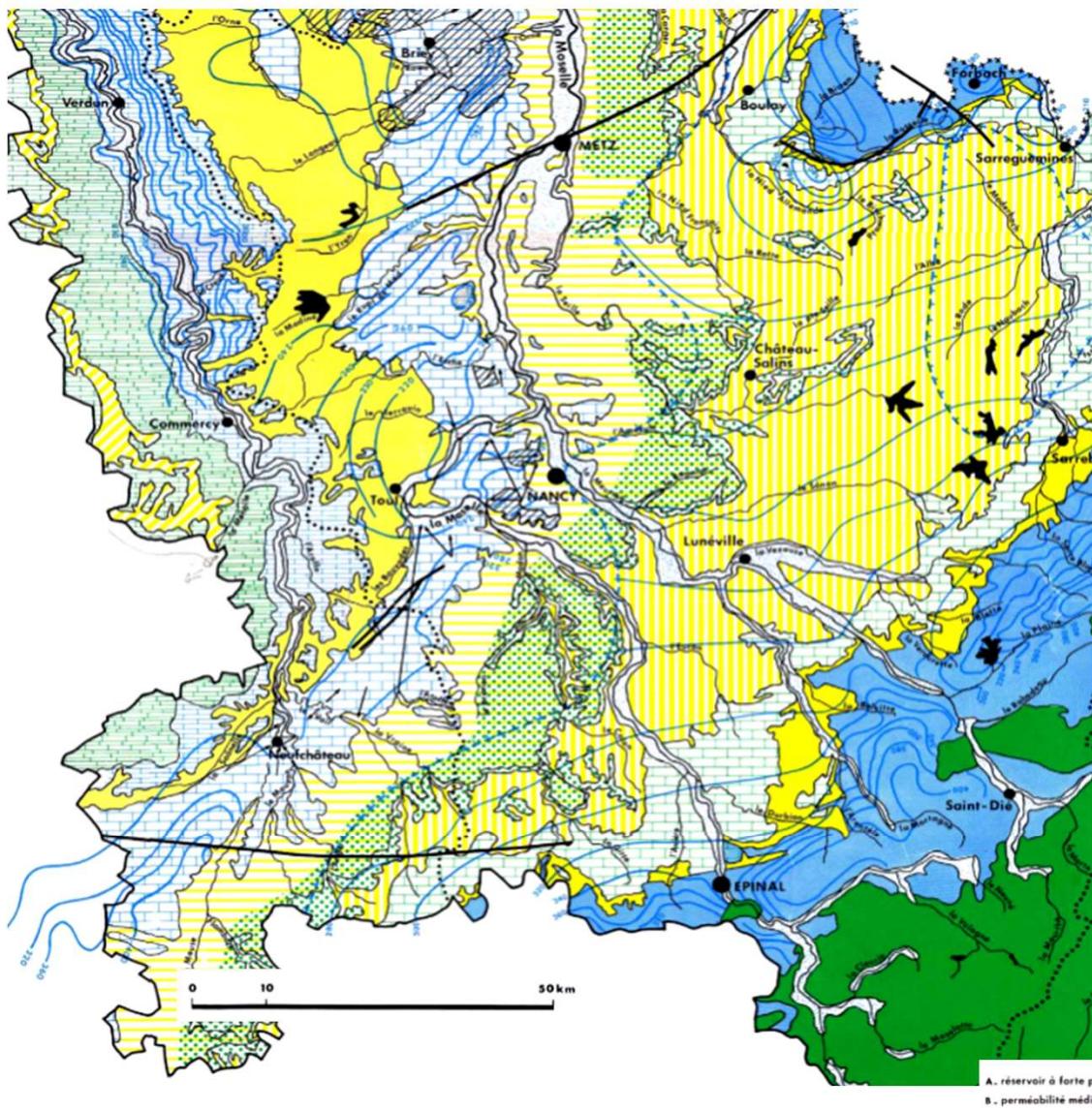


Les principales masses d'eau de l'est de la France avec leurs caractéristiques

Code	Nature	Dénomination	Classification	Type de système	Type lithologique
302a	Sous Système aquifère	Alluvions quaternaires de la Meurthe	aquifères continus	Libre	Roche détritique poreuse/fiss
302b	Sous Système aquifère	Alluvions quaternaires de la Moselle	aquifères continus	Libre	Roche détritique poreuse/fiss
304	Système aquifère	Alluvions quaternaires du bassin versant de la Meuse	aquifères continus	Libre	Roche détritique poreuse/fiss
304a	Sous Système aquifère	Alluvions quaternaires de la Meuse	aquifères continus	Libre	Roche détritique poreuse/fiss
304b	Sous Système aquifère	Alluvions quaternaires de la Chiers	aquifères continus	Libre	Roche détritique poreuse/fiss
304c	Sous Système aquifère	Alluvions quaternaires de la Bar	aquifères continus	Libre	Roche détritique poreuse/fiss
305	Système aquifère	Alluvions quaternaires de la Sarre	aquifères continus	Libre	Roche détritique poreuse/fiss
091	Système aquifère	Alluvions plioquaternaires de la plaine d'Alsace	aquifères continus	Libre	Roche détritique poreuse/fiss
173	Système aquifère	Cailloutis pliocènes du Sundgau	aquifères continus	Libre	Roche détritique poreuse/fiss
017	Système aquifère	Gaize du Cénomanien	aquifères continus	Libre	Roche détritique poreuse/fiss
070	Système aquifère	Calcaires du Tithonien du bassin parisien	aquifères continus	Libre	Roche carb. fissuree/fracturee
206	Système aquifère	Calcaires oxfordiens du bassin parisien	aquifères continus	Multicouche	Roche carb. fissuree/fracturee
092	Système aquifère	Calcaires jurassiques du Jura	aquifères continus	Multicouche	Roche carb. karst. (sed/meta)
090	Système aquifère	Calcaires jurassiques des champs de fracture	aquifères continus	Libre	Roche carb. fissuree/fracturee
207	Système aquifère	Calcaires du Dogger du bassin parisien	aquifères continus	Multicouche	Roche carb. fissuree/fracturee
208	Système aquifère	Grès du Lias inférieur d'Hettange-Luxembourg	aquifères continus	Multicouche	Roche détritique poreuse/fiss
209	Système aquifère	Grès du Rhétien de Lorraine	aquifères continus	Multicouche	Roche détritique poreuse/fiss
082	Système aquifère	Calcaires du Muschelkalk de Lorraine	aquifères continus	Multicouche	Roche carb. fissuree/fracturee
210	Système aquifère	Grès du Trias inférieur (GTI)	aquifères continus	Multicouche	Roche détritique poreuse/fiss

Code	Localisation et commentaires
302a	Système alluvial de la Meurthe, avec Vezouze et Mortagne, en amont de Pompey (Fy, Fz)
302b	Système alluvial de la Moselle, avec Moselotte, Vologne, Niche et Seille (Fy,Fz)
304	Système alluvial de la Meuse et de la Chiers (Fy, Fz)
304a	Système alluvial de la Meuse (avec Sormonne) souvent en connexion hydraulique directe avec les calcaires sous-jacents de l'Oxfordien moyen (Fy, Fz)
304b	Système alluvial de la Chiers (Fy, Fz)
304c	Système alluvial de la Bar (Fy, Fz)
305	Système alluvial de la Sarre entre Harskirchen (amont) et Herbitzheim (aval)
091	L'aquifère quaternaire principal puissant de la plaine du Rhin supérieur (Fy, Fz) s'étend entre Vosges et Forêt-Noire avec des faciès de bordure différenciés sur les 2 flancs.
173	Formation alluvionnaire d'âge pliocène supposé (Fv), dépôts du Rhin-Aar ancien à matériel alpin et vosgien, présente en Franche-Comté et en Alsace, aquifères poreux peu perméables
017	Formation siliceuse fracturée (c1c) très disséquée par l'érosion, reposant sur les argiles du Gault (c1a-b) et donnant lieu à des aquifères perchés
070	Calcaires du Tithonien ex-Portlandien (j9), ou Calcaires du Barrois, formant cuesta au-dessus des marnes et aquifères lorsqu'ils sont fissurés
206	Les calcaires oxfordiens (j5-6) s'arrêtent par érosion à l'Est, formant les cotes de Meuse. A l'Ouest ils plongent sous le bassin de Paris
092	Ensemble des calcaires jurassiques, plissés ou non, présents en Franche-Comté et dans le Sud de l'Alsace
090	Petit affleurements de Grande oolithe et calcaires jurassiques (j1c-j2) préservés dans les champs de fracture, souvent recouverts en discordance par des congolomérats oligocènes
207	Aquifères à dominante karstique des calcaires du Dogger (j1), s'arrêtent par érosion à l'Est, formant les cotes de Moselle. A l'Ouest plongent sous le bassin de Paris
208	Grès d'Hettange-Luxembourg en France, d'âge Hettangien-Sinémurien (l2)
209	Faciès gréseux du Rhétien inférieur t10a
082	Formations des calcaires dolomitiques du Muschelkalk supérieur (t5) affleurant sur l'ensemble de la Lorraine et formant des aquifères fissurés
210	Aquifère des grès du Buntsandstein (t1-t2) : la nappe est libre pour les zones d'affleurement le long des Vosges et dans le bassin houiller, elle est captive l'Ouest pour l'essentiel de la Lorraine.

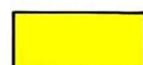
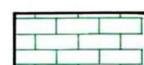
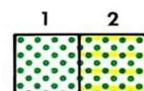
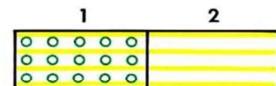
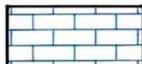
Contexte hydrogéologique du sud-ouest de la Lorraine



CLASSEMENT HYDROGEOLOGIQUE DES TERRAINS	GEOLOGIE-LITHOLOGIE			HYDROGEOLOGIE
	A	B	C	
Alluvions sable-argileuses				Nappes généralement peu épaisses et de bonne productivité susceptibles d'être alimentées par les cours d'eau.
Alluvions rhénanes à forte proportion de galets				Nappe très productive de la plaine d'Alsace alimentée par le Rhin et les rivières vosgiennes
Epanodages alluviaux pliocènes : 1. dominante sableuse 2. forte proportion de galets	1	2		Nappes perchées et très découpées du Sundgau; ressources limitées; bassins bien alimentés dans le nord de l'Alsace, productivité localement importante
Malaises et formations marneuses et calcaires miocènes et oligocènes				Productivité très faible mais parfois non négligeable dans les faciès calcaires
Zones très tectonisées; calcaires et grès primaires dans les Ardennes; formations très diverses secondaires et tertiaires en Alsace				Réservoirs peu étendus, souvent mal alimentés renfermant parfois des eaux salées. Dans de bonnes conditions alimentant des agglomérations de moyenne importance (I)
Gaize cénonanienne de l'Argonne				Nappe de productivité moyenne soutenue par les affluents développée à l'extérieur du bassin
Portlandien et Crétacé inférieur : calcaires, sables et sables argileux				Dans les calcaires karstiques du Portlandien, ressources importantes développées à l'extérieur du bassin. Productivité très variable et aléatoire
Kimméridgien: marnes et calcaires marneux				Trois horizons calcaires de faible épaisseur à productivité médiocre
Oxfordien moyen et supérieur: calcaires récifaux à la base (1) sous une alternance de calcaires blancs et d'argiles (2)	1	2		Bonne alimentation, débits notables dans les zones récifales. Resurgences karstiques dans les vallées de l'Aire et de la Meuse
Callovien et Oxfordien inférieur : 1. facies gaize des Ardennes 2. argiles de la Woëvre	1	2		Absence totale de nappe dans la Woëvre. Bonne productivité dans la gaize des Ardennes
Calcaires et marne-calcaires du Dagerr				Plusieurs niveaux aquifères dans le Bajocien (souvent karstique) et le Bathonien supérieur. Forte alimentation, productivité très variable même sous couverture
Rhétien supérieur et Liass indifférenciés : 1. facies gréseux intercalaire/grès de Luxembourg 2. alternances de calcaires et marnes	1	2		Bonne alimentation et bonne productivité dans les grès de Luxembourg (x.). Eau non captable dans les autres formations
Grès du Rhétien inférieur				Faibles ressources. Nappes localement productives : 1. en affleurement 2. sous couverture des formations supérieures
Marnes, argiles et niveaux dolomitiques du Keuper et de la Lettenkohle				Nappes de faible productivité dans les niveaux dolomitiques ou gréseux. Eau très souvent minéralisée
Calcaires fissurés et karstiques du Muschelkalk supérieur et moyen				Nappe mal connue, eau souvent trop minéralisée sous couverture. Productivité très variable, généralement faible
Marnes et argiles du Muschelkalk inférieur				Généralement absence de ressources exploitables sauf (eaux minérales de Vittel Contrexéville)
Grès et conglomérats du Permo-Trias				Ressource largement exploitée en Lorraine. Productivité variable en affleurement, forte sous couverture. Salinité croissante vers l'Ouest
Formations cristallines ou métamorphiques des massifs anciens				Eau dans les zones de fractures et arènes granitiques des Vosges et dans les schistes altérés des Ardennes. Faible productivité

**CLASSEMENT
HYDROGEOLOGIQUE DES TERRAINS**

A	B	C
---	---	---



GEOLOGIE - LITHOLOGIE

Calcaires et marno-calcaires du Dogger

Rhétien supérieur et Lias indifférenciés:
1 - faciès gréseux intercalaire(grès de Luxembourg)
2 - alternances de calcaires et marnes

Grès du Rhétien inférieur

Marnes, argiles et niveaux dolomitiques
du Keuper et de la Lettenkohle

Calcaires fissurés et karstiques du
Muschelkalk supérieur et moyen

Marnes et argiles du Muschelkalk
inférieur

Grès et conglomérats du
Permo-Trias

Formations cristallines ou métamorphiques
des massifs anciens

A - réservoir à forte perméabilité

B - perméabilité médiocre ou terrain hétérogène

C - perméabilité très faible

Plusieurs niveaux aquifères dans le Bajocien(souvent
karstique) et le Bathonien supérieur. Forte alimentation
productivité très variable même sous couverture

Bonne alimentation et bonne productivité dans
les grès de Luxembourg (s.l.) Eau non captable
dans les autres formations

Faibles ressources.Nappes localement productives:
1 - en affleurement
2 - sous couverture des formations supérieures

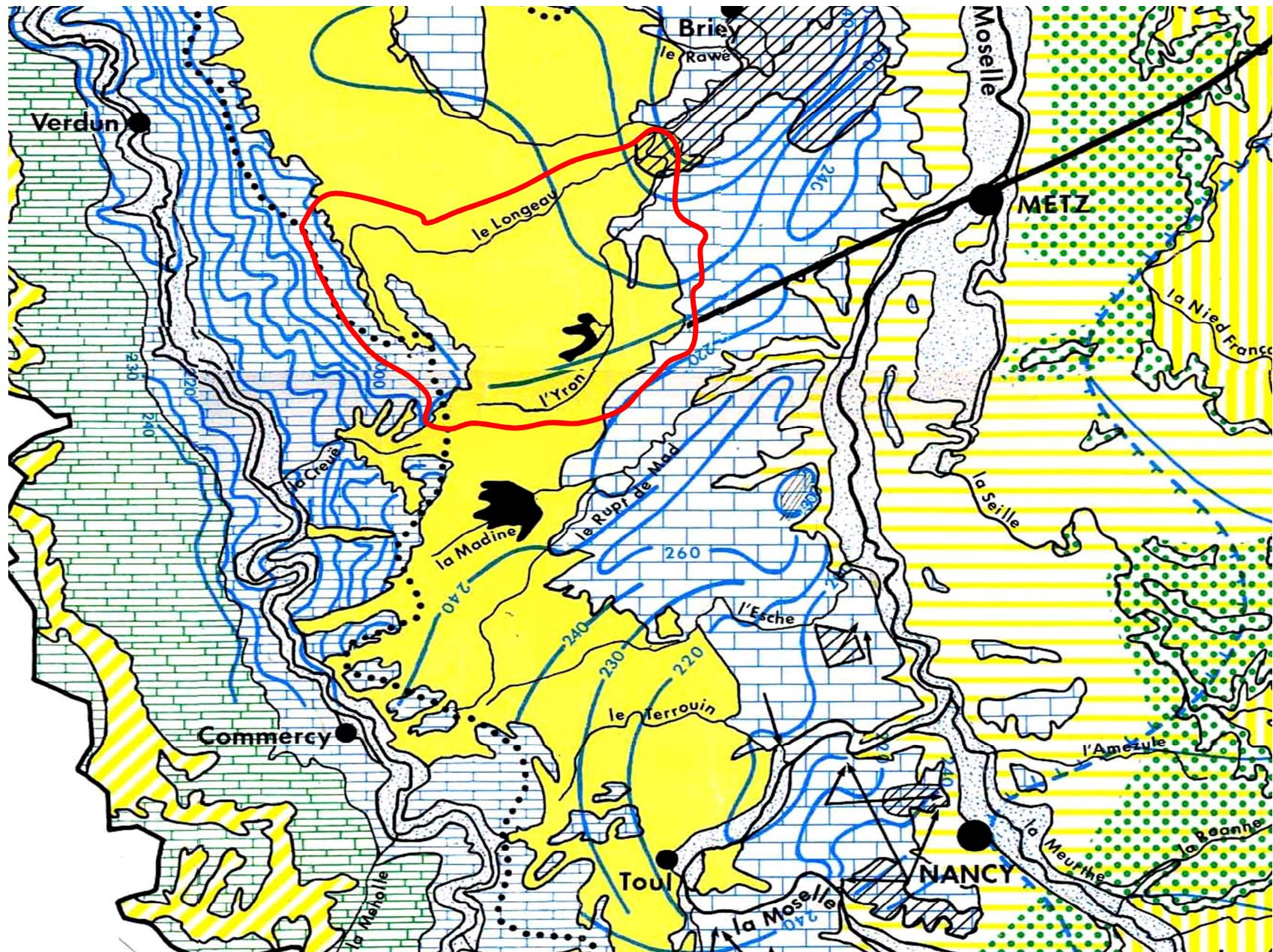
Nappes de faible productivité dans les niveaux
dolomitiques ou gréseux .Eau très souvent
minéralisée

Nappe mal connue, eau souvent trop minéralisée
sous couverture. Productivité très variable,
généralement faible

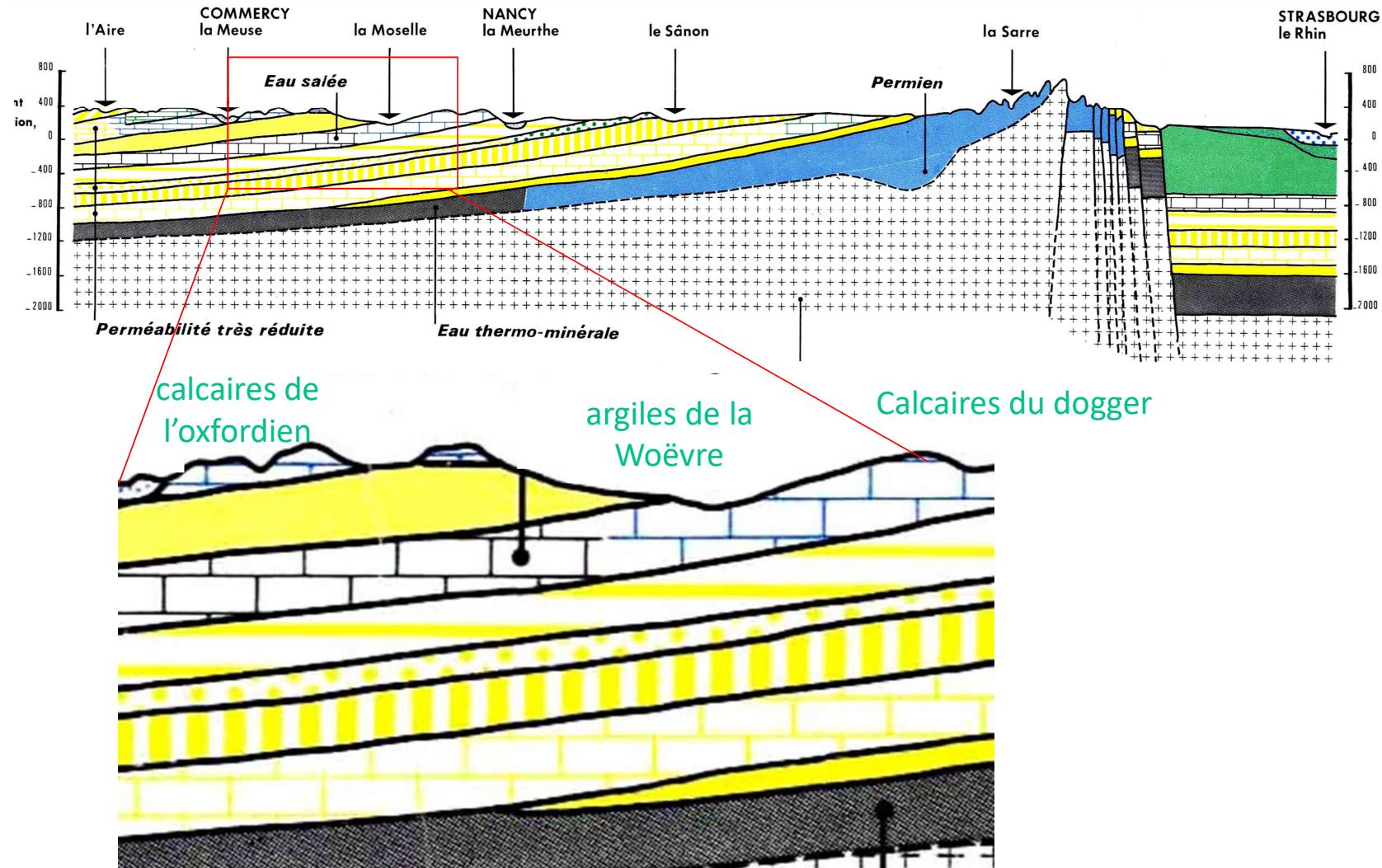
Généralement absence de ressources exploitables sauf
(eaux minérales de Vittel Contrexéville)

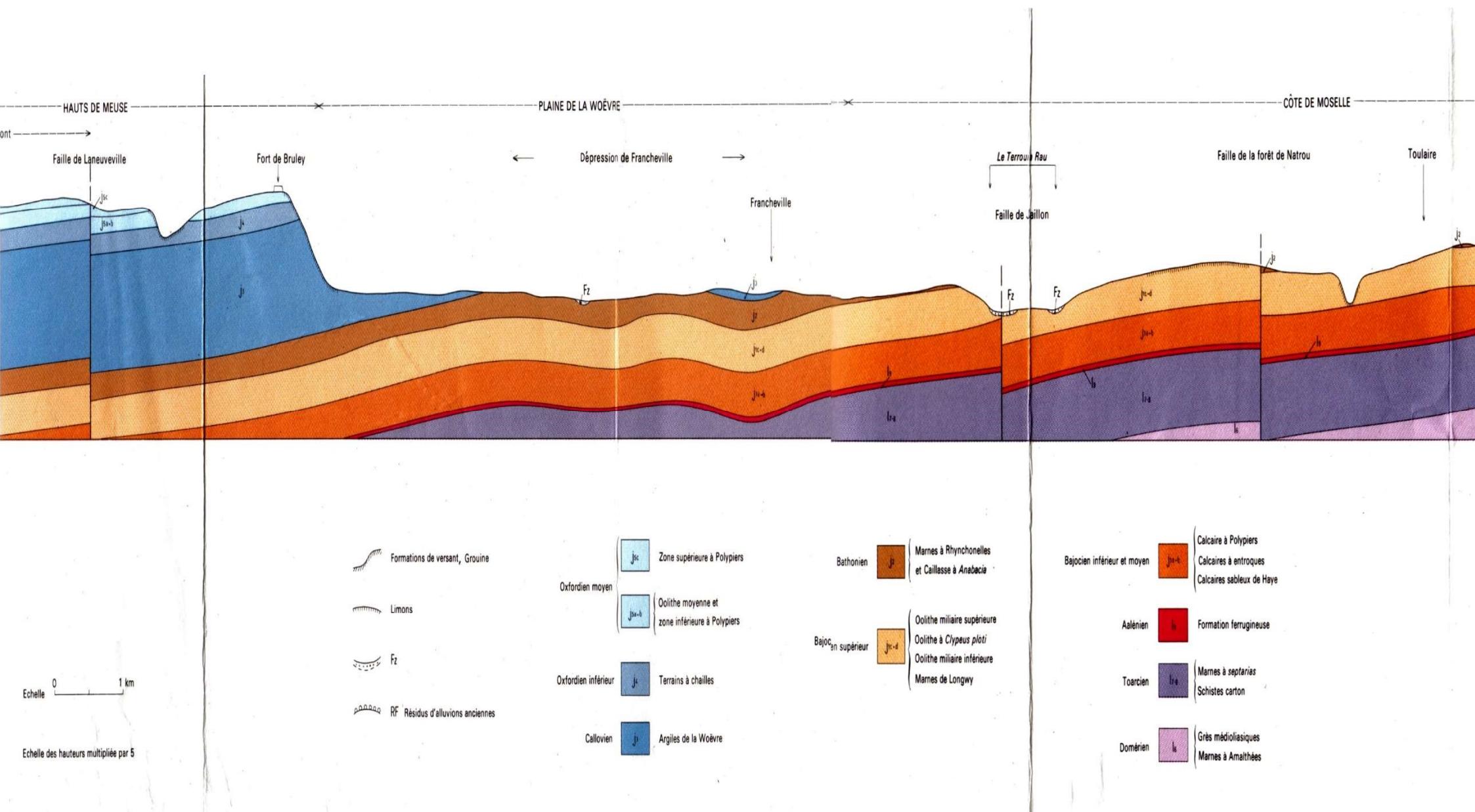
Ressource largement exploitée en Lorraine.
Productivité variable en affleurement, forte
sous couverture.Salinité croissante vers l'Ouest

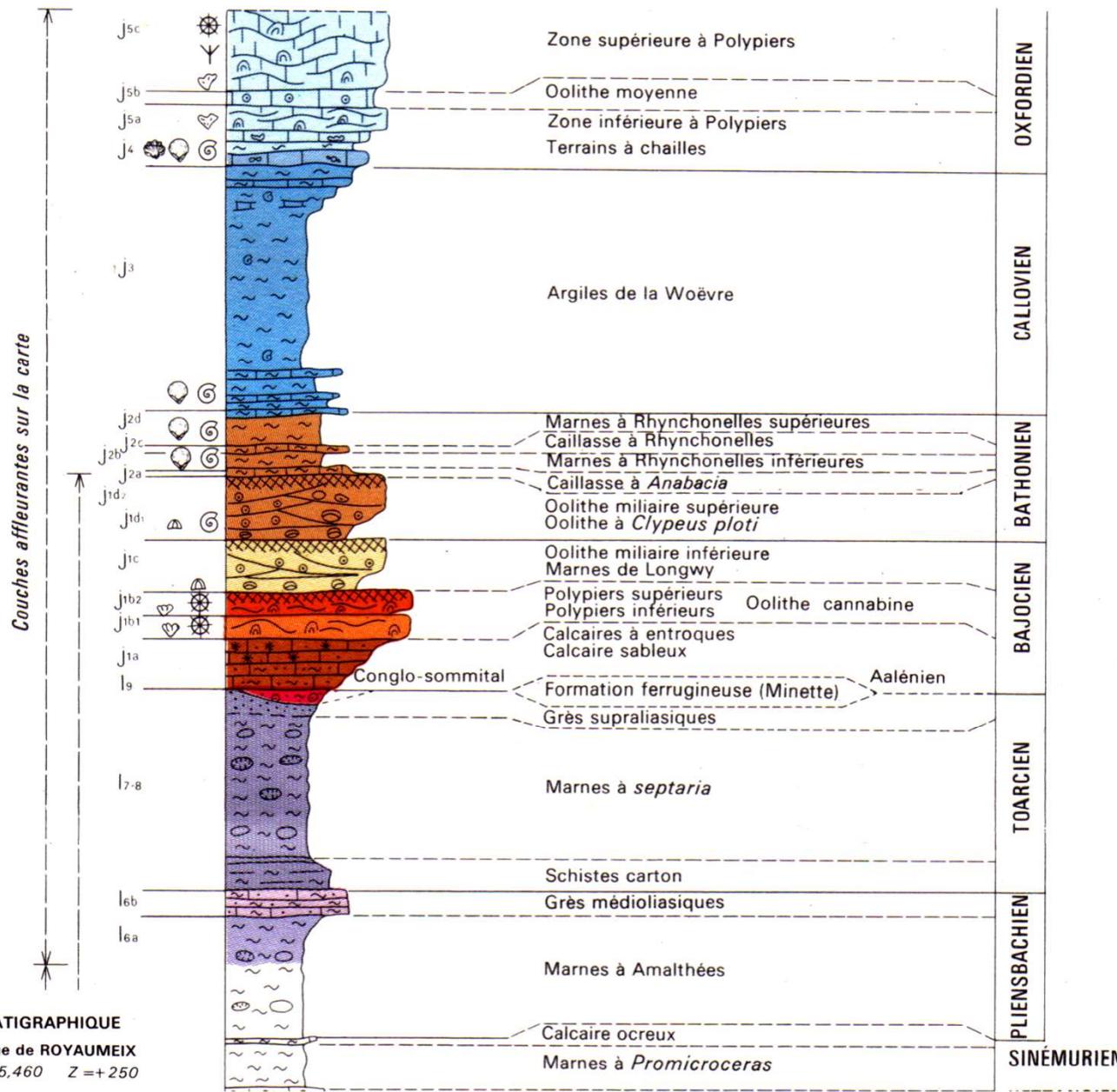
Eau dans les zones de fractures et arènes
granitiques des Vosges et dans les schistes
altérés des Ardennes.Faible productivité



COUPE HYDROGEOLOGIQUE SCHEMATIQUE







RESSOURCES DU SOUS-SOL ET EXPLOITATIONS

HYDROGÉOLOGIE

Pluviométrie

La carte Pont-à-Mousson est caractérisée par une pluviométrie relativement faible pour la région. Inférieure à 700 mm dans tout le tiers nord-est de la carte, elle croît vers le Sud-Ouest pour atteindre 800 mm dans la plaine de la Woëvre sous l'influence de la côte de Meuse.

Hydrologie

La totalité de la feuille correspond au bassin-versant de la Moselle. Celle-ci s'écoule du Sud vers le Nord sur la bordure est de la feuille. Le réseau hydrographique est constitué essentiellement par deux affluents de rive gauche : le ruisseau d'Esch et, dans une moindre mesure, le Rupt de Mad pour la partie nord-ouest de la carte.

Le débit moyen annuel de la Moselle à Blénod-lès-Pont-à-Mousson est de 100 m³/s (période 1964-1970) ; les débits mensuels d'étiage de fréquence 0,5-0,2 et 0,1 sont respectivement de 22,3-14,2 et 11,2 m³/s (station hydrométrique gérée par la DRIR).

Le débit moyen annuel de l'Esch à Jezainville (période 1964-1977, station hydrométrique gérée par le SRAEL) est de 1,06 m³/s ; les débits mensuels d'étiage pour des fréquences de 0,5-0,2 et 0,1 sont respectivement de 0,17-0,11 et 0,09 m³/s.

Les relations hydrauliques entre l'Esch et les formations qu'il traverse sont complexes : drainant dans certaines portions de son cours, il est en position d'alimentation dans d'autres (en particulier à l'aval de Gézoncourt et à l'amont de Saint-Jean).

Du point de vue qualitatif (d'après l'inventaire de 1976 dressé par la mission déléguée de Bassin Rhin-Meuse) les eaux de la Moselle sont de qualité passable (classe 2) à l'amont de Pont-à-Mousson, de qualité médiocre (classe 3) à l'aval de Pont-à-Mousson. Les eaux de l'Esch sont de bonne qualité (classe 1B) à l'amont de Jézainville et deviennent médiocres au niveau de Blénod-lès-Pont-à-Mousson où les rejets industriels les dégradent rapidement.

Hydrogéologie

Deux aquifères principaux sont présents sur la feuille Pont Mousson :
– les calcaires du Dogger,
– les alluvions de la vallée de la Moselle.

Les calcaires du Dogger. En affleurement, ils couvrent toute la partie centrale de la feuille et donnent naissance à de nombreuses sources.

Les sources. Bien qu'il n'y ait pas à proprement parler de couches imperméables continues (variations latérales de facies) entre les différents niveaux du Dogger, par le biais des perméabilités relatives plusieurs aquifères peuvent s'individualiser au sein des calcaires du Dogger et donner naissance à des sources de déversement.

Ainsi, au Nord-Ouest de la feuille, le niveau des Caillasses à *Anabac* (Bathonien inférieur) est marqué par une ligne de sources dans la région de Maizerais et Lahayville. De même, des émergences existent au contact de l'Oolithe miliaire supérieure et du Pseudo-Bâlin (Flirey, Nord Rosières-en-Haye) et entre Oolithe miliaire inférieure et Marnes de Longwy.

Mais le niveau aquifère essentiel est constitué par les calcaires à polypiers et entroques du Bajocien inférieur qui, au contact des formations liasiques, donnent, sur la bordure est du plateau de Haye, de très nombreuses sources de déversement ou de débordement, selon la structure des terrains. Leur régime est fortement marqué par leur condition d'émergence.

La couverture d'éboulis qui tapisse le coteau masque le contact entre Bajocien et Lias et les sources émergent en contrebas, à la limite inférieure de la frange d'éboulis.

Les potentialités aquifères des calcaires du Dogger. A la suite de recherches par forage demeurées infructueuses, plusieurs études ont été réalisées surtout dans la moitié sud de la feuille, afin de cerner les potentialités aquifères des calcaires du Dogger.

Le caractère karstique de la formation est attesté par l'existence de nombreuses cavités et les pertes observables sur les ruisseaux ; il est, de plus, démontré, dans la région de Rosières-en-Haye, par des traçages (réalisés par le SRAEL et l'université de Nancy I) faisant apparaître des circulations souterraines, d'Ouest en Est, sur plus de 10 km. Les vitesses de circulation des eaux sont comprises entre 10 et 20 m/h.

Dans la région de Saizerais, la nappe du Dogger est drainée par les travaux d'exploitation du minerai de fer de la mine de Saizerais. A noter que depuis l'arrêt de l'extraction du minerai et l'ennoyage de la mine, les teneurs en sulfates et la dureté de l'eau au trop-plein de la mine ont tendance à augmenter.

Les études effectuées montrent qu'il est peu intéressant d'exploiter la nappe des calcaires du Dogger sur le plateau de Hayes (forages de 100 à 200 m avec des débits inférieurs à 5 m³/h) mais que, par contre, certains secteurs de la vallée de l'Esch peuvent fournir, à partir de forages d'une trentaine de mètres des débits compris entre 20 et 50 m³/h.

Commune	Indice code minier	Altitude au sol (m)	Situation	Débit (m ³ /h)	Débit spécifique (m ³ /h/m)	Formation captée
Domèvre-en-Haye	193.6.7	303	Plateau de Haye	1,6	0,21	Bathonien-Bajocien
Griscourt	193.7.53	203	Vallée de l'Esch	17,4	12,4	Bajocien
Jezainville	193.8.101	187	Vallée de l'Esch	14,0	6,6	Bajocien

Les eaux du Dogger ont un faciès bicarbonaté calcique. Le pH, légèrement basique, varie entre 7,2 et 7,5. La dureté est voisine de 30°F, le résidu sec d'environ 450 mg/l. Le fer est présent à des teneurs voisines ou légèrement supérieures à la norme. Sur le plan physico-chimique, ce sont des eaux potables généralement dures et incrustantes.

D'un point de vue bactériologique, compte-tenu du caractère karstique de l'aquifère et des conditions d'émergence de certaines sources, une surveillance attentive des points de prélèvements doit être réalisée.

Les alluvions. Sur la feuille Pont-à-Mousson, seule la vallée de la Moselle présente des niveaux d'alluvions ayant un intérêt hydrogéologique.

Les alluvions anciennes, en terrasse, ne sont guère productives et alimentent tout au plus quelques puits destinés à l'abreuvement des troupeaux.

Les alluvions récentes, comblant la vallée, ont une épaisseur moyenne d'environ 6 m et peuvent fournir des débits importants (jusqu'à 100 m³/h par ouvrage). Elles sont peu exploitées pour l'alimentation en eau potable (puits du syndicat d'Atton et AEP de Blénod-lès-Pont-à-Mousson) mais elles fournissent une part importante de l'eau industrielle (centrale thermique de Blénod-lès-Pont-à-Mousson, par exemple). En outre, de nombreux puits les captent pour l'alimentation du bétail.

Le niveau d'eau est généralement compris entre 1 et 3 m sous la surface du sol et les fluctuations annuelles sont de l'ordre du mètre.

Les eaux présentent des caractéristiques physico-chimiques très variables d'un point à l'autre ($1\ 000 < \text{résistivité (ohms.cm)} < 5\ 000$), conséquence des activités industrielles développées dans la vallée.

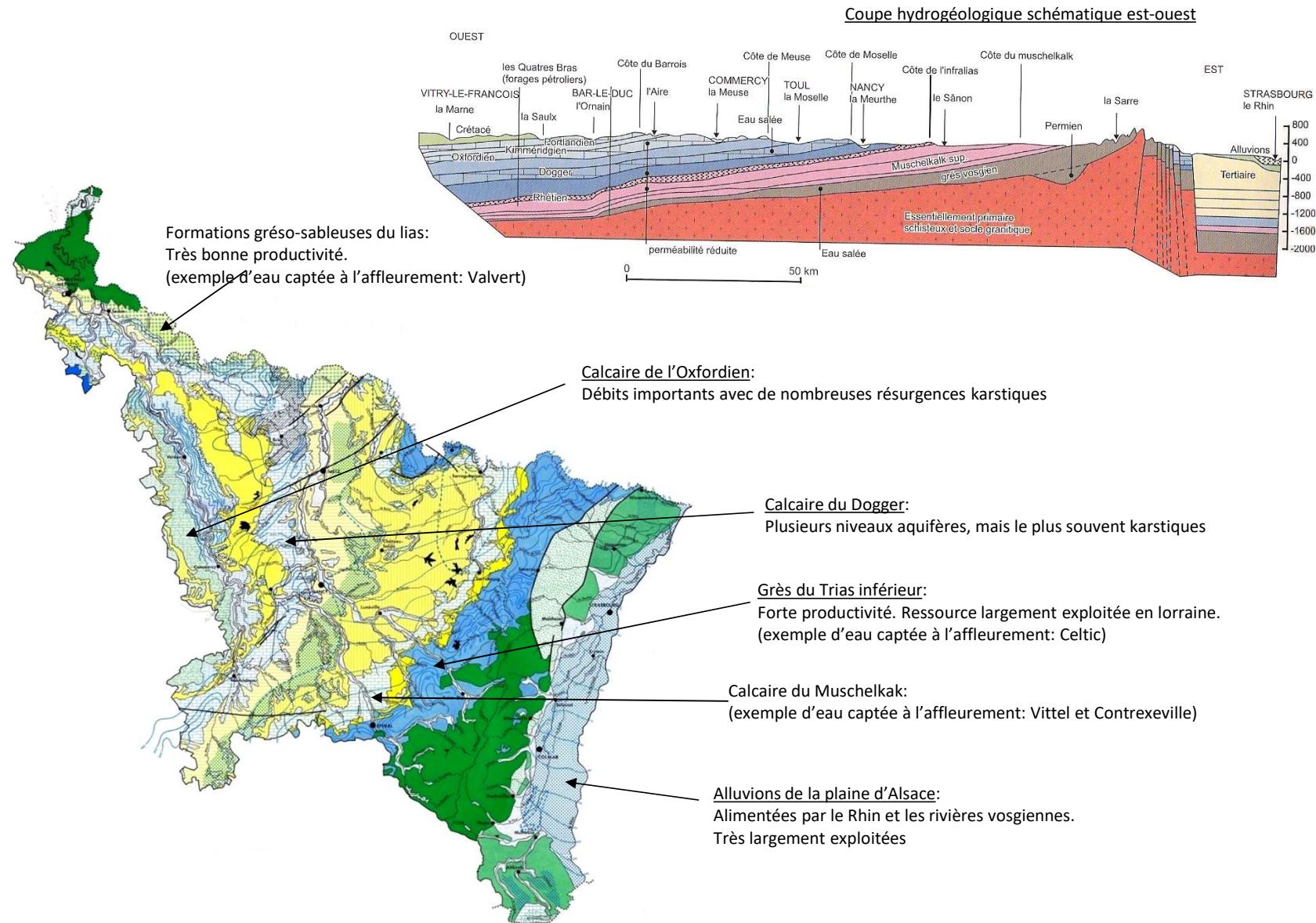
De plus, la mise en grand gabarit de la Moselle, l'exploitation de sables et graviers et le remblaiement des gravières affectent fortement cet aquifère tant sur le plan hydrodynamique que physico-chimique.

Alimentation en eau des collectivités

Sur les 59 communes que comporte, en totalité ou en partie, la feuille Pont-à-Mousson, plus de la moitié d'entre-elles est groupée en syndicats. La quasi-totalité des communes (55 sur 59) est alimentée par les eaux des calcaires du Dogger à partir de captages de sources, forage ou encore exhaure minier. Le tableau suivant donne le nombre des communes en fonction du mode d'alimentation et de la nature du point d'eau utilisé.

Nombre de communes	Type d'alimentation	Nature du point d'eau utilisé
28	Syndicat de Trey Saint-Jean	Deux sources
3	Syndicat d'Atton	Puits dans les alluvions de la Moselle
1	Syndicat Sainte-Geneviève	Une source
27	Autonomes	Source (16 communes) Puits (1 commune) Forages (11 communes) Exhaure de mine (2 communes)

Les principales masses d'eau de l'est de la France avec leurs caractéristiques



Aquifère

DEFINITION DE QUELQUES NOTIONS CLEFS

Aquiclude : corps de roches saturées, très faiblement conducteur d'eau souterraine et à travers lequel aucun flux de drainance significatif ne peut passer.

Aquifère : corps de roches perméables comportant une zone saturée (ensemble du milieu solide et de l'eau contenue), suffisamment conducteur d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine.

Aquitard : corps de roches peu perméables (faiblement conducteur d'eau souterraine) et à travers lequel un flux de drainance non-négligeable (quantifiable) peut passer

Capacitif : définit la contenance en eau gravitaire d'un aquifère, en fonction de son volume total de roche saturée et de son coefficient d'emmagasinement.

Porosité : propriété d'un corps, d'un milieu, de comporter des vides interconnectés ou non, exprimée quantitativement par le rapport du volume de ces vides au volume total du milieu.

Les caractéristiques lithostratigraphiques des roches réservoir déterminent la géométrie, la structure ainsi que les propriétés hydrauliques et géochimiques de l'aquifère. Le réservoir remplit 3 types de fonctions vis-à-vis des eaux souterraines:

-une fonction capacitive ou réservoir: elle caractérise l'emmagasinement souterrain de l'eau qui régit à la fois le stockage et la libération de l'eau souterraine. Cette propriété du réservoir correspond à la porosité.

-une fonction conduite: elle caractérise l'écoulement de l'eau souterraine depuis la zone d'infiltration (zone de recharge) jusqu'à l'exutoire (zone de décharge) naturel ou artificiel. Cette propriété du réservoir correspond à la perméabilité.

-une fonction d'échanges: elle caractérise les processus physico-chimiques d'interactions entre l'eau souterraine et la roche réservoir tels que les échanges thermiques, les processus géochimiques de dissolution, de précipitation, d'échanges ioniques et les phénomènes hydrobiologiques (auto-épuration).

Notion d'aquifère

Caractérisation de l'aquifère

Aquifère : Système hydrogéologique identifié par un domaine d'espace souterrain fini et continu (le réservoir)

→ **Configuration** : contours, dimension, nature des limites géologiques

→ **Localisation** : altitude et profondeur des limites géologiques

→ **Structure** déterminée par la lithologie

→ **Caractéristiques physiques** : pétrologie, granulométrie

→ **Géochimie** : présence de sels solubles

→ **Structural** : déformation, fissures

Les vides du réservoir : pores et fissures

Première fonction du réservoir : stockage et libération de l'eau souterraine

- L'eau est stockée et circule dans les vides du réservoirs qui peuvent être caractérisés selon leur morphologie, leurs interconnections et leur genèse.
- On distingue des vides générés par la porosité du matériaux et ceux générés par la présence de fissures

Remarque : porosité et perméabilité sont deux notions différentes : volume/capacité d'écoulement (pierre ponce : très poreux, sans interconnexion)

Pores

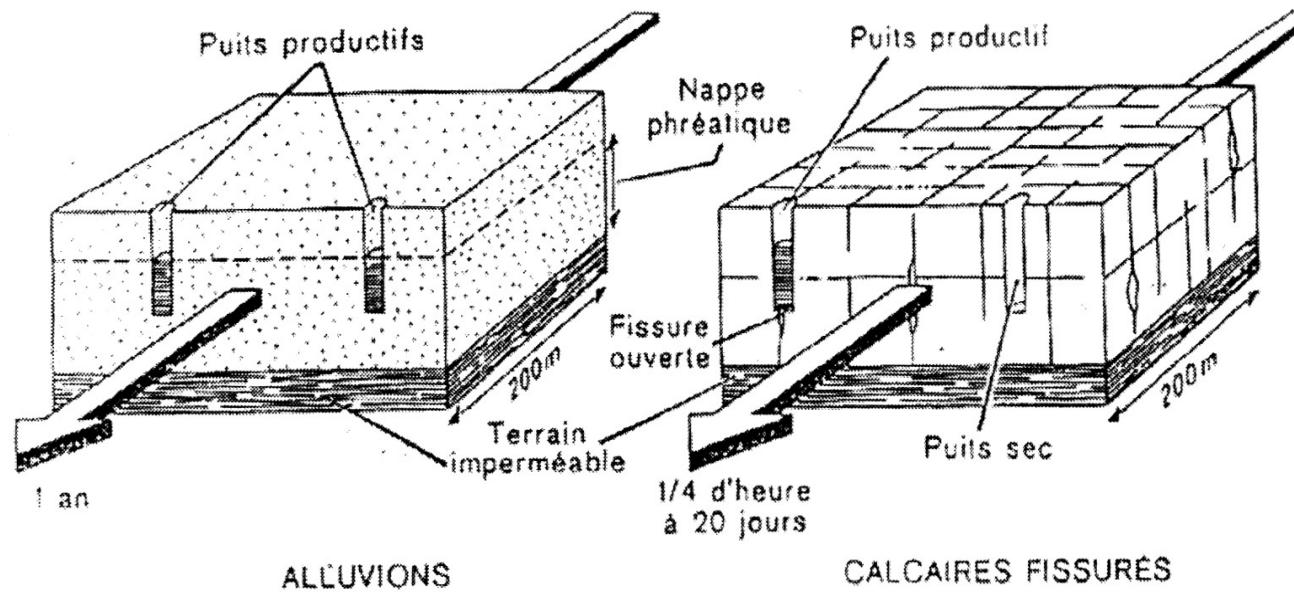
- Espaces de petites dimensions ménagés entre les particules solides
- Ces espaces communiquent entre eux, permettant la circulation de l'eau
- Un milieu poreux est donc caractérisé par sa continuité

Fissures

- Fentes de forme allongée, d'origine mécanique ou chimique
- Microfissures : diaclases, schistosités, organisées en réseau souvent comparable à un milieu continu
- Macrofissures : failles, non connectées

Aquifère

Les vides du réservoir : pores, fissures et la lithologie du réservoir



Roches meubles ou non consolidées

Présentent uniquement des pores dans milieux poreux généralement continu

Constituent de nombreuses formations hydrogéologiques

roches meubles : sables , grès peu consolidés, toutes les formations superficielles (alluvions, colluvions, éboulis, manteaux d'altération des roches cohérentes, limons de plateaux ...);

roches cohérentes poreuses : grès, craie...

Roches compactes cohérentes

elles sont généralement fissurées mais peuvent présenter un type mixte (ex.: calcaires détritiques, grès compacts)

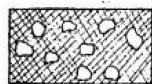
Roches carbonatées (calcaires) dont les fissures sont générées par des ***actions mécaniques*** et agrandies par la ***dissolution*** des carbonates de la roche (***karstification***) **Roches cristallines et volcaniques** où les fissures se localisent dans des zones de discontinuités , basaltes ...

Aquifère

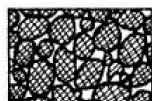
La porosité totale n [adimensionnelle (%)]

La porosité d'une roche représente l'ensemble de ses vides (pores) pouvant être occupés par un fluide.
Elle s'exprime quantitativement par le rapport du volume des vides au volume total du milieu (notion de volume).

$$n (\%) = \frac{V_p}{V_t} \times 100$$



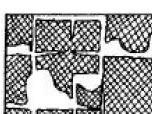
La porosité *vacuolaire* ou porosité *close*, où les vides sont indépendants les uns des autres (porosité non connectée).



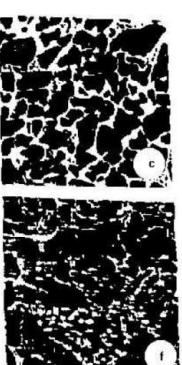
La porosité *d'interstices* est celle des vides intergranulaires qui s'observe dans les sables, les alluvions, les moraines...



La porosité *de fissures* est celle due aux diaclases et aux joints de stratification observés dans les granites, basaltes, calcaires...et autres roches consolidées



La porosité *de conduits* est la macroporosité due à l'élargissement des fissures par dissolution et permettant une circulation accélérée (karst ouvert).

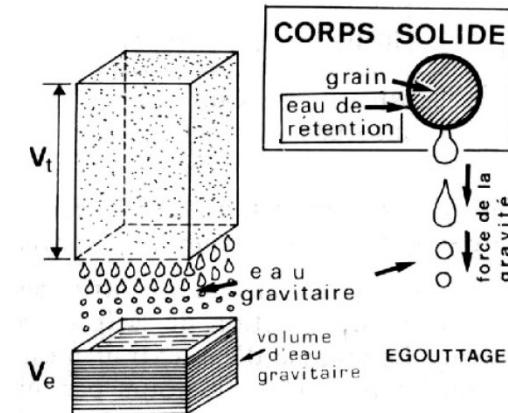


Coupes d'échantillons de grès poreux obtenues à différentes profondeurs :

- a: profondeur 1000-1500m: 27%
- b: profondeur 1700-1900m: 23%
- c: profondeur 2000-2300m: 18%
- d: profondeur 2500-2700m: 16%
- e: profondeur 2800-3000m: 13%
- f: profondeur <3000m: 10%

On définit également la **porosité efficace n_e** , permettant l'écoulement libre de l'eau (correspond à la porosité connectée).

$$n_e (\%) = \frac{V_e}{V_t} \times 100$$

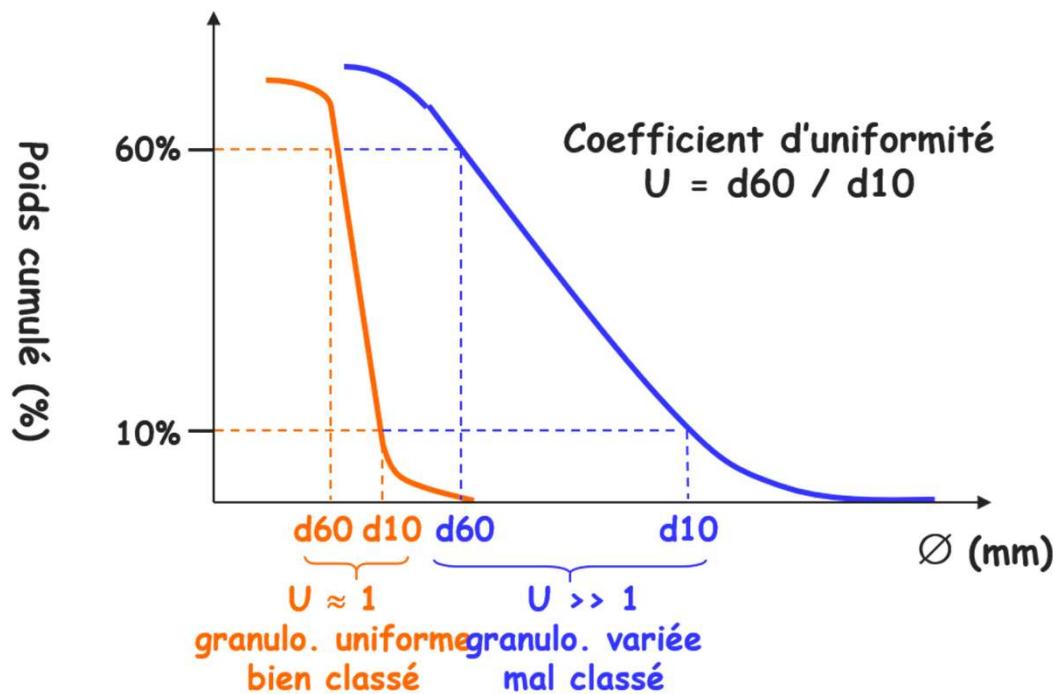


Un échantillon d'aquifère, saturé en eau, de volume total V_t , libère par égouttage sous l'action de la force de la gravité, un volume d'eau, V_e , dit eau gravitaire

→ Exercice

Porosité totale

- La porosité totale dépend également de la répartition granulométrique
- la porosité efficace dépend du diamètre efficace d_{10}



I1 Calcul des paramètres granulométriques

La courbe granulométrique permet de calculer deux paramètres granulométriques principaux : le diamètre caractéristique (dx) et le coefficient d'uniformité (CU).

Le diamètre caractéristique (dx), en mm, correspondant à un pourcentage en poids cumulés, choisi en ordonnées. Le plus utilisé est le diamètre efficace, d10, obtenu par la valeur 10 % des poids cumulés. D'autres diamètres caractéristiques peuvent être calculés comme le diamètre D60.

Le coefficient d'uniformité (CU), sans dimension, est calculé par l'expression ci-dessous :

$$CU = D60 / d10 \quad (2)$$

2.2.3.6. Emploi et signification des paramètres granulométriques

Le diamètre efficace représente conventionnellement le diamètre moyen, représentatif des grains d'un échantillon de roche meuble, de granulométrie variée. Il permet leur identification par une donnée numérique plus précise que l'interprétation globale. Il exprime le poids de la phase granulométrique, égal à 10 % du poids total de l'échantillon, inférieur à ce diamètre. La valeur d10 a été fixée conventionnellement par des études en laboratoire, en considérant que les grains fins, entraînés par l'eau en mouvement, obstruent les pores réduisant ainsi leurs dimensions. De même dans les captages ils provoquent leur colmatage et leur ensablement. Par convention, si le coefficient d'uniformité est compris entre 1 et 2, la granulométrie est dite uniforme. S'il est supérieur à 2 (ou 2,5) elle est variée (in Anonyme 3, 2011).

lebaut5; 15/09/2019

Aquifère

Porosité totale

- elle ne dépend pas directement de la granulométrie
- l'inverse de la porosité correspond à la compacité
- elle dépend ,
 - du mode d'arrangement des grains : pour des grains de même taille, l'arrangement cubique ($n=47\%$) > arrangement rhomboédrique ($n=26\%$) ; ceci explique la diminution de la porosité avec la profondeur
 - de la forme des grains : La porosité augmente avec la sphéricité des particules

Types de sédiments	d_{10} (mm)	n (%)	n_e (%)	K (m/s)
Gravier moyen	2,5	45	40	3.10^{-1}
Sable gros	0,250	38	34	2.10^{-3}
Sable moyen	0,125	40	30	6.10^{-4}
Sable fin	0,09	40	28	7.10^{-4}
Sable très fin	0,045	40	24	2.10^{-5}
Sablesilteux	0,005	32	5	1.10^{-9}
Silt	0,003	36	3	3.10^{-8}
Silt argileux	0,001	38	-	$*1.10^{-9}$
Argile	0,0002	47	-	$*5.10^{-10}$

Limites conventionnelles :

-perméable

-imperméable

Porosité efficace

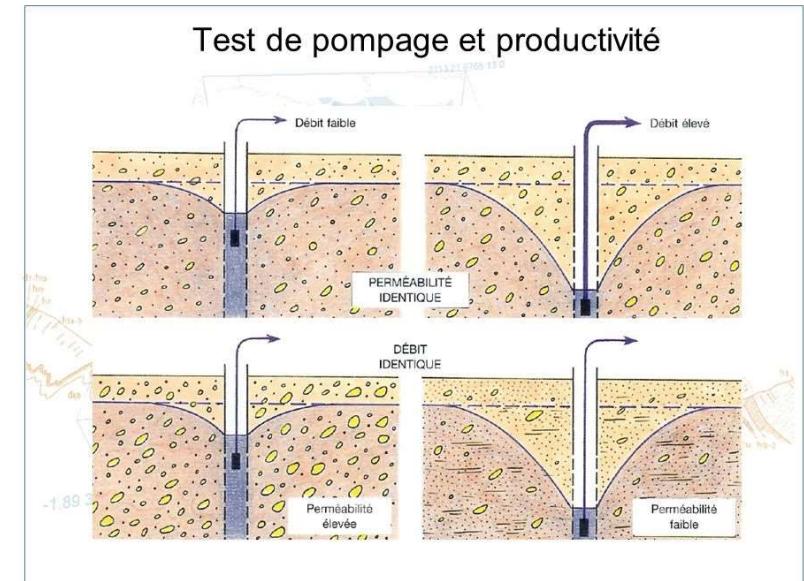
- Elle peut être appelé porosité utile
- elle est directement fonction de la granulométrie dans les roches meubles

Le coefficient d'Emmagasinement S [l]

→ Au cours d'essais de pompage, les variations du niveau piézométrique permettent de déterminer la quantité d'eau emmagasinée extractible.

→ Lors du pompage, le niveau piézométrique est abaissé induisant une variation de la charge Δh

→ S représente le coefficient d'emmagasinement : rapport du volume d'eau libéré par unité de surface sous une charge hydraulique égale à l'unité



Le coefficient d'Emmagasinement S [l]

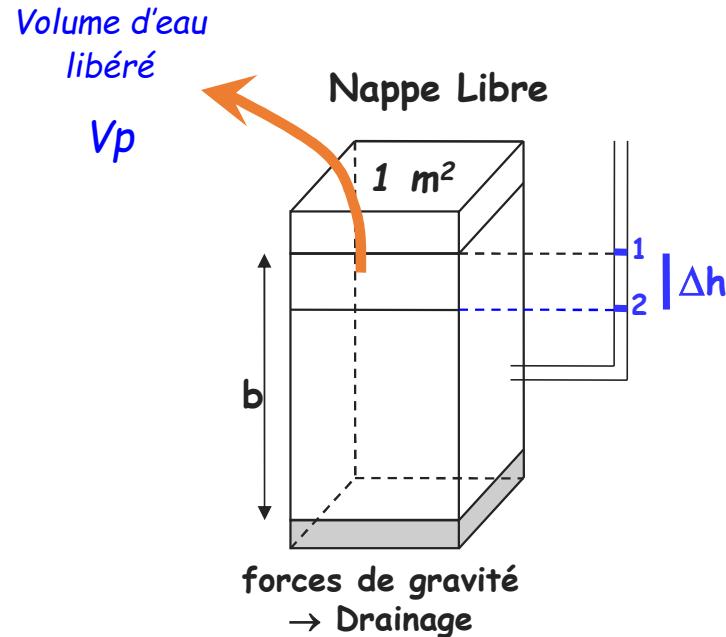
→ Dans le cas d'une nappe libre

- L'eau est libérée grâce à la gravité (drainage ou ressuyage)
- $S = n_e$ (porosité efficace)

→ Dans le cas d'une nappe captive

- L'eau est libérée par décompression
- Le volume d'eau libérée est plus faible
- Nappe très sensible au pompage

Emmagasinement [/]



Coefficient d'emmagasinement

$$S = (V_p / \text{m}^2) / \Delta h$$

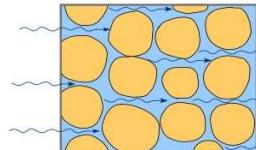
Nappe Libre : $S \rightarrow 0,2 \text{ à } 0,01$ (= $n_e \%$)

Perméabilité (notion d'écoulement)

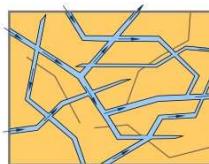
en **m/s** **[L.T⁻¹]**

Le coefficient de perméabilité (de Darcy), **K**, est un paramètre mesurant la perméabilité d'un corps vis-à-vis d'un fluide.

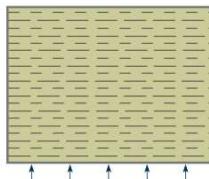
Les types de perméabilité



Perméabilité d'interstices
(aquifère)



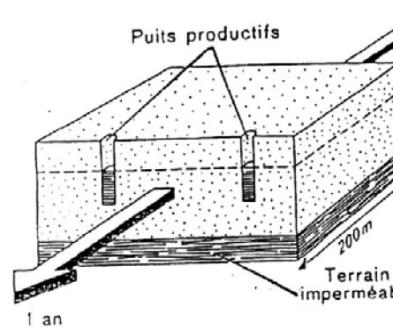
Perméabilité de fissures/fractures
(aquifère)



Argiles ou schistes
(aquiclude)

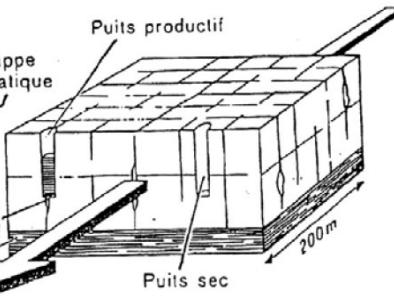
Vitesse d'écoulement des eaux souterraines

Alluvions



1 an

Calcaires fissurés



1/4 d'heure à 20 jours

Les flèches représentent des productions égales, avec indications des temps nécessaires à leur obtention

Quelques valeurs du coefficients de perméabilité de Darcy

Nature du matériau	Argiles	Limons	Sables fins	Sables moyens	Sables grossiers	Sables très grossiers
Diamètre moyen des grains (mm)	< 0,002	0,01 à 0,06	0,1 à 0,2	0,4 à 0,5	0,6 à 0,8	1 à 2
K m/s	< 10 ⁻⁹	1,8.10 ⁻⁷ à 6,6.10 ⁻⁷	1,8.10 ⁻⁵ à 7,3.10 ⁻⁵	2,9.10 ⁻⁴ à 4,4.10 ⁻⁴	6,6.10 ⁻⁴ à 1,2.10 ⁻³	1,8.10 ⁻³ à 7,3.10 ⁻³
K (mm/h)	< 0,004	0,66 à 2,4	66 à 260	1050 à 1600	2400 à 4200	6600 à 26400
Degré de perméabilité	nulle	médiocre	médiocre	bonne	bonne	bonne
Type de formations	imperméable	semi-perméables	semi-perméables	perméables	perméables	perméables

Les vides du réservoir : pores et fissures

Lithologie du réservoir

Caractéristiques physiques du milieu perméable

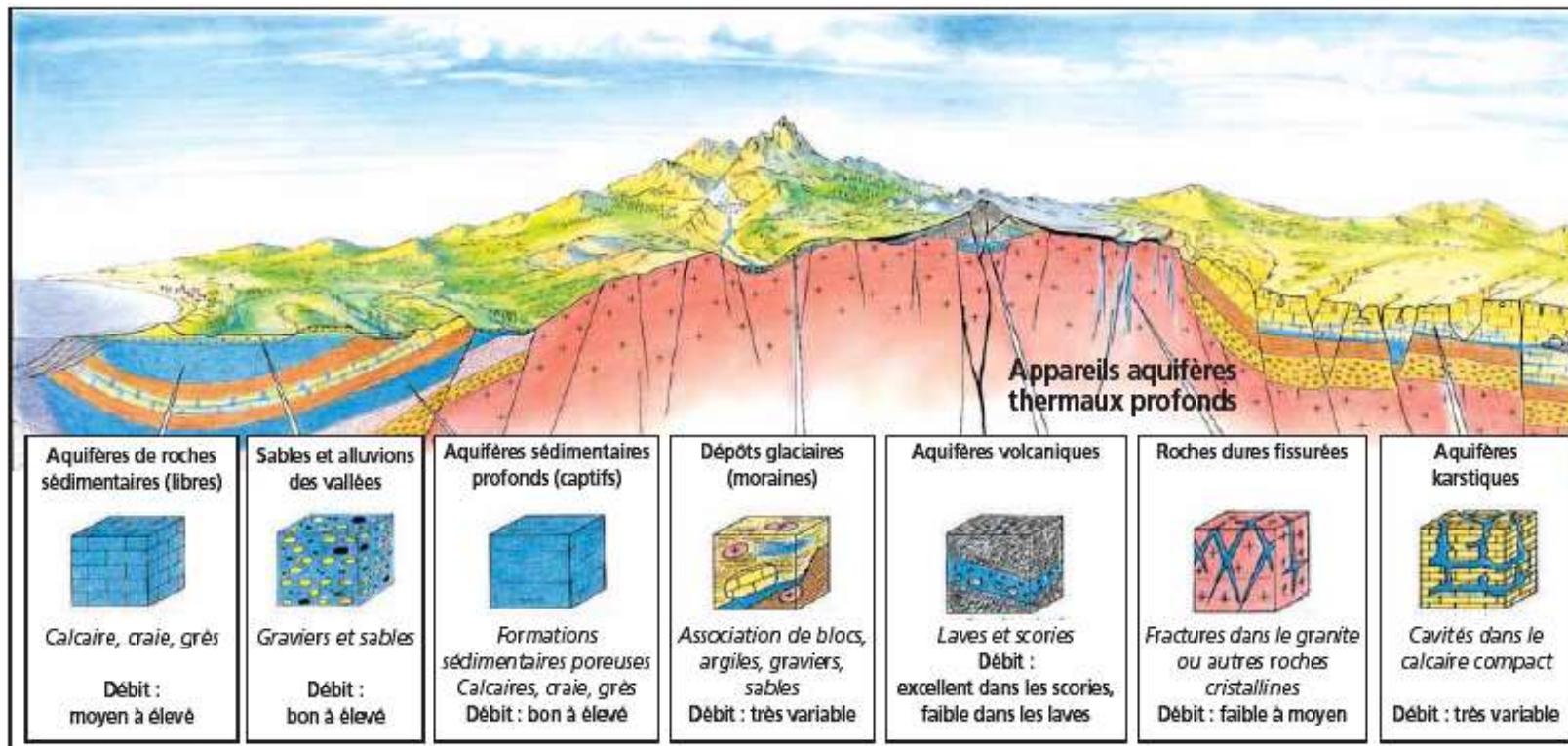
Continuité (cont. : discontinuité)

Isotropie (cont. : anisotropie) : caractéristiques physiques constantes dans toutes les directions

Homogène (cont. : hétérogène) : caractéristiques physiques constantes dans le sens de l'écoulement

Fin 1^{ère} séance

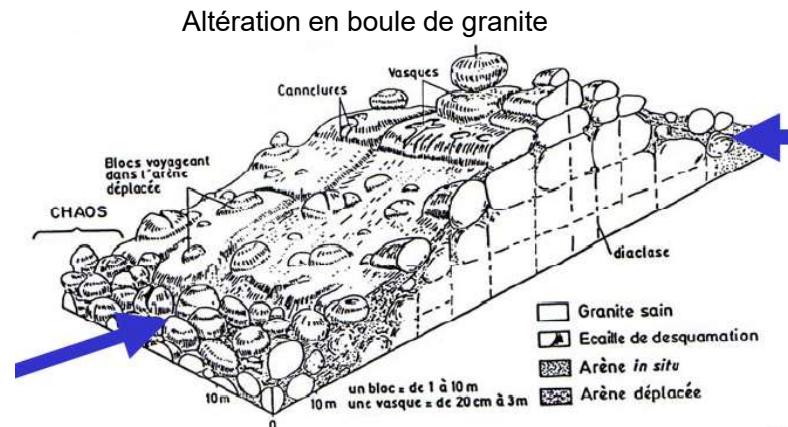
Les grands types d'aquifères



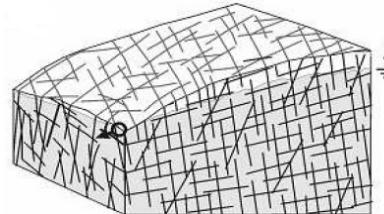
On peut retenir 3 grands types de formations aquifères :

- aquifères poreux
- aquifères fracturés
- aquifères karstiques

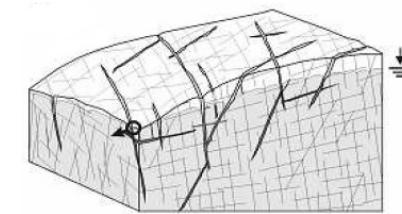
Aquifère de milieu fracturé (aquifère de socle)



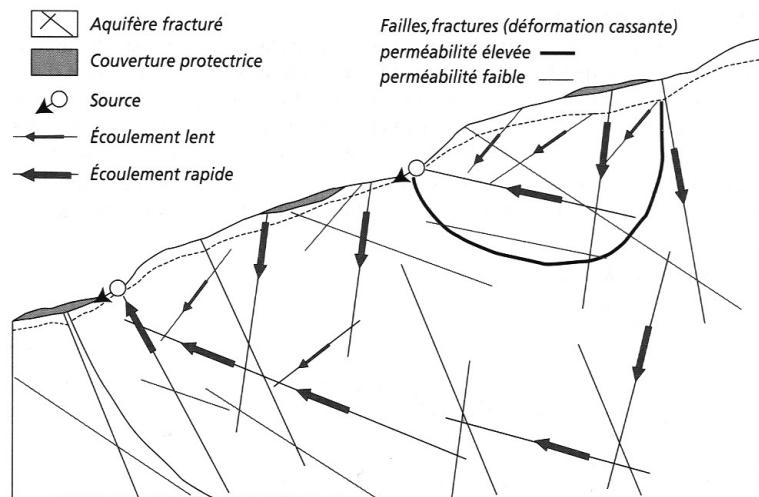
a) Milieu fissuré faiblement hétérogène



b) Milieu fissuré hétérogène



Exemple de roche fracturée

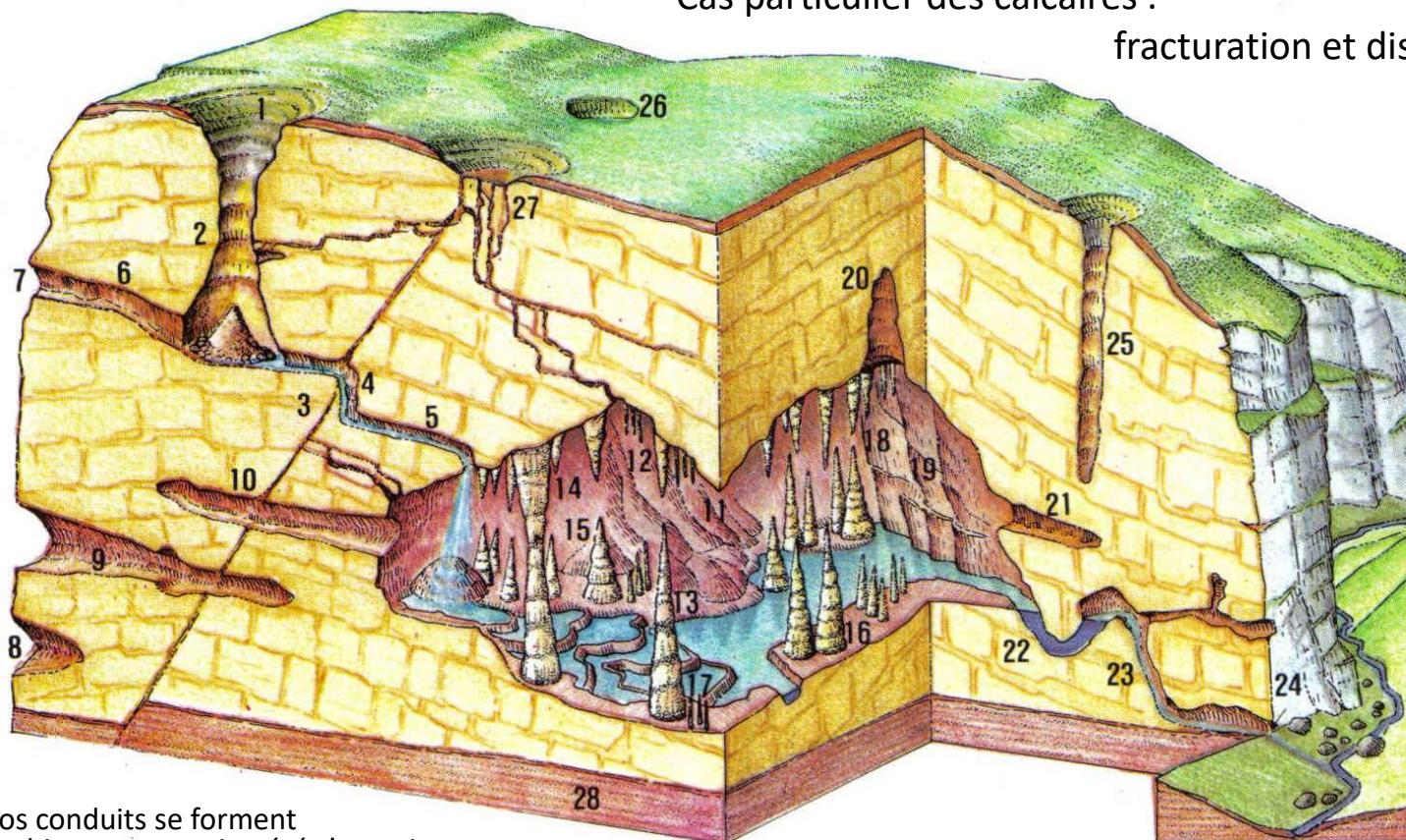


Il s'agit d'un milieu perméable hétérogène et discontinu, dans lequel l'eau peut s'écouler essentiellement à travers un réseau de fissures ouvertes, diversement connectées (réseau aquifère) dont les orientations sont distribuées en général de manière anisotrope.

Il se caractérise par une fissuration et par des conductivités hydrauliques et non par un coefficient de perméabilité (de Darcy).

Ces milieux peuvent aller d'une relative homogénéité, avec la présence de fractures à rôle équivalent, jusqu'à une double perméabilité avec de petites fractures connectées par des accidents plus transmissifs.

Cas particulier des calcaires : fracturation et dissolution



par dissolution, de gros conduits se forment
et un réseau hydrographique souterrain aéré s'organise ...

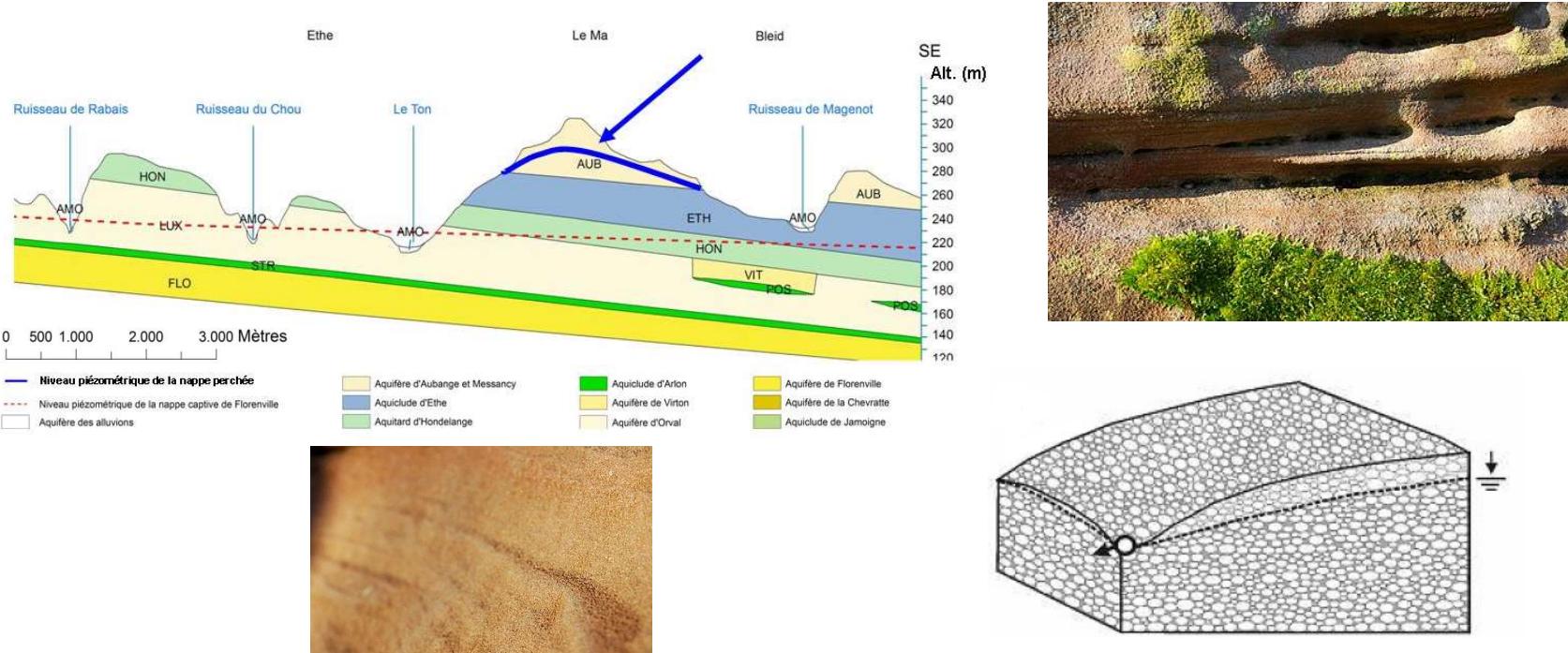
... avec tout un vocabulaire :

1. Aven ; 2. Aven et cavité en cloche avec éboulis ; 3. Galerie étagée ; 4. Cran de descente ; 5. Couloir ; 6. Étroiture ou chatière ; 7. Trou souffleur ; 8. Abri sous roche ; 9. Grotte ; 10. Caverne ; 11. Salle ; 12. Stalactite ; 13. Stalagmite ; 14. Colonne ; 15. Cierge ; 16. Trottoir et planches ; 17. Vasques ; 18. Lapiés de paroi ; 19. Draperie ; 20. Cheminée ; 21. Diverticule ; 22. Syphon ; 23. Galerie vive à cours d'eau ; 24. Résurgence ; 25. Abîme ; 26. Regard ; 27. Diaclases ; 28. Roche imperméable.

→ Méthodes de l'hydrologie

Aquifère de milieu poreux

Un milieu poreux est perméable comportant des vides interstitiels interconnectés, assimilables macroscopiquement à un milieu continu (à la différence d'un milieu fracturé) et caractérisable par un coefficient de perméabilité (de Darcy).



Les milieux poreux constituent une catégorie d'aquifère très divers. On les trouve le plus souvent dans des séries détritiques marines.

Elles sont caractérisées par une géométrie et une distribution des propriétés simples, dans lesquelles la variabilité verticale est faible et la variabilité horizontale est telle que les propriétés mesurées sont souvent extrapolables à plusieurs Km².

La caractéristique hydrodynamique majeur des milieux poreux est que, leur porosité interconnectées étant une propriété sédimentologique, l'écoulement se fait dans toute la section de l'aquifère, avec des vitesses relativement homogènes et faibles, du fait de la grande section de l'écoulement. En conséquence, la loi de Darcy peut s'appliquer à ces milieux.

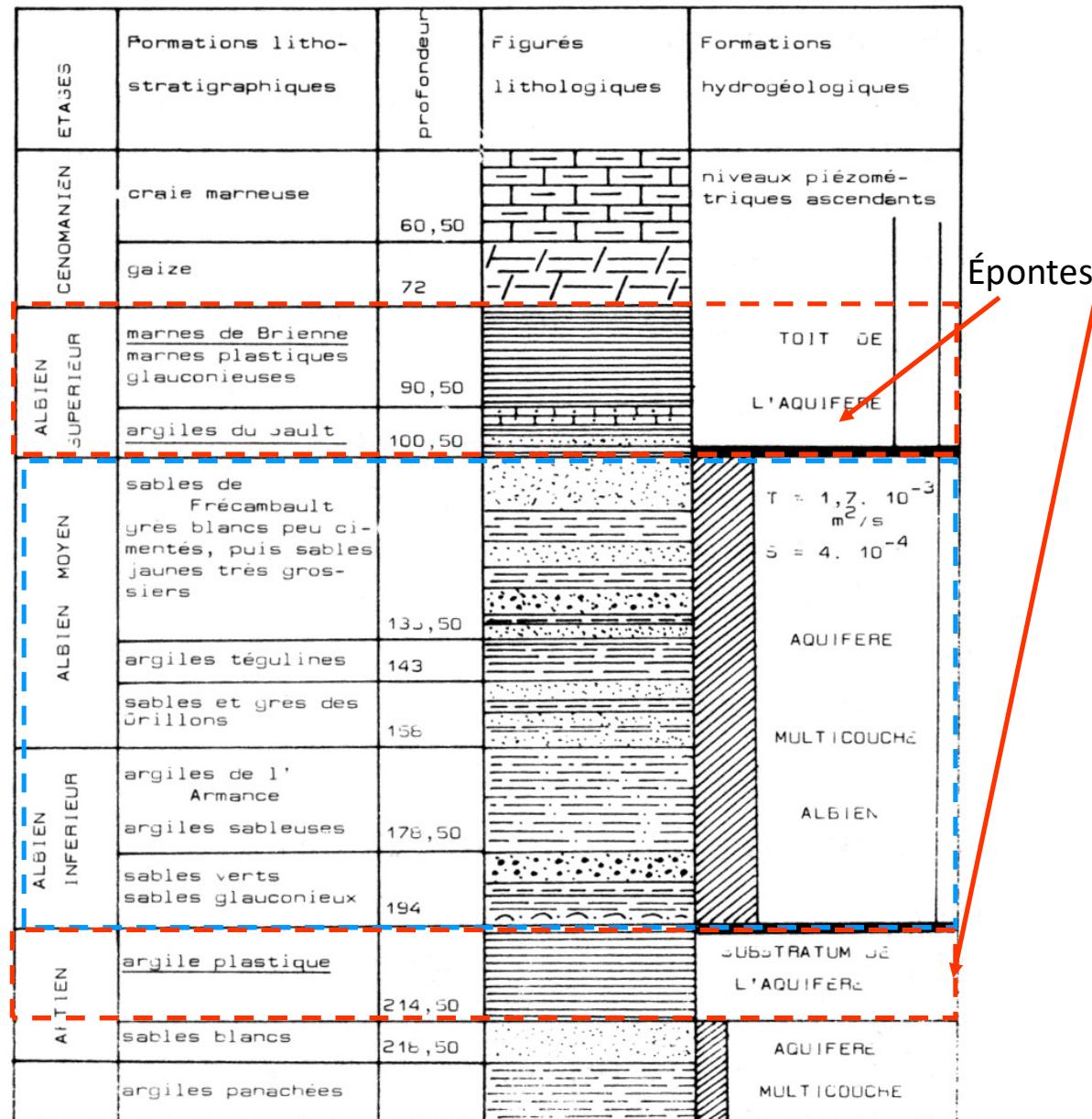
On observe souvent dans les dépôts alluvionnaires ou dans les bassins sédimentaires un système aquifère composé par une alternance de couches

aquifères et semi-perméables inter stratifiées et pouvant comporter plusieurs nappes libres ou semi-captive.

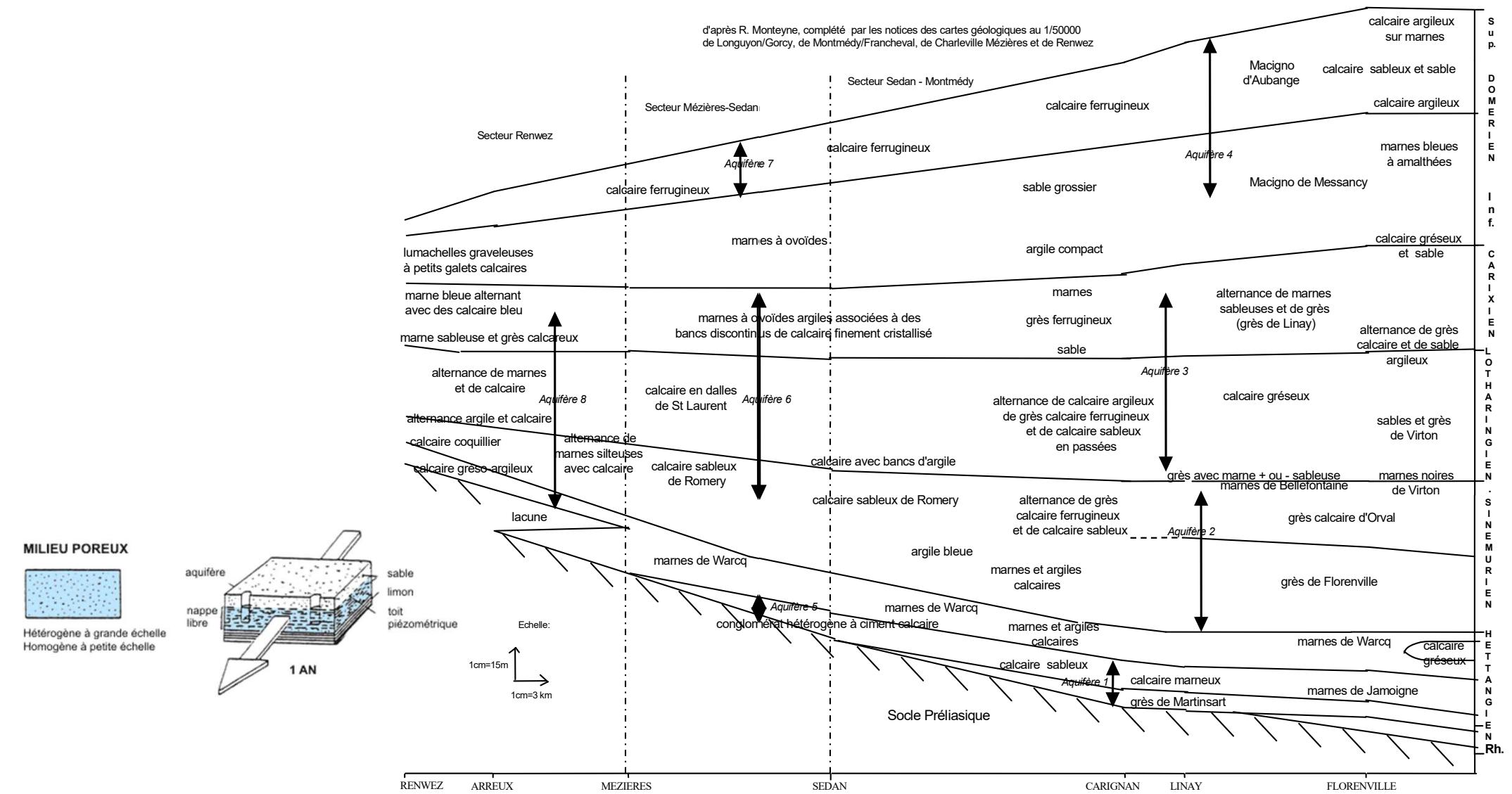
Notion d'aquifère multi-couche

Les bassins hydrogéologiques peuvent contenir plusieurs aquifères séparés par des couches imperméables

Un aquifère peut comporter plusieurs sous-ensembles séparés par des couches semi-perméables



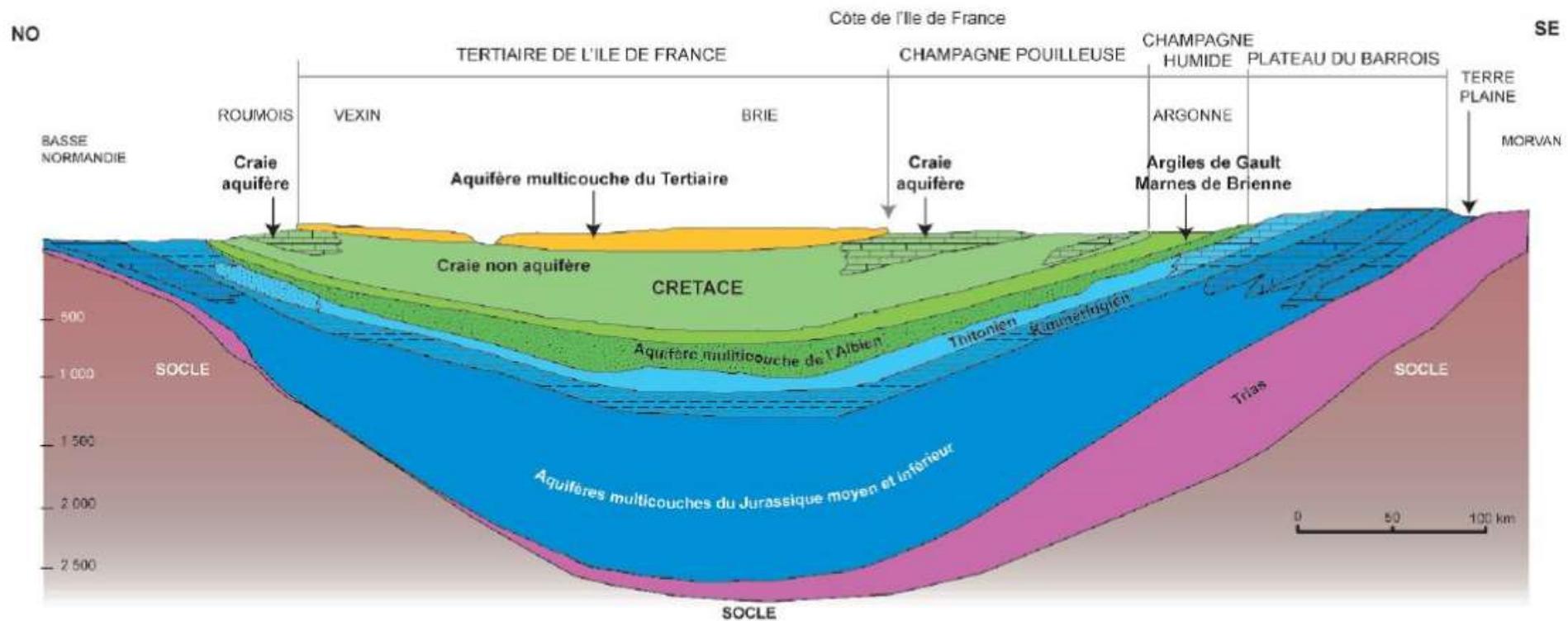
Exemple d'un aquifère multicouche : les Grès d'Ardenne-Luxembourg



Notion d'aquifère multicouche

COUPE SCHÉMATIQUE DES GRANDS AQUIFÈRES MULTICOUCHE DU BASSIN PARISIEN

Les couleurs sont en cohérence avec la carte géologique de la France au million



Caractérisation de l'aquifère - résumé

➤ **Dimensions / structure** : Trois ordres de grandeur sont à considérer

↳ *la formation hydrogéologique indépendante* identifiant *un aquifère*, avec un substratum (mur), voire un toit, ou *un semi-perméable* ou un imperméable; ex:

- Formation hydrogéologique perméable (alluvions)
- Formation hydrogéologique imperméable (argile du gault)

↳ *la combinaison de formations* : aquifère multi-couche

↳ *la combinaison de nombreuses formations* : structure hydrogéologique

➤ L'étude de **la perméabilité** est essentielle en ce qui concerne le réservoir et l'écoulement

↳ *Formation perméable* : gisement d'eau, origine des aquifères (graviers, alluvions, roches compactes fissurées)

↳ *Formation imperméable* : = limites des aquifères (argiles, marnes, schistes, eau non exploitables)

↳ *Formation semi-perméable* : toit ou substratum, permettant en fonction des conditions hydrodynamiques des transferts d'eau

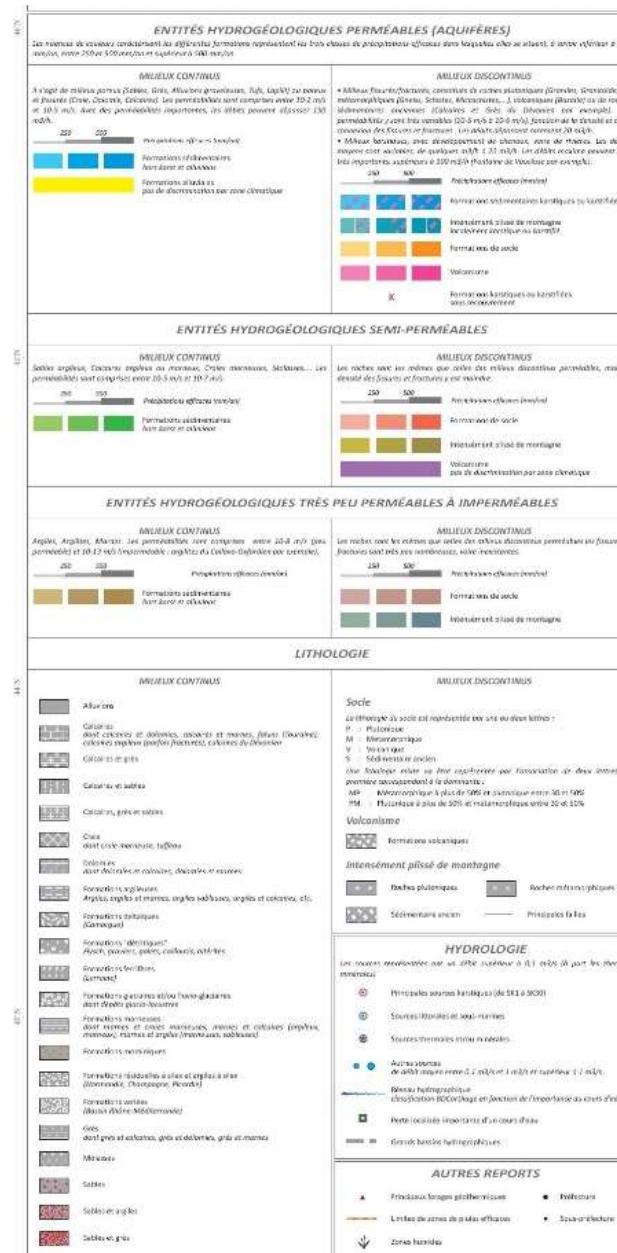
➤ **Limitation en profondeur de l'aquifère pour l'eau potable**

↳ Aspect économique : coût des sondages

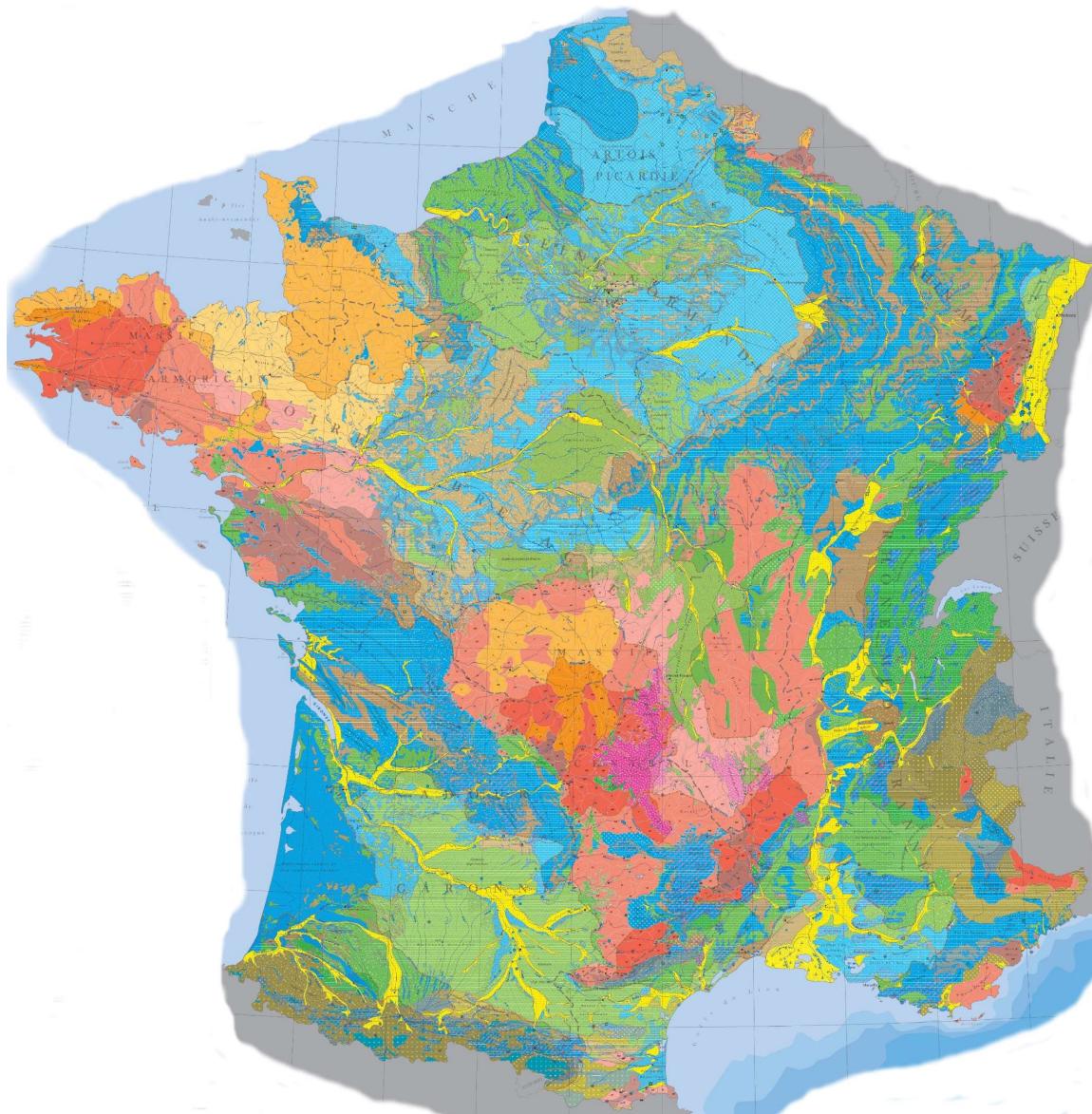
↳ Qualité des eaux souterraines : augmentation de la minéralisation avec la profondeur :
Bassin parisien 1690 m \Rightarrow 10000 mg/L, 2240 m \Rightarrow 35000 mg/L

↳ Modification physique de l'écoulement : cas des nappes dans la craie (fissures) ou dans le grès (pores) dont l'exploitation en profondeur est plus difficile (compression), colmatage ;

↳ en revanche : Exploitation des aquifères profonds pour la **géothermie**



Carte hydrogéologique de la France



Les nappes d'eau souterraine

Natural ground water resources in the upper layer of the Earth's crust by hydrodynamic zones

Continent	Zone ^a	Ground water resources, km ³ × 10 ⁶	Total resources of ground water, km ³ × 10 ⁶
Europe	1	0.2	1.6
	2	0.3	
	3	1.1	
Asia	1	1.3	7.8
	2	2.1	
	3	4.4	
Africa	1	1.0	5.5
	2	1.5	
	3	3.0	
North America	1	0.7	4.3
	2	1.2	
	3	2.4	
South America	1	0.3	3.0
	2	0.9	
	3	1.8	
Australia and Oceania	1	0.1	1.2
	2	0.2	
	3	0.9	

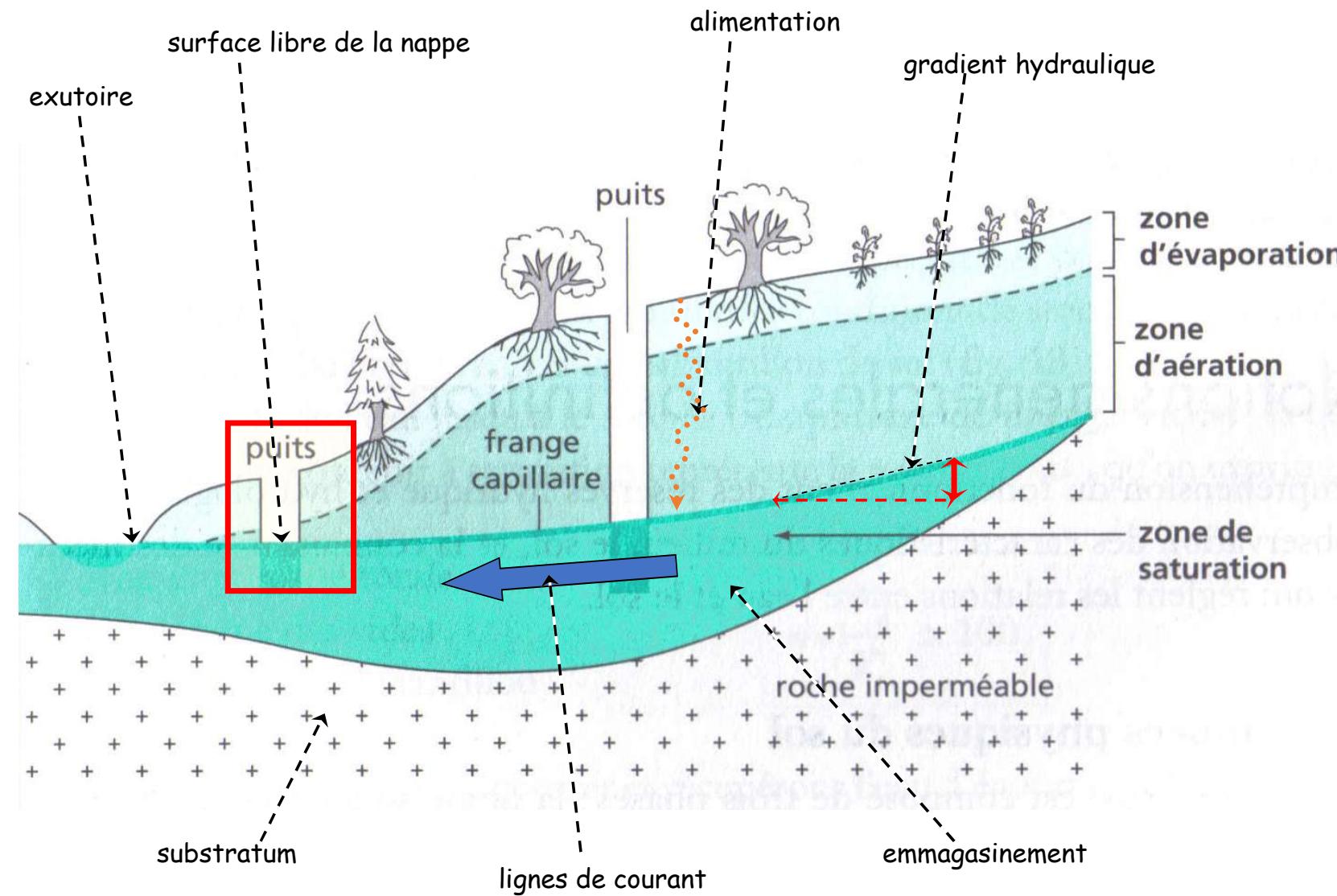
On peut distinguer 3 zones d'eau souterraines en fonction de leur dynamique :

.zone au dessus du niveau de base local dans laquelle l'eau est très dynamique et dont les caractéristiques dépendent étroitement des caractéristiques lithologiques de la roche (porosité efficace 15%).

.zone comprise entre la précédente et le niveau de la mer dans laquelle les échanges se font plus lentement (porosité efficace 12%).

.zone située entre le niveau de la mer et 2000m dans laquelle l'eau est fortement minéralisée (porosité efficace 5%).

Les nappes d'eau souterraine

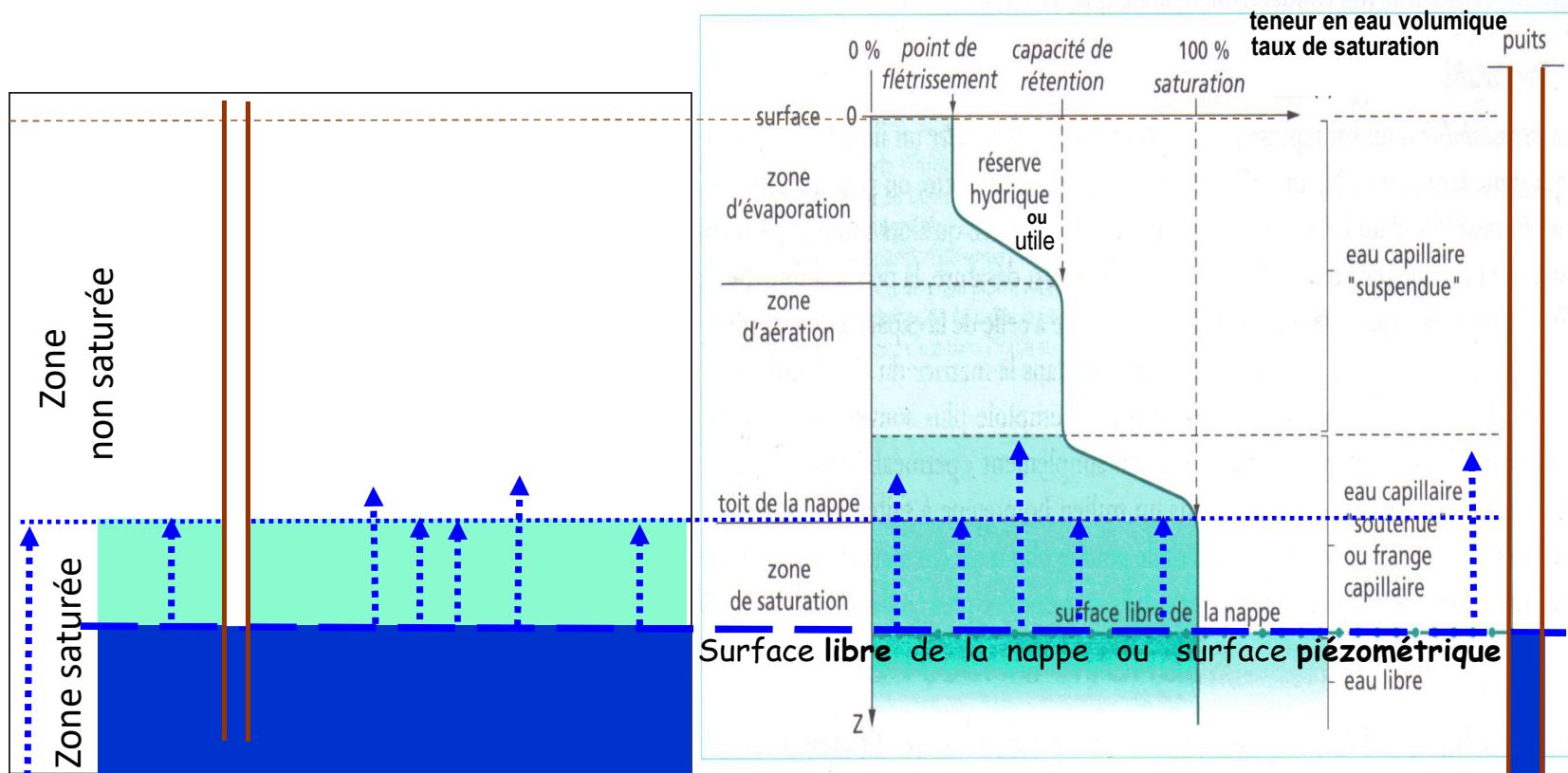


Les eaux souterraines proviennent essentiellement de l'infiltration des précipitations et des eaux de surface (rivières, lacs). Les nappes sont contenues dans certaines roches suffisamment poreuses ou fissurées pour contenir de l'eau → roches aquifères → composées de **2 zones**:

-une zone non saturée comprenant le sol et la partie supérieure de la roche aquifère. Dans cette zone, l'eau ne remplit pas l'intégralité des pores de la roche;

-une zone saturée dans laquelle les interstices de la roche sont complètement saturés d'eau. Cette eau contenue dans la roche prend le nom de nappe.

la surface libre de la nappe



Piezometry :

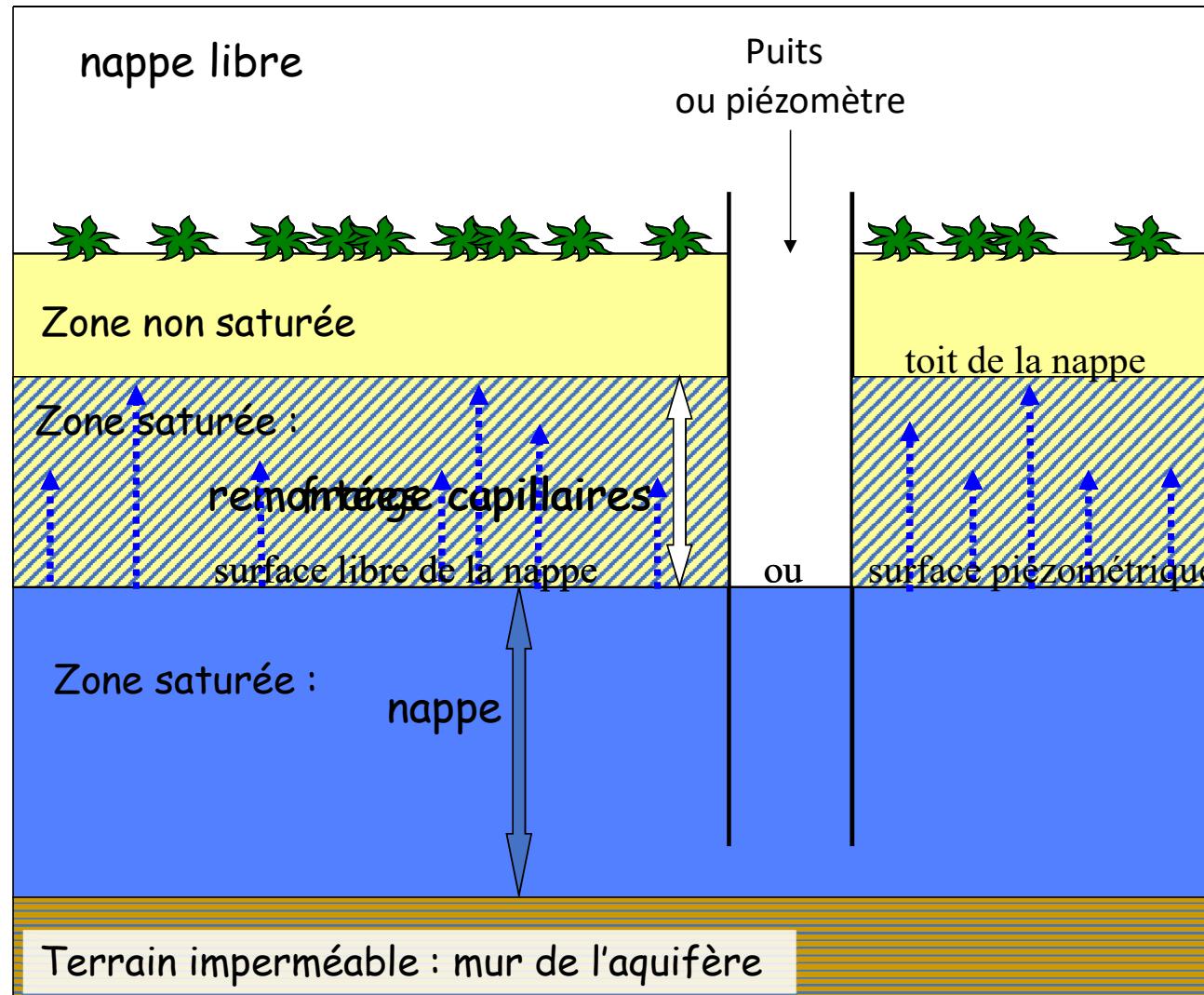
mesure de la pression dans une nappe .

Surface piézométrique :

ensemble des altitudes (ou cotes) à pression nulle : coïncide avec la surface libre de la nappe libre

« les eaux courantes »
s/s dir.
Cosandey

La nappe libre



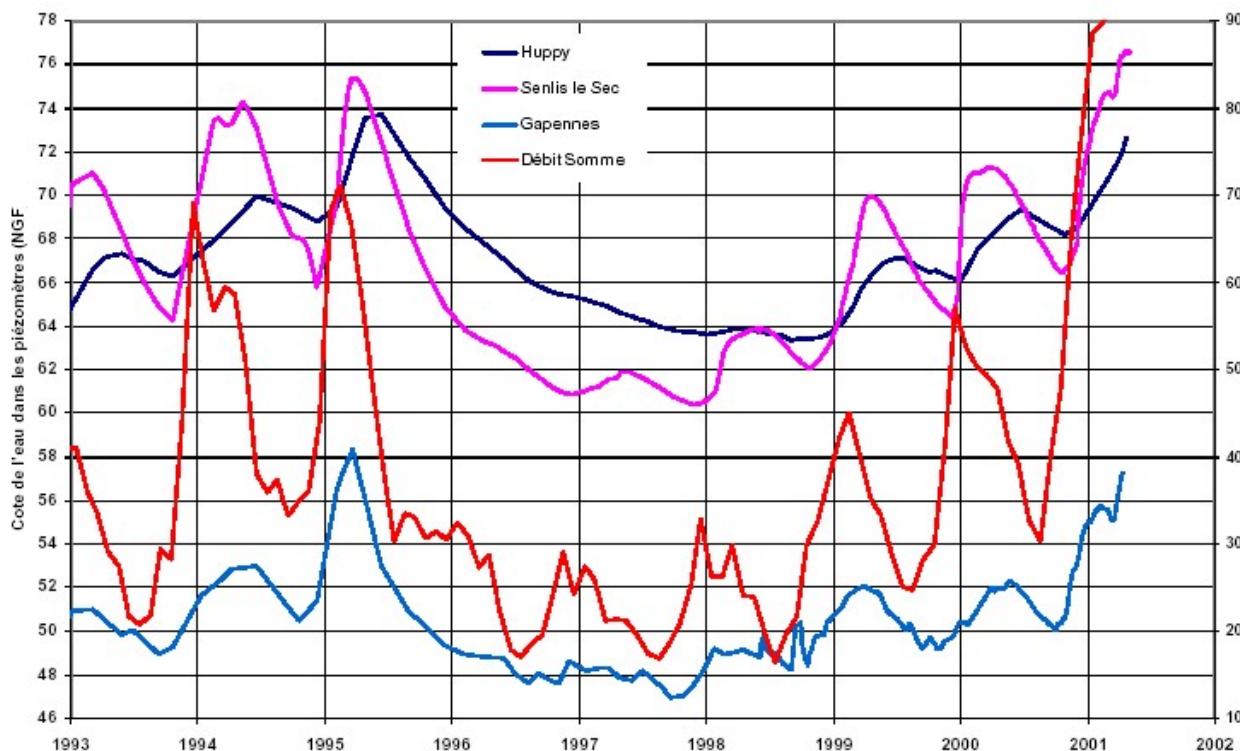
Aquifère à nappe libre :

aquifère reposant sur une couche très peu perméable et surmontée d'une zone non saturée en eau.

Régime des nappes

Identification temporelle

- Suivi chronologique des débits, précipitations, températures,...
- Définir un année hydrologique prenant en compte les variations annuelles
- Souvent en décalage par rapport à l'année civile



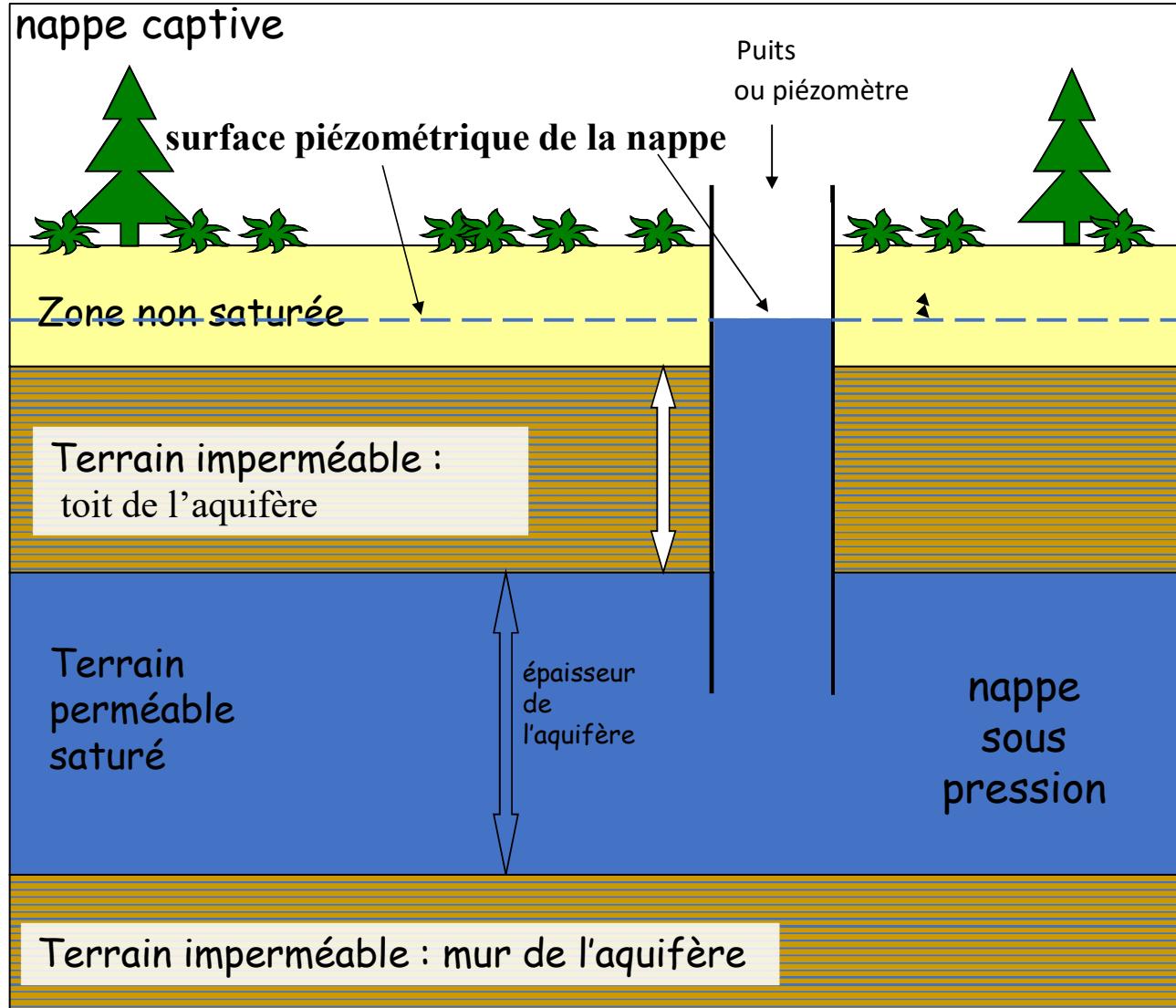
Nappe captive

Les fluctuations de la nappe

nappe captive :

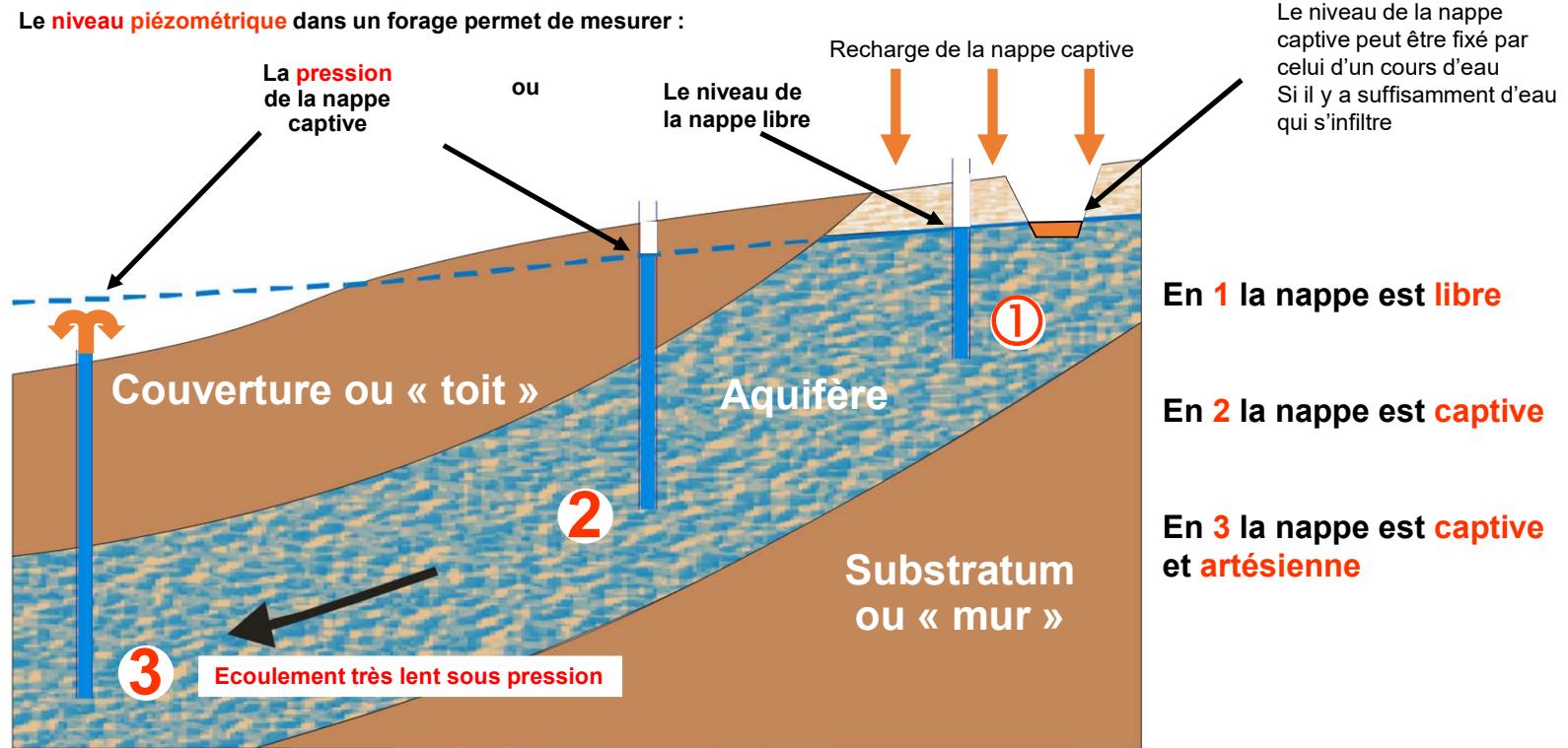
dans une nappe captive, l'eau souterraine est confinée entre deux formations très peu perméables.

Lorsqu'un forage atteint une nappe captive, l'eau monte dans le forage.

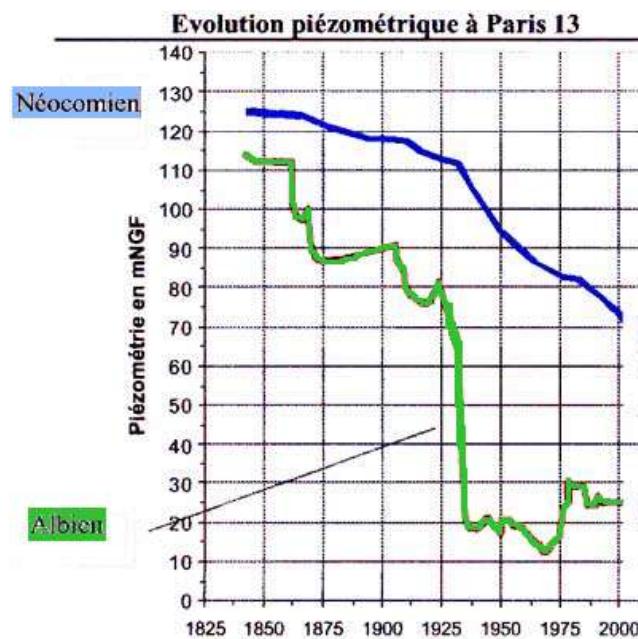
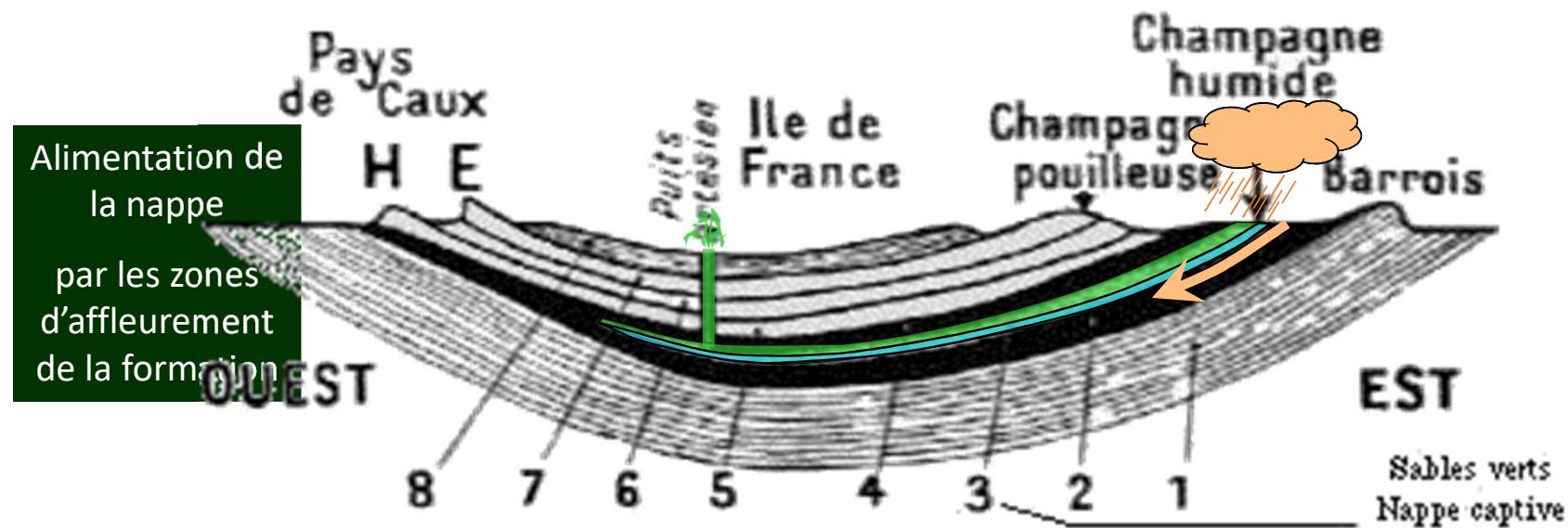


Nappe captive

Une nappe dite captive est une nappe sans surface piézométrique libre, dans un aquifère entièrement sous couverture de faible perméabilité. En conséquence, elle est soumise en tous points à une pression supérieure à la pression atmosphérique, et la surface piézométrique est supérieure au toit de l'aquifère.

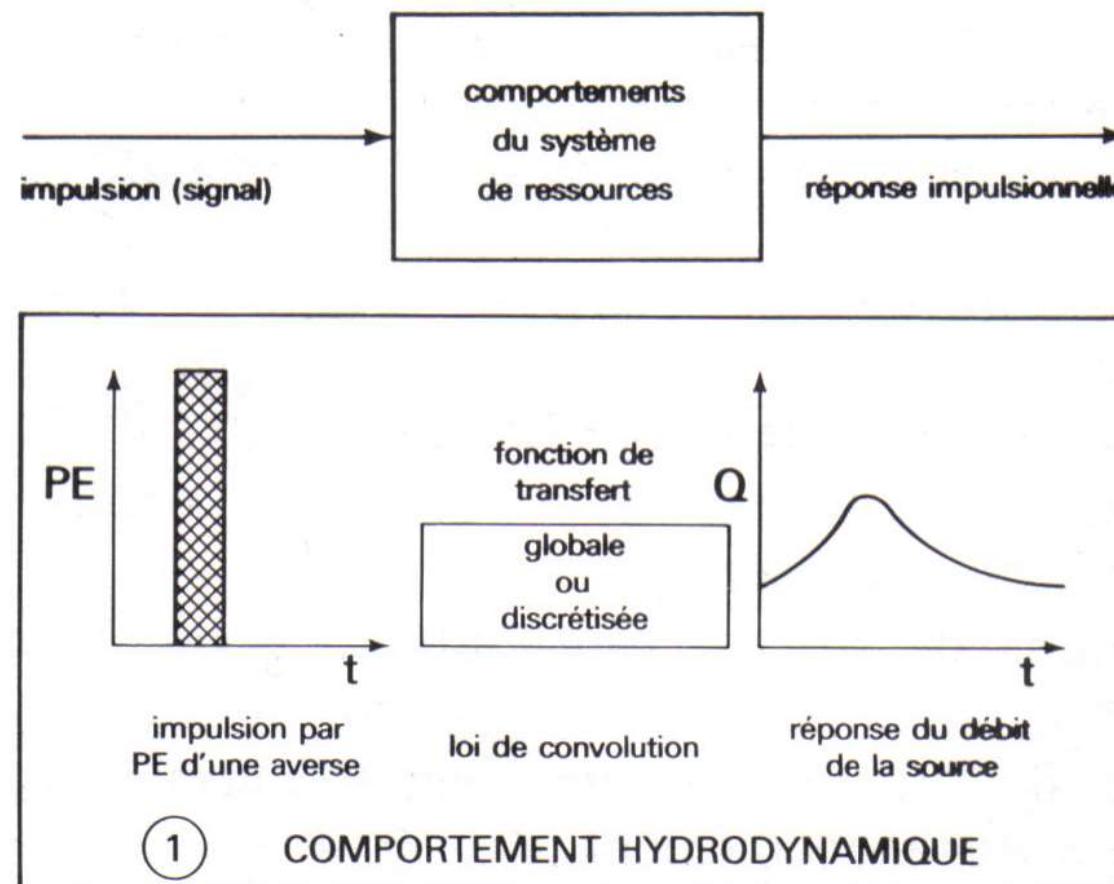


Si l'on atteint par forage une telle nappe, on obtient un jaillissement spontané de l'eau du fait d'un rééquilibrage entre pression de l'eau et pression atmosphérique.



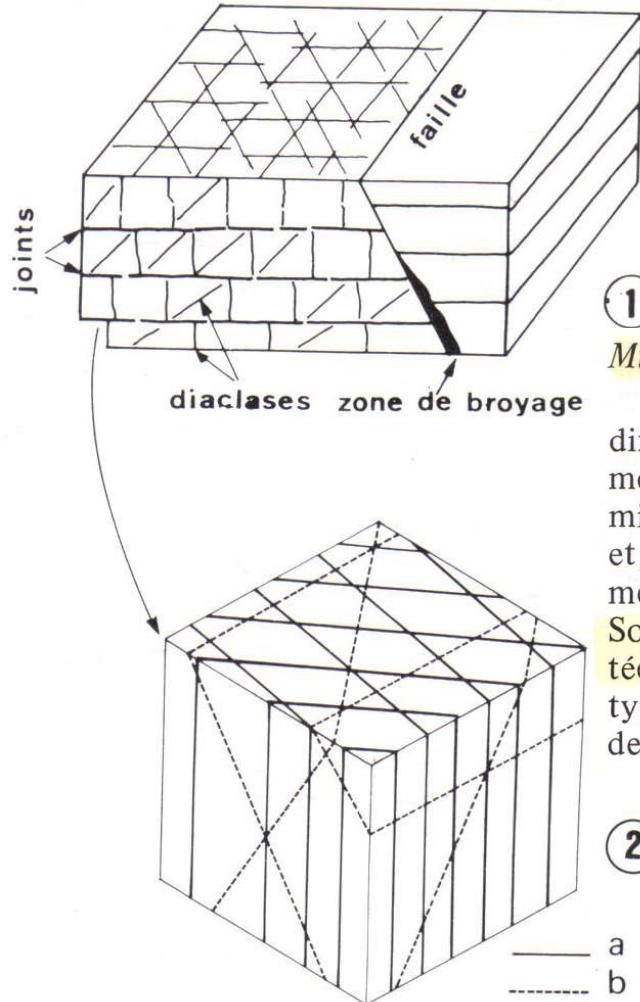
Dans la région parisienne, deux nappes captives sont exploitées: celle de l'aquifère des sables verts de l'Albien, séparée par un niveau semi-perméable (Aptien) de celle du Néocomien sous-jacent (Crétacé inférieur). Depuis 1850, les niveaux piézométriques ont fortement chuté et des transferts d'eau se font au travers de l'Aptien, selon la différence des niveaux piézométriques, depuis l'aquifère Néocomien jusqu'à celui de l'Albien.

Fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère



Fonctionnement de l'aquifère

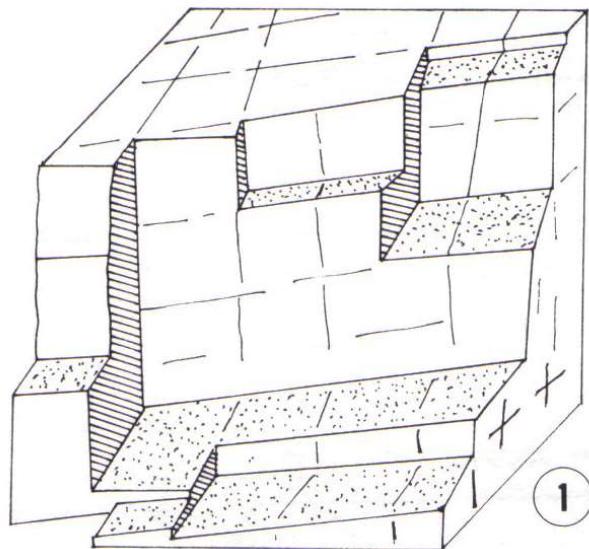
L'écoulement en milieu fissuré



Microfissures

Les microfissures sont caractérisées par une ouverture de quelques dixièmes de millimètres et une longueur de l'ordre métrique à décimalétrique. Ce sont les diaclases et microjoints de stratification (lits minces, feuilletés, intercalés entre les bancs), les plans de schistosité et, éventuellement, les mailles cristallines. Elles découpent irrégulièrement le réservoir constituant un *réseau de microfissures* (fig. 33). Son rôle hydrodynamique est comparable à celui des pores interconnectées du milieu poreux continu (milieu poreux équivalent). Un exemple typique est présenté par le réservoir de la craie supérieure du bassin de Paris

Fonctionnement de l'aquifère



Microfissures régulières,
déterminant un milieu continu

Macrofissures

Les macrofissures, d'une ouverture supérieure à quelques millimètres (ordre de grandeur décimétrique à métrique), sont les zones de broyage, les failles et décrochements (fig. 32). Leur longueur est d'ordre hectométrique à kilométrique. Le milieu fissuré est discontinu.

L'écoulement en milieu fissuré

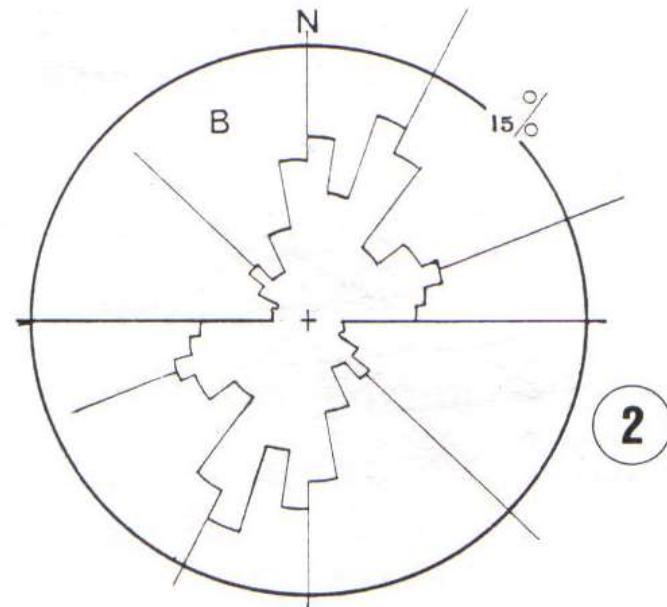


Diagramme stéréographique (ou
rosace)

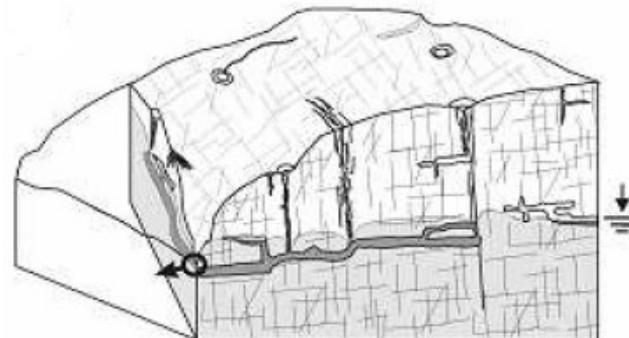
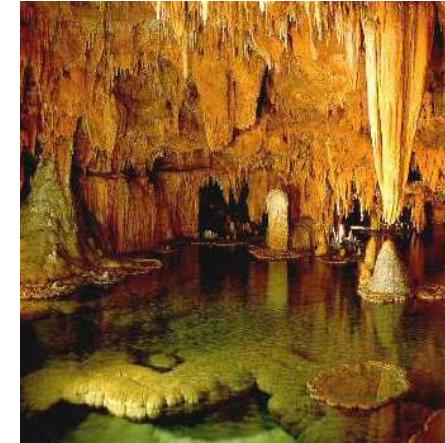
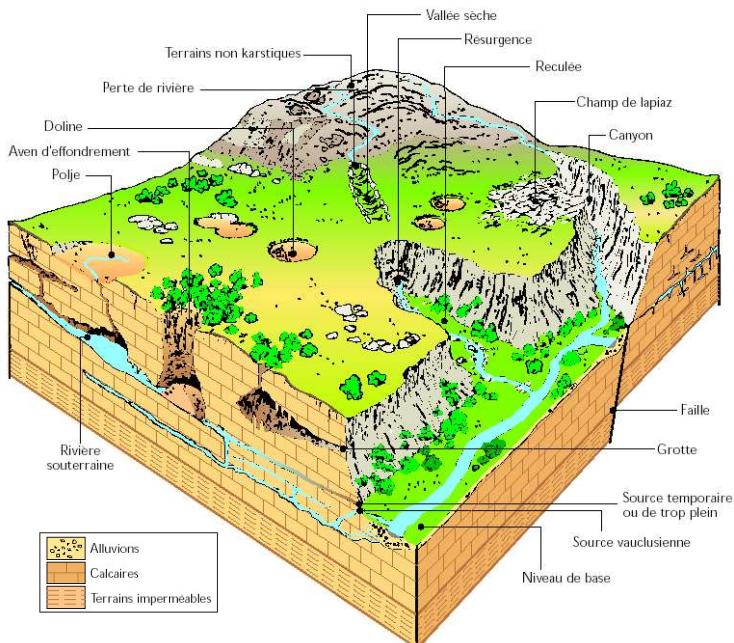
L'écoulement en milieu fissuré

cas de l'aquifère karstique

Le karst est un milieu défini comme l'ensemble des formes superficielles et souterraines engendrées par la dissolution de certaines roches, et notamment les roches carbonatées. La conséquence est l'existence d'un aquifère très hétérogène et anisotrope à toutes les échelles, dont l'originalité tient à:

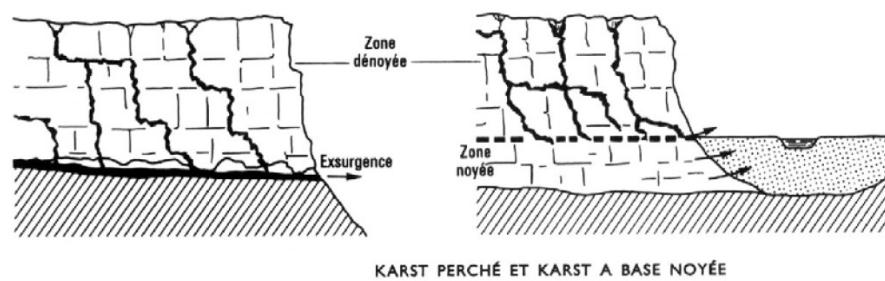
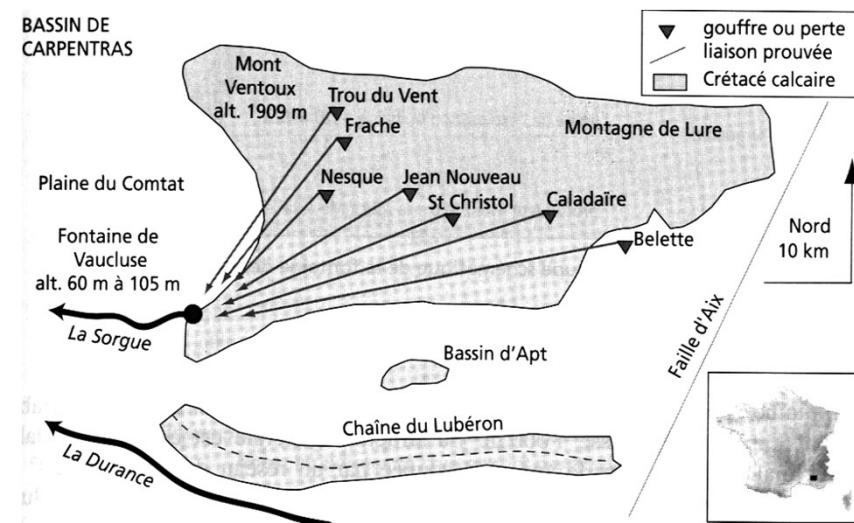
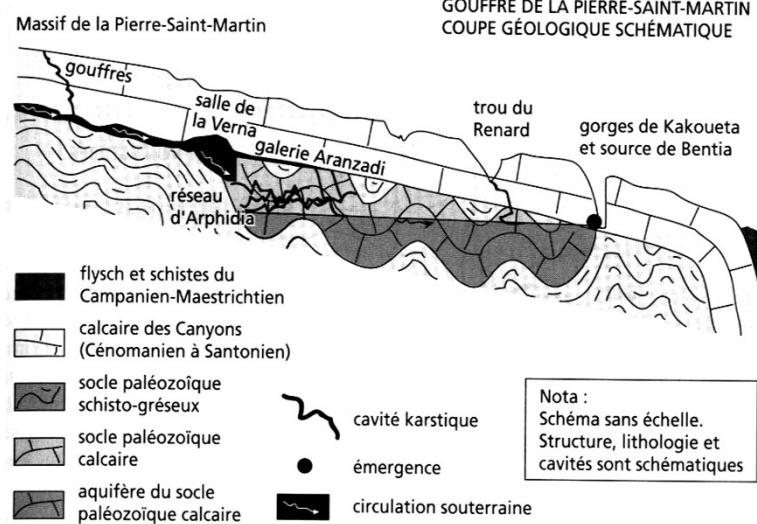
- la différenciation des zones à infiltration diffuse (lapiés), localement favorisée (dolines), ou concentrée (ponors ou pertes);
- l'équilibre hydraulique à grande variation piézométrique entre eau de surface et nappe karstique dû à la saturation des conduits;
- des sources peu nombreuses, à fort débit, au débouché d'un conduit drainant un vaste impluvium.

Modèle karstique et fonctionnement hydrogéologique

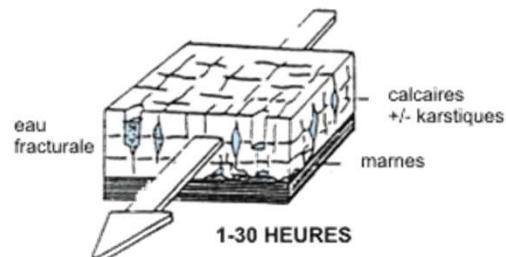
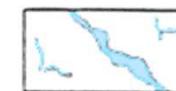


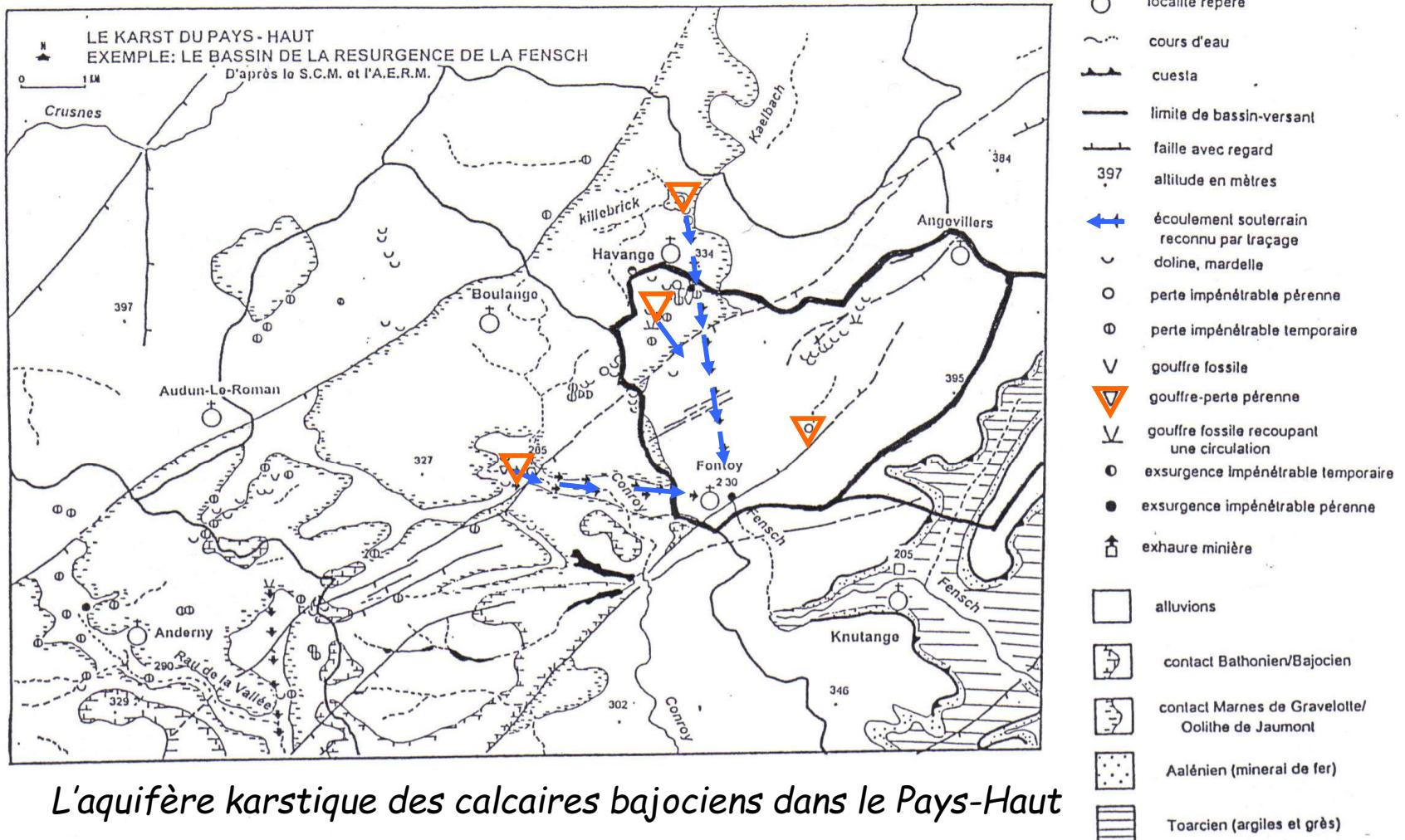
L'écoulement en milieu fissuré : cas du karst

Exemple d'organisation des écoulements dans un système karstique



MILIEU KARSTIQUE





L'aquifère karstique des calcaires bajociens dans le Pays-Haut

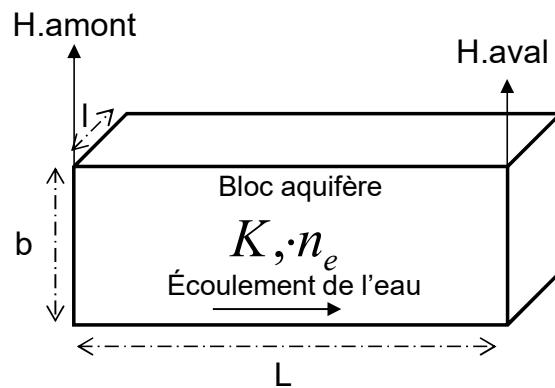
- pertes et résurgences = karstique
- reconnaissance des circulations souterraines par traçages
- bassin hydrographique différent du bassin hydrogéologique

A.Devos CEGEIM Delz

Fonctionnement de l'aquifère

L'écoulement en milieu poreux

Dans un aquifère on ne peut mesurer ni la vitesse ni le débit
mais on peut mesurer la perte en charge ou gradient hydraulique



Gradient hydraulique (dH/L) :
différence de niveau piézométrique (charge H) entre deux points de la surface piézométrique par unité de longueur, mesurée dans le sens de l'écoulement de l'eau (= le long d'une ligne de courant)

On définit la **conductivité hydraulique K** qui constitue le paramètre clé de l'écoulement souterrain :

- elle exprime la proportionnalité entre le gradient hydraulique et le débit de filtration à la sortie
- elle indique le degré de perméabilité à l'eau de l'aquifère :
elle est aussi appelée **coefficient de perméabilité**



Formulation de l'écoulement en milieu poreux: la loi de Darcy

Charge hydraulique et piézométrie

La charge hydraulique est une mesure de l'énergie de l'eau.

La charge hydraulique h_M d'un point M (exprimée en mètres) dans un fluide **au repos**, seulement soumis à la gravité est définie ainsi:

$$h_M = (P_M/\rho g) + z_M \quad [L]$$

avec

P_M : pression (en Pascals) exercée par le fluide en M $[ML^{-1}T^{-2}]$

ρg : poids spécifique de l'eau $[ML^{-2}T^{-2}]$

$P_M/\rho g$: hauteur du fluide au dessus de M = Δz (en mètres)

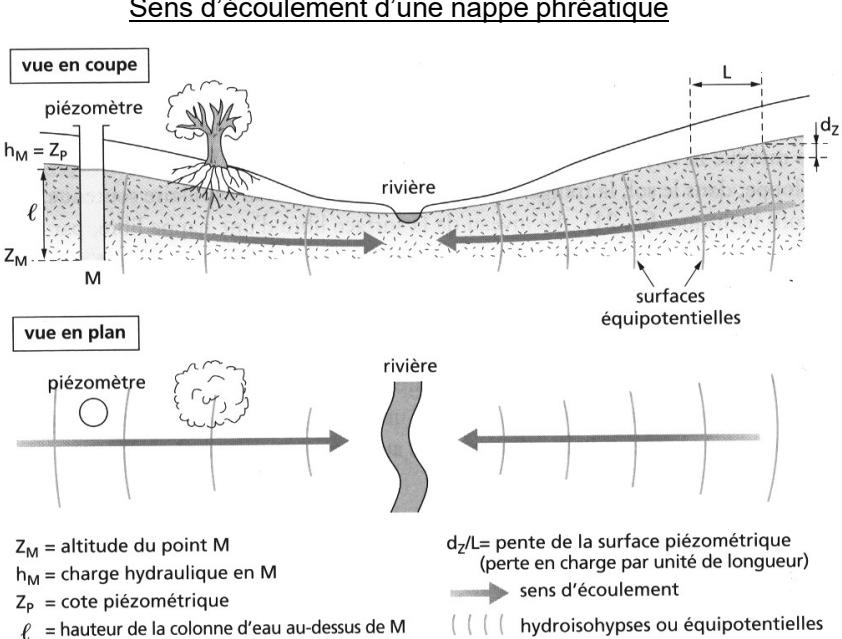
[L]

z_M : altitude de ce point (en mètres) $[L]$

Dans un fluide **au repos**, la **charge hydraulique** en M correspond donc à la **cote de la surface libre (z_{sl})** du fluide à la verticale de M :

$$h_M = z_{sl} = z_M + \Delta z$$

Dans une nappe, les vitesses sont très faibles et le terme cinétique de la charge hydraulique du fluide en mouvement est négligeable ; **la charge hydraulique est assimilée à la cote piézométrique**



Dans le cas d'une **nappe libre**, l'altitude de la surface libre est donc la cote piézométrique (surface à pression nulle).

On appelle **surface piézométrique** la surface libre de la nappe du fait qu'elle représente l'ensemble des cotes piézométriques, et donc des charges hydrauliques.

Dans une **nappe au repos**, la charge hydraulique étant constante, la **surface piézométrique est horizontale**.

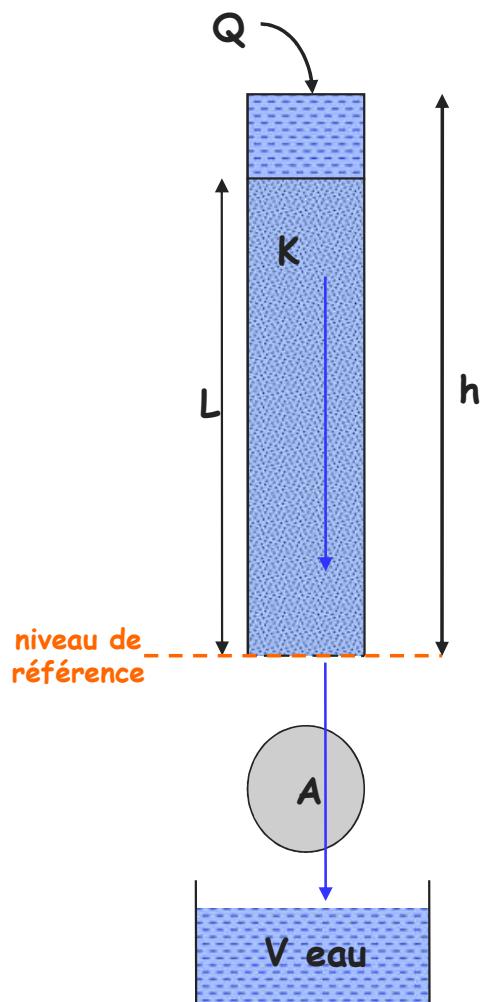
Dans une **nappe en mouvement**, l'abaissement de la charge hydraulique dans le sens de l'écoulement incline la surface piézométrique dans le même sens : **le gradient hydraulique** quantifie la perte en charge dans les sens de l'écoulement

Dans une **nappe captive**, la cote piézométrique est l'altitude de la pression nulle.

En 1856, le chevalier Henri Darcy observant les fontaines de Dijon, a étudié expérimentalement l'écoulement de l'eau à travers une colonne de sable.

Loi de Darcy

elle exprime la proportionnalité entre le gradient hydraulique et le débit de filtration à la sortie

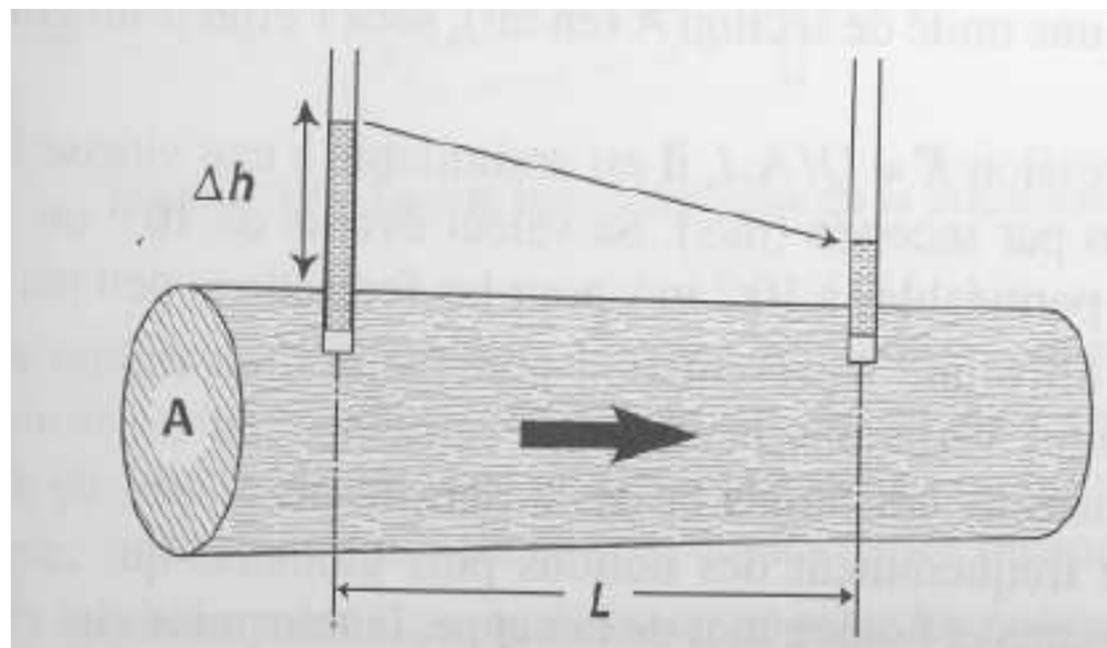


$Q \text{ (m}^3/\text{s)}$	Volume d'eau filtrant de haut en bas de la colonne (débit)
$K \text{ (m/s)}$	Coefficient de perméabilité du terrain
$A \text{ (m}^2)$	Section du tube, perpendiculaire à la direction verticale de l'écoulement
$h \text{ (m)}$	Charge hydraulique, hauteur d'eau
$L \text{ (m)}$	Hauteur de la colonne de sable
$Q = K \times A \times (h / L)$	
$Q = K \times A \times i$	
$i = h / L$	Gradient hydraulique : perte de charge par unité de longueur
$q = V = Q / A = K \times i$	
$q \text{ (m/s)}$	Débit unitaire (par unité de surface $\text{m}^3/\text{s/m}^2$)
$V \text{ (m/s)}$	Vitesse de filtration

La fonction de conduite de l'aquifère assure le transport d'eau (de solutés et de microorganismes) et la propagation d'influences (charge, pression).

Loi de Darcy : loi s'appliquant aux transferts de fluides

Dispositif expérimental

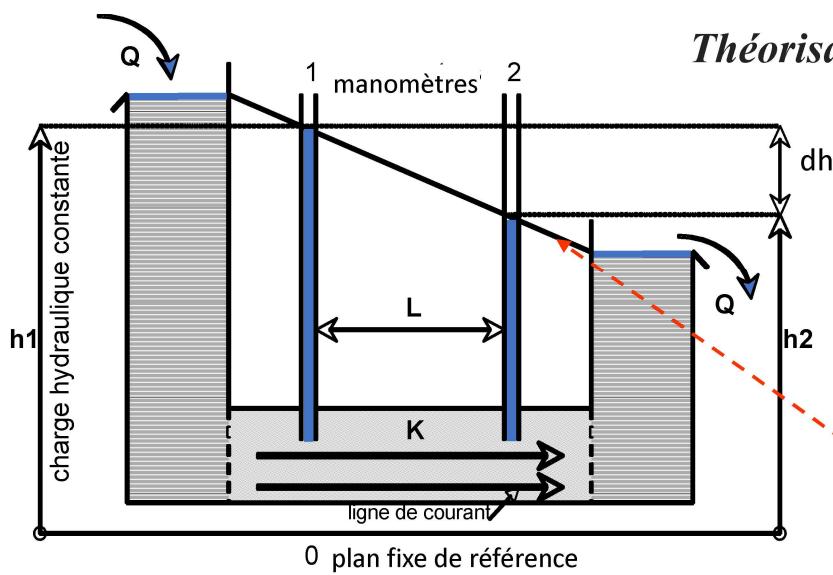


Loi de Darcy

Applications aux écoulements latéraux

Dans un aquifère le mouvement de l'eau est assuré par des différences de charges : la charge décroît dans le sens de l'écoulement (= ligne de courant)
La loi de Darcy peut s'y appliquer :

$$Q = K \times A \times (h_1 - h_2)/L = K \times A \times (dh/L)$$



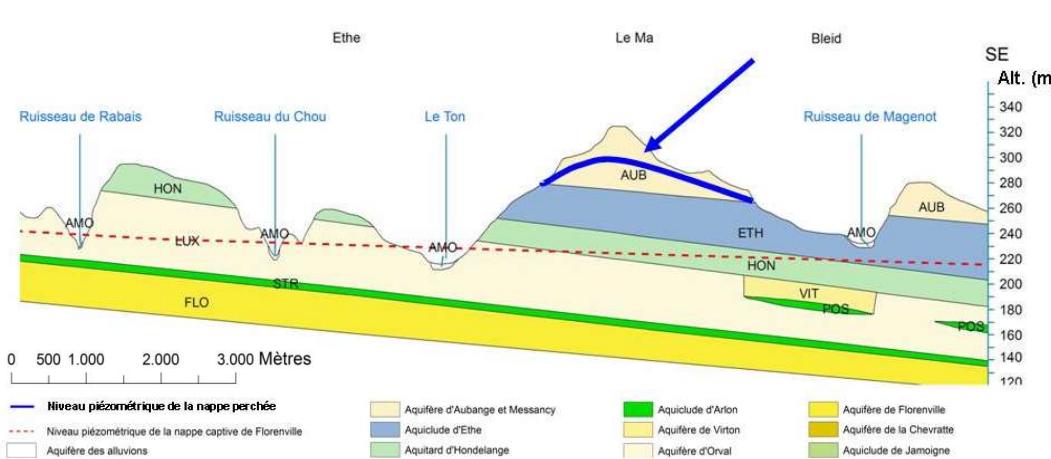
Théorisation du dispositif expérimental

Gradient hydraulique (dh/L) : différence de niveau piézométrique entre deux points de la surface piézométrique par unité de longueur, mesurée le long d'une ligne de courant

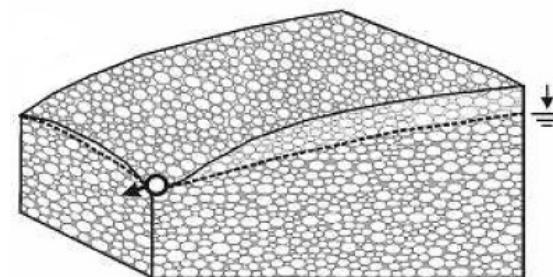
linéarité de la perte en charge dans un milieu isotrope (voire homogène)

Fonctionnement de l'aquifère

Un milieu poreux est perméable comportant des vides interstitiels interconnectés, assimilables macroscopiquement à un milieu continu (à la différence d'un milieu fracturé) et caractérisable par un coefficient de perméabilité.



l'écoulement
en milieu
poreux

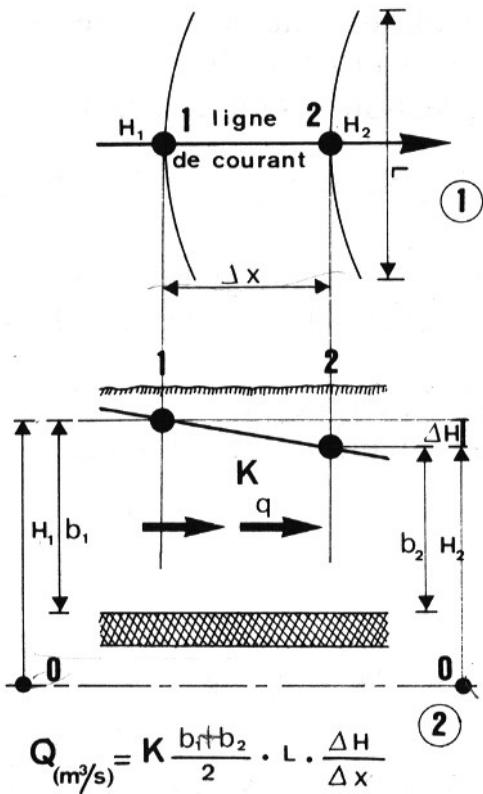


Les milieux poreux constituent une catégorie d'aquifères très divers. On les trouve le plus souvent dans des séries détritiques marines. Celles-ci sont caractérisées par une géométrie et une distribution des propriétés simples, dans lesquelles la variabilité verticale est faible et la variabilité horizontale est telle que les propriétés mesurées sont souvent extrapolables à plusieurs km².

La caractéristique hydrodynamique majeur des milieux poreux est que, leur porosité interconnectée étant une propriété sédimentologique, l'écoulement se fait dans toute la section de l'aquifère, avec des vitesses relativement homogènes et faibles, du fait de la grande section de l'écoulement. En conséquence, la loi de Darcy peut s'appliquer à ces milieux.

On observe souvent dans les dépôts alluvionnaires ou dans les bassins sédimentaires un système aquifère composé par une alternance de couches aquifères et semi-perméables inter stratifiées et pouvant comporter plusieurs nappes libres ou semi-captive.

APPLICATION de la LOI DE DARCY au terrain



Calcul du débit d'une nappe par la méthode de la carte piézométrique

1- carte piézométrique

2- coupe verticale passant par une ligne de courant

Avec

Q =débit de la nappe

q =débit unitaire ou vitesse de filtration

K =perméabilité (coefficient de... en m/s)

ΔH =perte de charge

T =transmissivité ($K \times$ épaisseur en m^2/s)

i =gradient hydraulique

b =épaisseur de la nappe

Niveau piézométrique : l'altitude du niveau d'eau en équilibre naturel

$$H = z - H_p$$

Pour une source

$$H = z \text{ (altitude du point)}$$

Sondage artésien

$$H = z + \text{élévation du niveau au dessus du sol}$$

Loi de Darcy

Limites de la loi de Darcy

➤ Dans les milieux saturés

- ↳ En milieu poreux fin : le Δh peut être trop faible pour vaincre le frottement et V n'est plus proportionnel à i
- ↳ Dans les grandes fissures (karst) le flux devient turbulent et la relation $V=K.i$ n'est plus vérifiée (dissipation d'énergie due à la force d'inertie)

➤ Dans les milieux non saturés

- ↳ La loi de Darcy peut être étendue mais le régime de propagation devient transitoire (période sèche/humide)
- ↳ d'où : les terrains non saturés perdent toute perméabilité
- ↳ en conséquence, la recharge de la nappe par transfert des eaux météoriques ne peut -théoriquement - se faire que si les terrains sont préalablement humidifiés et saturés.

Les grandeurs caractéristiques de l'écoulement souterrain sont:

Roches	Porosité	Porosité de	Conductivité
	totale (n)	drainage (ne)	hydraulique
	%	%	log (K; m/s)
Roches meubles			
Galets et graviers	25 à 35	20 à 30	-3 à 0
sable grassier	25 à 35	20 à 30	-4 à -1
sable moyen	30 à 40	25 à 35	-5 à -2
sable fin	30 à 40	25 à 35	-7 à -4
sable limoneux	35 à 45	25 à 35	-8 à -4
limons	35 à 45	15 à 25	-9 à -5
limons argileux	45 à 55	5 à 10	-11 à -8
argile	45 à 55	0 à 5	-12 à -9
tourbe	60 à 80	45 à 70	-6 à -4
sable éolien	30 à 40	30 à 40	-5 à -2
loess	35 à 45	20 à 30	-9 à -5
silt glaciaire sableux	10 à 20	5 à 20	-8 à -4
silt glaciaire argileux	10 à 20	0 à 10	-12 à -8

Roches consolidées

Détritiques			
Grès	0 à 10	0 à 5	-10 à -8
Grès fissurés	10 à 20	5 à 10	-9 à -7
Grès décimentés	20 à 30	5 à 25	-8 à -5
Marnes	0 à 10	0 à 5	-10 à -8
schistes	0 à 20	0 à 15	-13 à -9
Carbonatées			
Roche massive	0 à 5	0 à 5	-10 à -6
roche littée	5 à 15	5 à 10	-8 à -4
Craie	10 à 30	0 à 5	-7 à -3
roche fissurée	5 à 15	0 à 10	-9 à -6
roche karstifiée	10 à 50	10 à 50	-6 à +1
Cristallines ou cristallophyliennes			
roche non fissurée	<1	<1	-14 à -10
roche fissurée	0 à 5	<1	-10 à -7
roche fracturée	5 à 10	0 à 10	-8 à -5
roche altérée	30 à 50	10 à 30	-6 à -4
volcaniques			
basalte massif	0 à 5	0 à 5	-11 à -6
basalte fissuré	10 à 20	5 à 15	-6 à -2
basalte altéré	20 à 35	10 à 30	-4 à -2
tuf	15 à 40	5 à 30	-9 à -7

-La conductivité hydraulique: **K**

-La porosité de drainage: **ne**

-La hauteur piézométrique et son gradient: **H**

-L'épaisseur mouillée (zone saturée): **b**

**Formations utilisables pour
l'alimentation d'une nappe**
 $10^{-2} < K < 10^{-5}$

Perméabilité: valeurs à titre indicatif

Calcaire	$10^{-2} \text{ à } 10^{-6}$
Craie	$10^{-3} \text{ à } 10^{-5}$
Grès ou conglomerat	$10^{-2} \text{ à } 10^{-6}$
Granite	$10^{-7} \text{ à } 10^{-10}$
Schistes	$10^{-5} \text{ à } 10^{-10}$

DEFINITION DE QUELQUES NOTIONS CLEFS

Charge hydraulique : altitude d'un niveau piézométrique par rapport à un plan de référence : somme de la charge hydrostatique et de la charge hydrodynamique.

Coefficient d'emmagasinement : rapport du volume d'eau libérée ou emmagasinée par unité de surface d'un aquifère, à la variation de la charge hydraulique correspondante.

Coefficient de perméabilité (Darcy) : volume de fluide (m^3) qui traverse, en une unité de temps (s), sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique, une unité de surface (m^2) orthogonale à la direction du flux dans les conditions de validité de la loi de Darcy, à la température de 20°C ; il a la dimension d'une vitesse (m/s).

Diffusivité (hydraulique) : paramètre régissant la propagation d'influence dans un aquifère saturé : quotient de la transmissivité par le coefficient d'emmagasinement.

Drainance : flux d'eau, à composante essentiellement verticale, passant d'un aquifère à un autre à travers une couche semi-perméable.

Equipotentielle : lieu de points d'égal potentiel, ou charge hydraulique, dans un milieu aquifère : ligne idéale orthogonale aux lignes de courant, dans un milieu aquifère isotrope et en régime permanent.

Filtration (vitesse de) : vitesse macroscopique fictive d'un flux d'eau en mouvement uniforme à travers un milieu aquifère saturé déduite du débit d'écoulement rapporté à la section totale de l'aquifère traversé par le flux.

Gradient hydraulique : différence de charge hydraulique entre 2 points d'un aquifère par unité de distance, selon une direction donnée, en général selon une ligne de courant.

Hydrogéologie : science des eaux souterraines : connaissance des conditions géologiques et hydrologiques et des lois physiques qui régissent l'origine, la présence, les mouvements et les propriétés des eaux souterraines.

Hydroisohypse : lieu des points d'égale altitude (courbe de niveau) d'une surface libre.

Nappe d'eau souterraine : ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique.

Niveau piézométrique : niveau supérieur de la colonne liquide statique qui équilibre la pression hydrostatique au point auquel elle se rapporte. Il est matérialisé par le niveau libre de l'eau dans un tube vertical ouvert au point considéré (piézomètre).

Perméabilité intrinsèque : volume de fluide (m^3), d'une unité de viscosité cinématique (Pa.s), qui traverse, en une unité de temps (s), sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique, une unité de surface (m^2) orthogonale à la direction du flux ; elle a la dimension d'une surface (m^2).

Porosité cinématique : ou porosité efficace.

Transmissivité : paramètre régissant le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur de la zone saturée d'un aquifère continu, et par unité de gradient hydraulique. Equivaut également au produit du coefficient de perméabilité K par la puissance b, en milieu isotrope

Loi de Darcy Importance de la carte piézométrique

Etablissement des cartes piézométriques

La cartographie de l'aquifère a pour but de représenter sa configuration, sa structure et de schématiser les fonctions du réservoir et son comportement hydrodynamique

Cartes structurales

↳ Isobathes (égale profondeur) ou isohypsies (égale altitude) : morphologie et position des surfaces limites
Isopaches (égale épaisseur) : épaisseur de l'aquifère

Cartes piézométriques

↳ Courbes hydroisohypsies : fonction de conduite, comportement hydrodynamique

Etablissement des cartes piézométriques

Mesure des niveaux piézométriques

- Elles doivent être effectuées dans des conditions de stabilisation
- Sur l'ensemble de la région considérée
- Sur une période courte pour éviter les fluctuations liées aux conditions d'alimentation

Report des niveaux piézométriques

- Choisir l'échelle de la carte en fonction de la densité des points de mesures
- Choisir l'équidistance des courbes hydroisohypes

Etablissement des cartes piézométriques

Tracé des courbes hydroisohypes

- Interpolation approximative
 - ↳ Approche visuelle
 - ↳ Ne pas confondre hypothèse de travail et faits observés

- Méthode d'interpolation du triangle
 - ↳ Regroupement des données par trois aux sommets de triangles
 - ↳ Division des côtés en segments proportionnels
 - ↳ Les points d'égal niveau sont joints par une droite puis l'ensemble des droites est lissé pour obtenir des courbes régulières

Habillage de la carte piézométrique

- Deux opérations sont nécessaires :
 - ↳ Tracer les lignes de courant de la surface piézométrique (donc superficielles) : lignes de plus grandes pentes
 - ↳ Fléchage des lignes de courant
- Mise en évidence des axes principaux du flux (trajets les plus courts et les plus simples) : schématisation de la fonction de conduite du réservoir
- Les lignes de partage des eaux souterraines délimitent les bassins hydrogéologiques

Habillage de la carte piézométrique

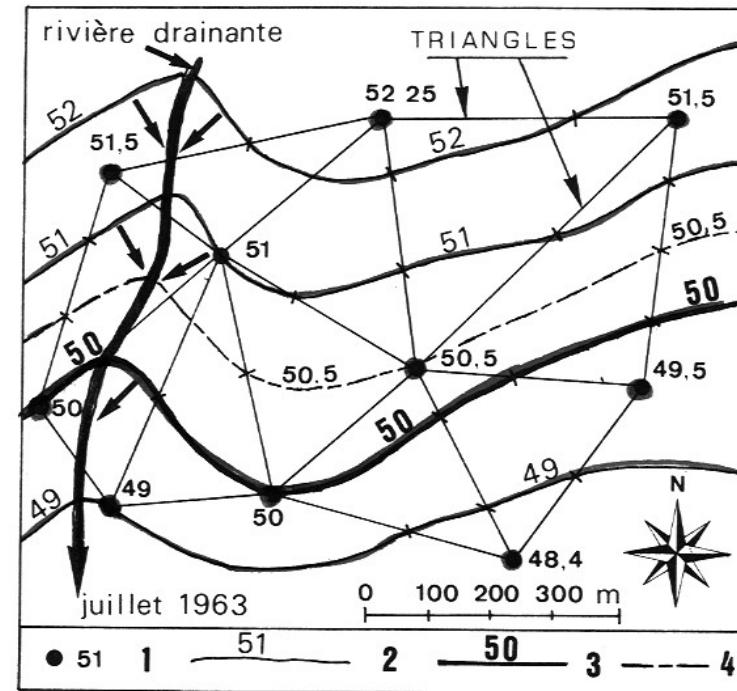
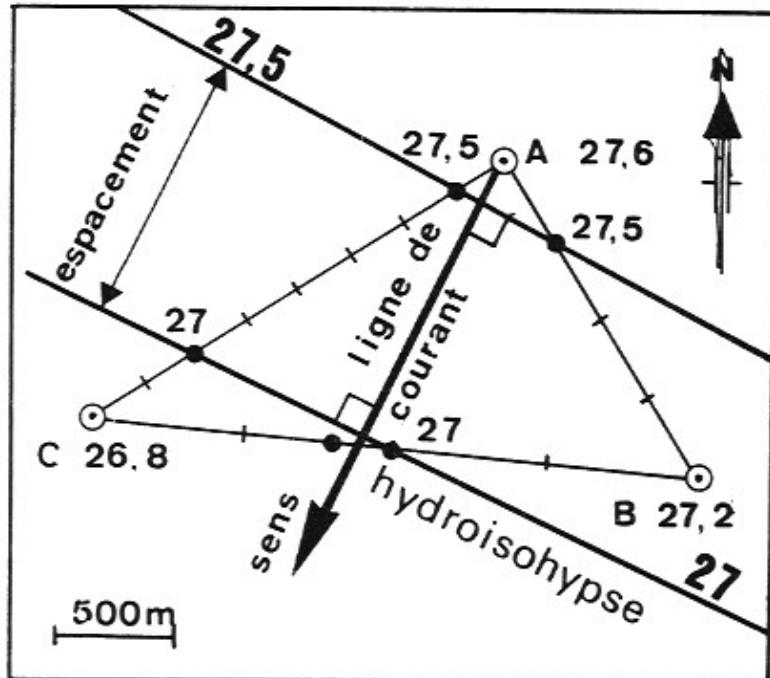
- L'orientation de l'écoulement et de la concavité des courbes hydroisohypes permet de distinguer des aquifères à nappes convergentes ou divergentes
- Les modifications de l'espacement entre les courbes hydroisohypes permet d'identifier des écoulements
 - ↳ Uniformes : Espace constant, direction constante
 - ↳ Non uniformes : Variation dans le module d'espacement et la direction des lignes de courant

Loi de Darcy

Importance de la carte piézométrique

cartographie

Tracé des courbes hydroisohypes par la méthode d'interpolation du triangle



1-ouvrage d'observation

2-courbe hydroisohypse et niveau piézométrique

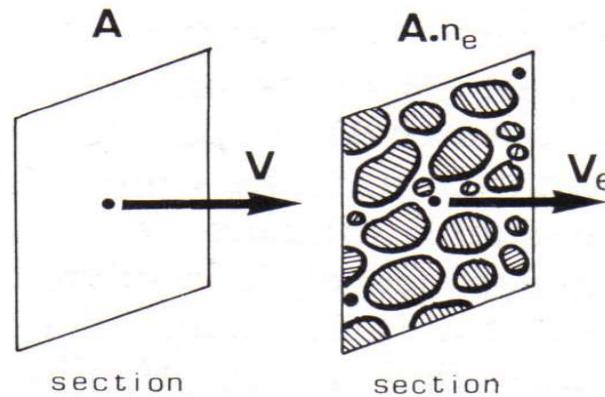
3-courbe maîtresse, équidistance de 10 m

4-courbe intermédiaire

Vitesse d'écoulement

➤ A partir de la loi de Darcy, la **vitesse de filtration** est déterminée en fonction du débit et rapportée à la section totale de l'aquifère : $\textcolor{brown}{V} = Q / A$

C'est une vitesse fictive car l'eau ne s'écoule réellement que dans l'espace poral utile



Vitesse effective

$$V = K i$$

$$V_e = \frac{K i}{n_e}$$

- Elle prend en compte la section efficace $\Rightarrow V_e = \textcolor{brown}{V} / n_e$
- V_e est supérieure à $\textcolor{brown}{V}$ d'un facteur de l'ordre de 10
- Les V_e sont régies par la géométrie de la roche réservoir et par la distribution des pore et des fissures
 - ↳ Nappe captive des sables de l'albien 2 - 5 m/an
 - ↳ Nappe alluviale d'Alsace 1 - 5 m/j

Variables la **Perméabilité** exprime la résistance du milieu à l'écoulement de l'eau qui la traverse Elle dépend de facteurs liés au réservoir et au fluide

facteurs liés au réservoir : la rugosité et les forces de frottement

la granulométrie principalement : plus elle est fine ($d10$)

- ↳ plus la surface spécifique augmente
- ↳ plus la porosité efficace (n_e) diminue
- ↳ plus K diminue

facteurs liés au fluide : les forces de frottement internes et la fluidité

La viscosité, plus elle est faible plus l'écoulement sera rapide.

- diminue avec la chaleur
- augmente avec la profondeur

Variables

Transmissivité

- Prévoir les débits que l'on peut capter dans un forage
- Elle est égale au débit d'une couche aquifère, sur toute son épaisseur, par unité de longueur et soumise à un gradient hydraulique unitaire.

$$\text{T (m}^2/\text{s)} = \text{K (m/s)} * \text{b (m)}$$

Variables Diffusivité D

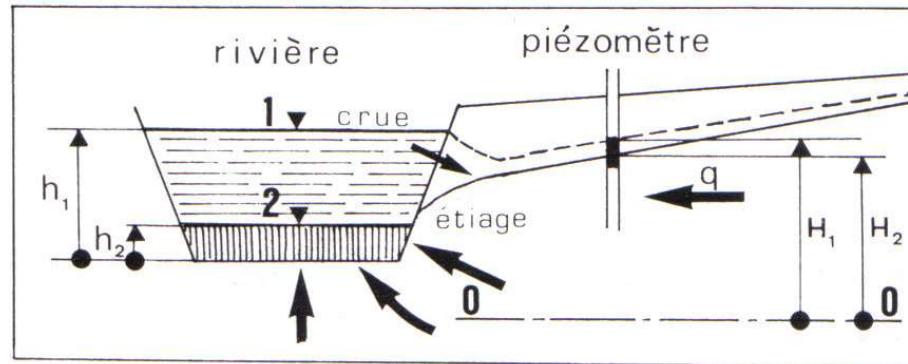
- Les variations (temporelles et spatiales) de débits dans un aquifère s'accompagnent d'une variation des niveaux piézométriques.
- Il existe dans le réservoir une **inertie ou fonction régulatrice** qui aboutit à l'amortissement des irrégularités du débit

➤ Elle dépend des conditions hydrauliques et géologique de l'aquifère et de la diffusivité du terrain

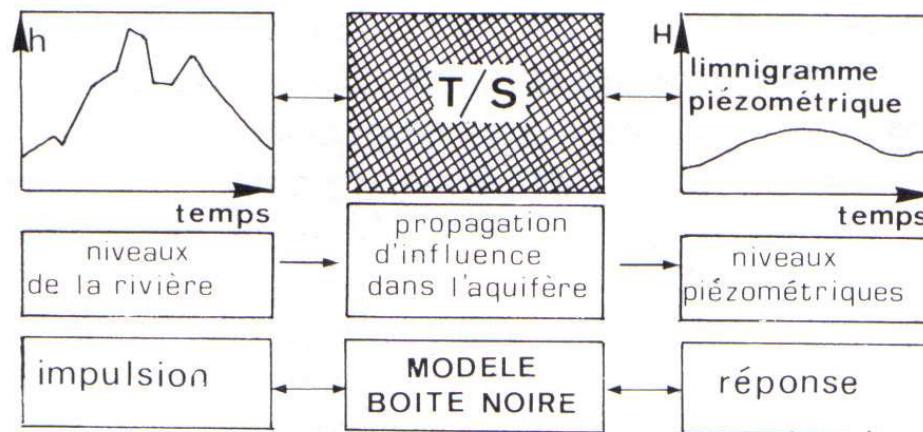
$$\text{Diffusivité (m}^2/\text{s)} = \text{T (m}^2/\text{s)} / S$$

$$S = \text{Vol. eau libérée / m}^2 \text{ aquifère / } \Delta h$$

La diffusivité détermine la propagation d'influences (transfert de masses d'eau ou de pressions) dans l'aquifère



— surface piézométrique à l'étiage $H_1 - h_1$
 - - - surface piézométrique en crue $H_2 - h_2$



La diffusivité est proche dans le concept du « coefficient de vidange des nappes » utilisé dans ORCHY

Débit d'une nappe

- Débit = volume d'eau (m^3) traversant par seconde une section transversale en m^2 d'aquifère sous l'effet d'un gradient hydraulique déterminé

Calcul du débit Q d'une nappe

Méthode de la carte piézométrique

- Utilisation des valeurs de courbes isohypes et de l'échelle de la carte

Méthode des sections élémentaires

- Utilisable quand les données sont suffisantes
- La section générale est subdivisée en sections dont le nombre correspond au nombre de sondages d'essai.
- Calcul du débit pour chaque section et le débit de l'aquifère correspond à la somme des débits de chaque section.

Vitesse d'écoulement

Vitesse de déplacement

- Dans le cas des milieux fortement fissurés notamment karstiques, l'écoulement est majoritairement turbulent et ne suit donc plus la loi de Darcy
 - ↳ Vitesses très rapides
 - ↳ Circuits complexes
- Il est possible de calculer une vitesse effective de déplacement, grâce à l'utilisation d'un traceur :
 - ↳ Isotopique (tritium, deutérium, strontium)
 - ↳ Colorant (fluorescéine, rhodamine)
 - ↳ Chimique (chlorure)

Vitesse d'écoulement

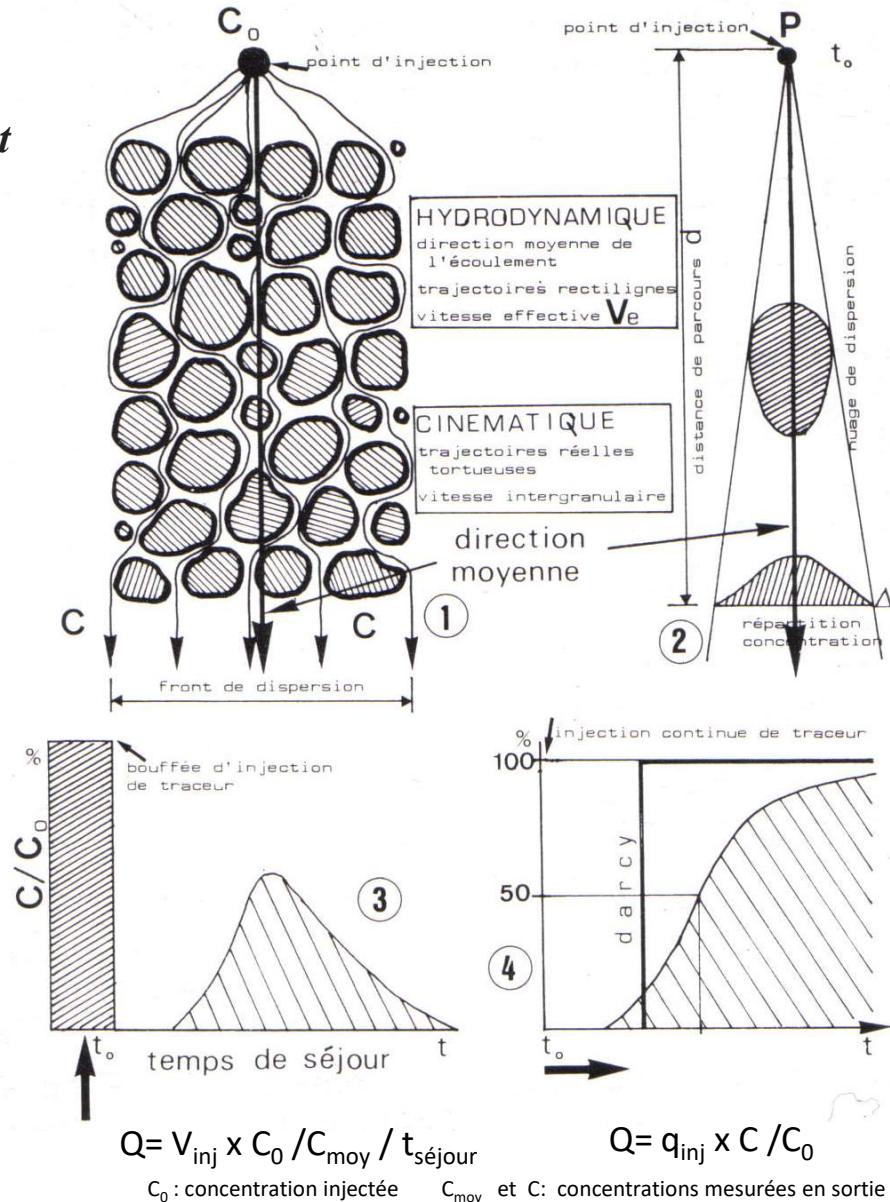
Vitesse de déplacement

Méthode :

- Injection du marqueur dans le réseau au niveau d'une perte naturelle ou d'un forage
- Suivi dans le temps du marqueur dans les sources (rivière, puits, forages)

➤ Le temps de séjour correspond à l'écart entre l'introduction du traceur et sa détection, il est également possible de tracer la courbe de restitution

➤ L'ensemble du traceur n'arrive pas simultanément : effet de dispersion



Vitesse d'écoulement

Vitesse de déplacement

- L'effet dispersif résulte de plusieurs facteurs :
 - ↳ Dispersion mécanique : structure physique du réservoir, trajet de l'eau entraînant des variations de vitesse.
 - ↳ Diffusion moléculaire : agitation des molécules
 - ↳ Interactions eau/roche (adsorption / désorption), rétention de l'eau

Représentation des écoulements

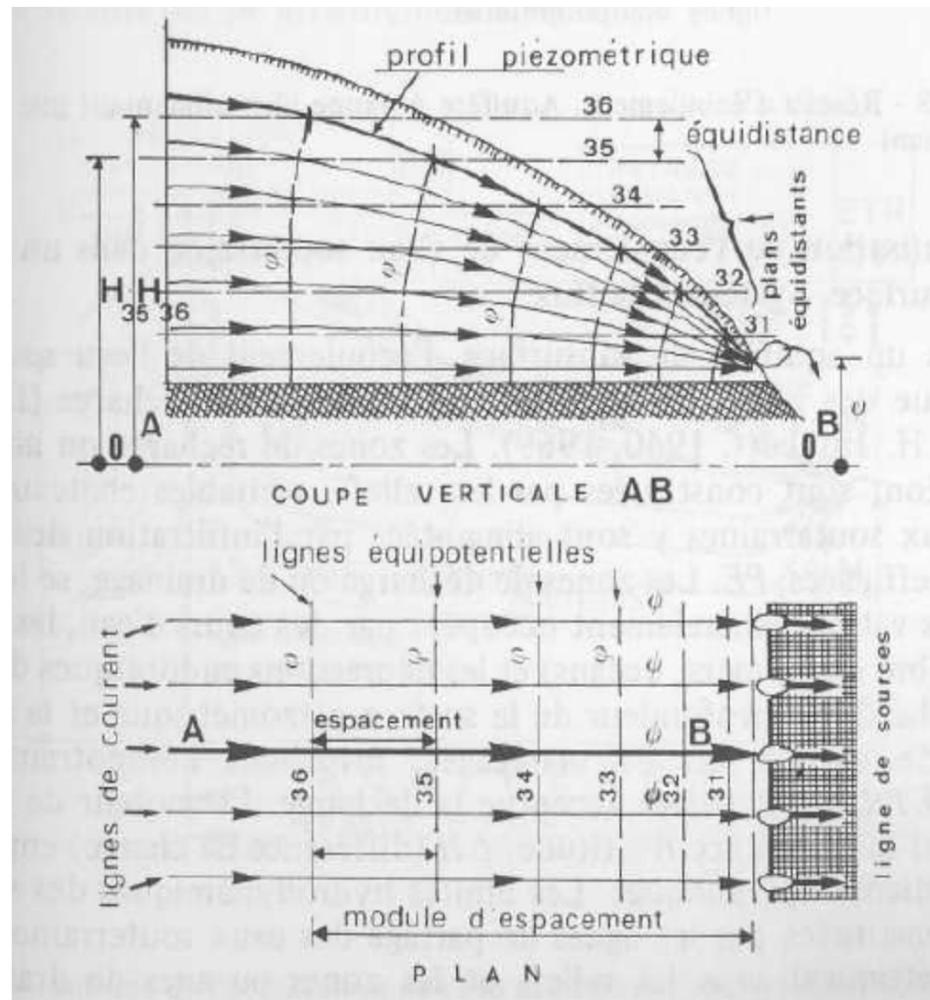
Lignes de courant et lignes équipotentielles

➤ **Lignes de courant :**
ligne idéale représentant la trajectoire d'une particule d'eau en mouvement dans un aquifère

➤ **Ligne équipotentielle :**
lignes perpendiculaires aux lignes de courant successives, lignes d'égales charge (d'égal niveau piézométrique)

Réseau d'écoulement

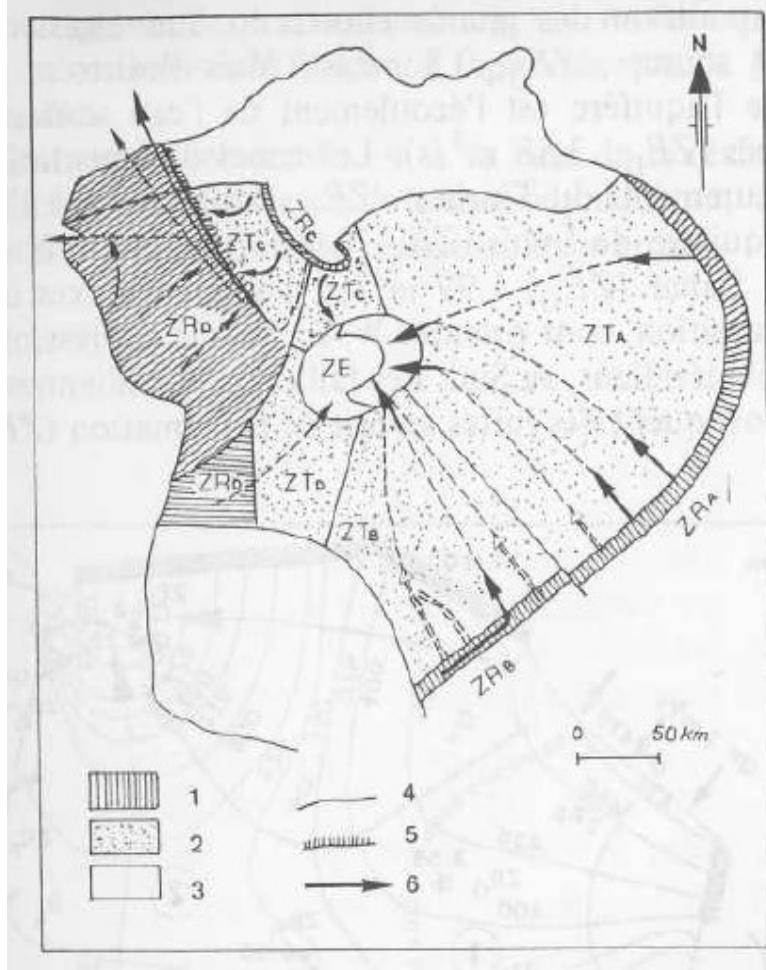
d'un aquifère à nappe libre alimentant une source de déversement.



Représentation des écoulements

- Dans un aquifère de subsurface, l'écoulement se fait des zones de recharge vers les zones de décharges. Il est possible de distinguer 2 zones :
 - ↳ **Zone de recharge ou aire d'alimentation** : alimentation des eaux souterraines par l'IE via les PE (zone de relief)
 - ↳ **Zone de décharge ou de drainance** correspondant aux fonds de vallée (cours d'eau), aux zones présentant une surface d'eau libre (lac mer) ou aux dépressions endoréïques des zones arides
- Moteur de l'écoulement : différence de charge engendrant un gradient hydraulique

Représentation des écoulements



Zones hydrogéologiques de l'aquifère multicouche des sables albiens du Bassin de Paris.

Zone d'alimentation ou de recharge
ZR_A et ZR_B : par les affleurements de la bordure orientale

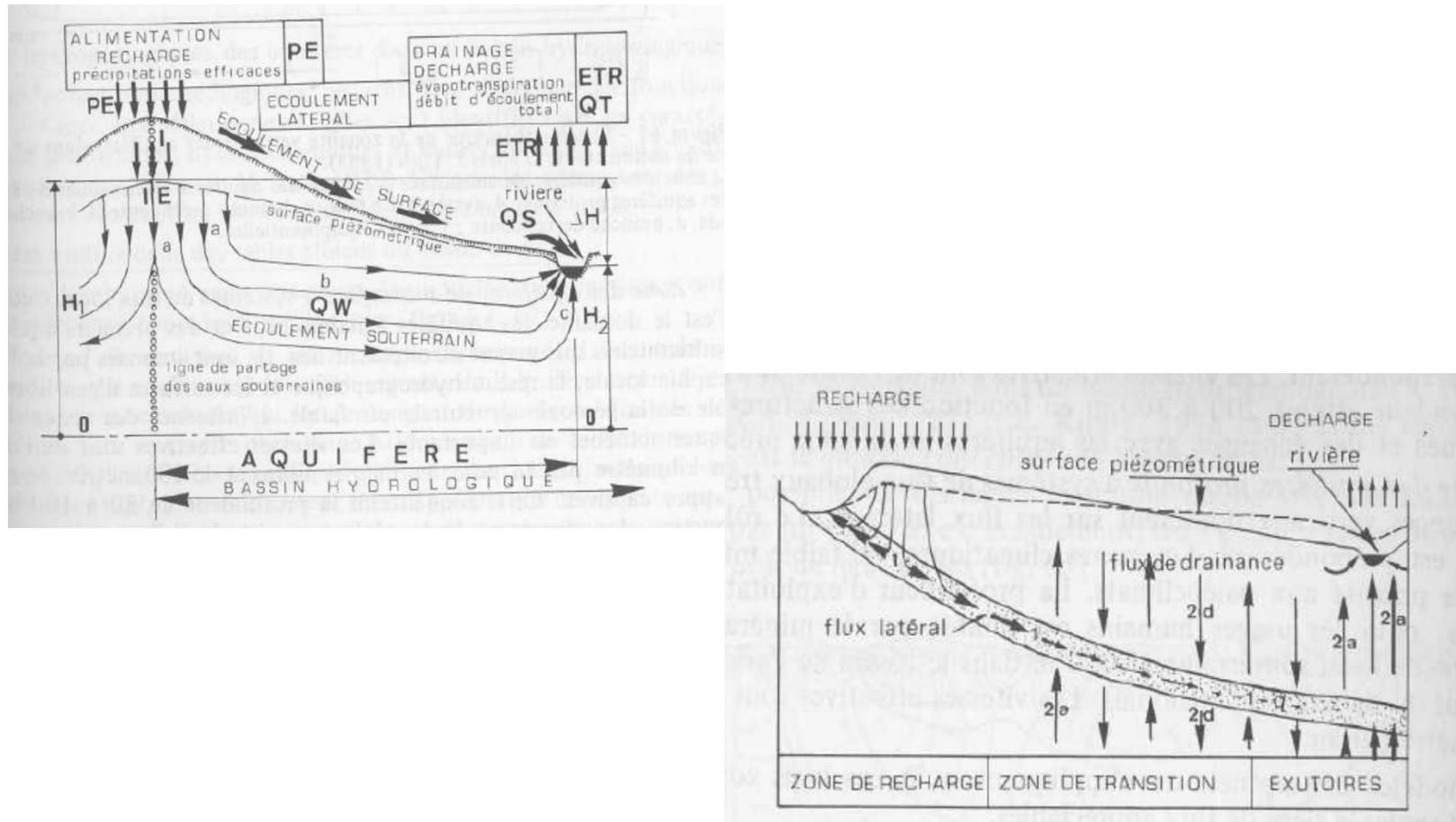
ZR_C : par les affleurements de l'anticlinal du Pays de Bray

ZR_D : par drainance descendante sous recouvrement crétacé.

Zone de transition ou de mélange
ZT_A, ZT_B et ZT_C.

Zone d'exutoire ou de décharge
ZE de la région parisienne, sondages d'exploitation et drainance ascendante.

Représentation des écoulements



Représentation des écoulements

Conditions aux limites

- Le comportement hydrodynamique de l'aquifère repose sur une définition rigoureuse des conditions aux limites
- Ces conditions sont déterminées par
 - ↳ Des points (sources)
 - ↳ Des lignes (berges de rivières)
 - ↳ Des surfaces (aires d'alimentation)
- Grands types de limites
 - ↳ *Géologiques closes* (position fixe) ou *limites étanches*, où le flux est nul : substratum, toit, passages latéraux de faciès
 - ↳ *Hydrodynamiques ouvertes* (position variable) dans l'espace et le temps. Ces limites sont imposées par les conditions extérieures.

Représentation des écoulements

Conditions aux limites

Limites hydrodynamiques ouvertes

- Limites à flux imposé (condition de débit)

Entrant (affluent) : nappes affluentes, aires d'alimentation par infiltration des PE, rivières infiltrantes

Sortant : sources, lignes d'émergences, cours d'eau drainant

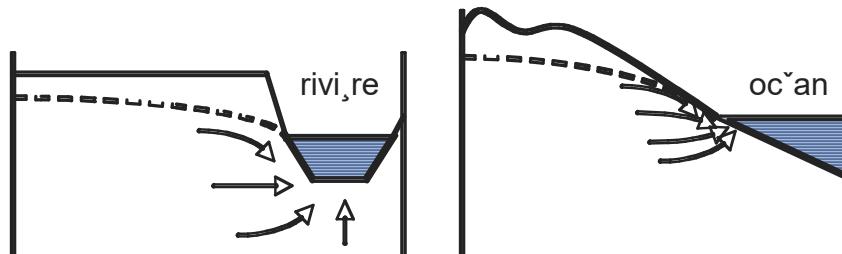
- Limites à potentiel imposé (condition de potentiel)

Elles sont identifiées par une courbe équipotentielle de la surface piézométrique

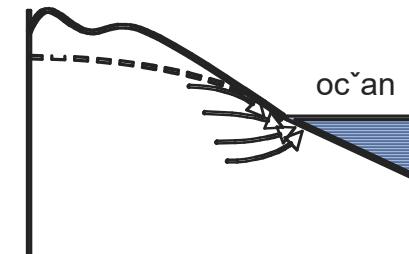
Représentation des écoulements

Conditions aux limites

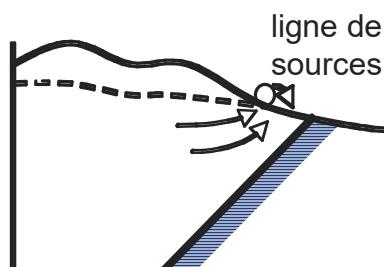
*Limites hydrodynamiques
ouvertes à potentiel imposé*



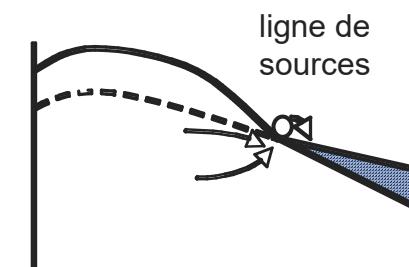
Rivière drainante



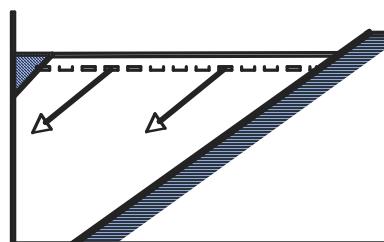
Ligne de rivage



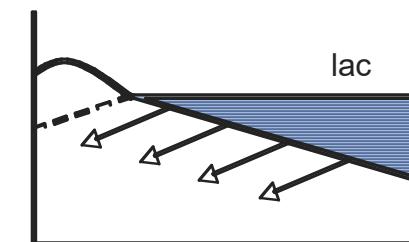
Source de déversement



Source de débordement



Aire d'alimentation



Surface filtrante

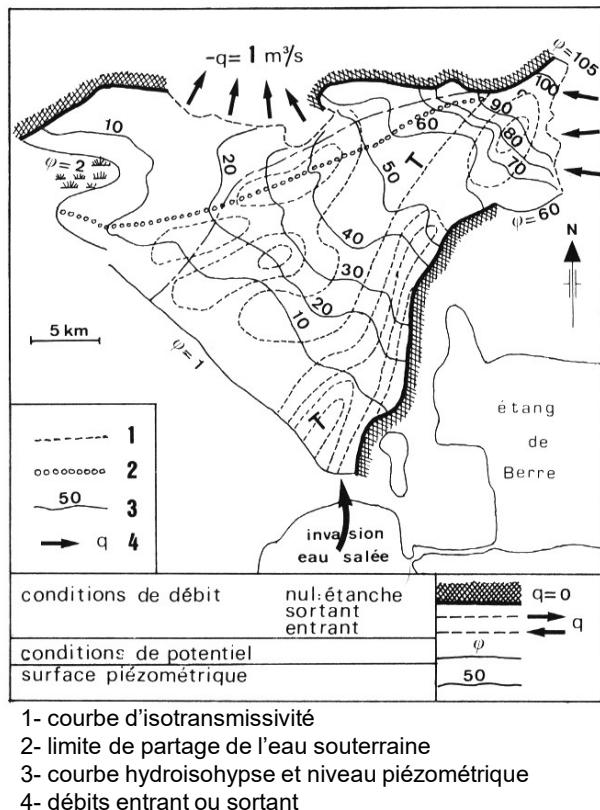
Les conditions aux limites de l'aquifère

Le comportement hydrodynamique de l'aquifère est imposé par les conditions extérieures (son environnement). Elles sont déterminées par des points (sources), des lignes (berges de rivières) et des surfaces (aires d'alimentation). On distingue 2 types de limites:

-les **limites à condition de flux**: soit à **flux nul** en cas de limites étanches soit à **flux imposé** lorsqu'il y a échange d'eau avec des milieux contigus de surface (plan d'eau) ou souterrain (drainance).

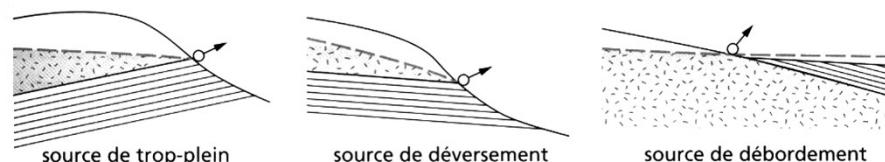
-les **limites à condition de potentiel**: ce sont les **cotes piézométriques imposées** à la surface de la nappe par la présence de ligne de sources, de plans d'eau libres en connexion hydraulique avec la nappe...

Conditions aux limites et carte des transmissivités de l'aquifère à nappe libre des alluvions de la Crau

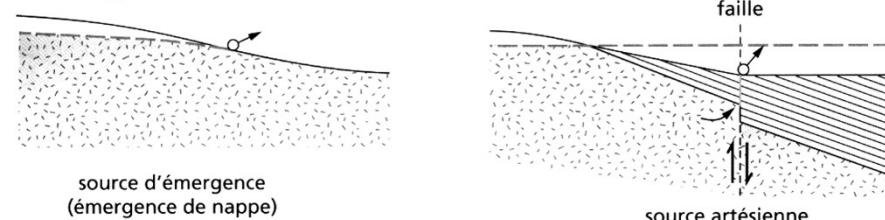


Les différents types de sources

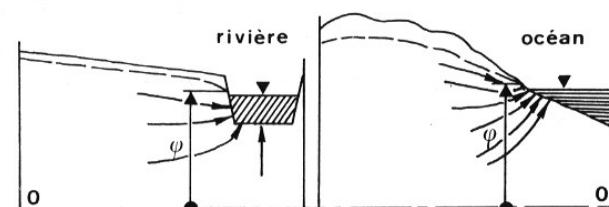
1) conditions aux limites = lignes de sources (potentiel imposé)



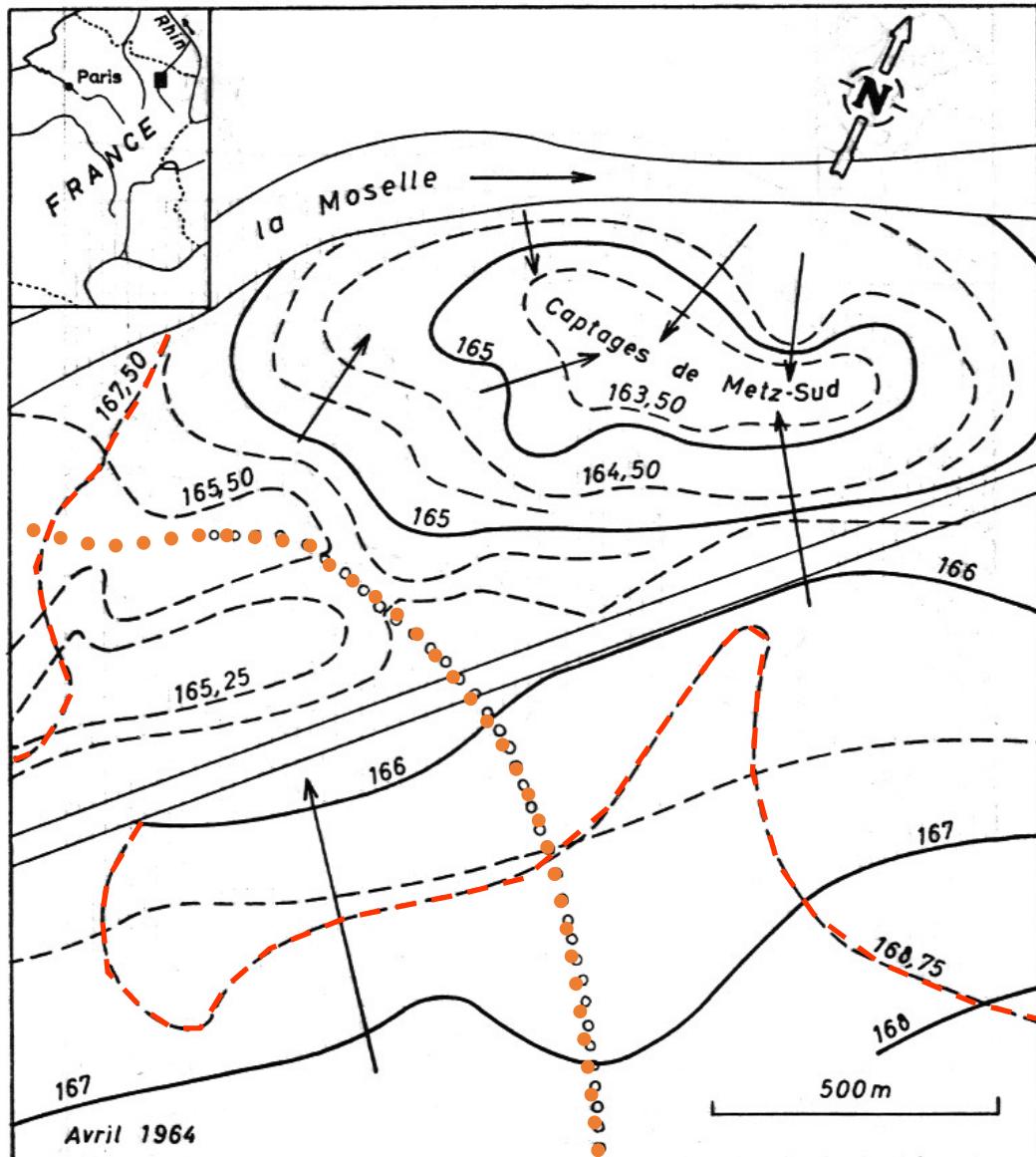
2) autres types de sources



RIVIERE DRAINANTE LIGNE DE RIVAGE



Exemple de configuration de nappe en fonction des conditions aux limites



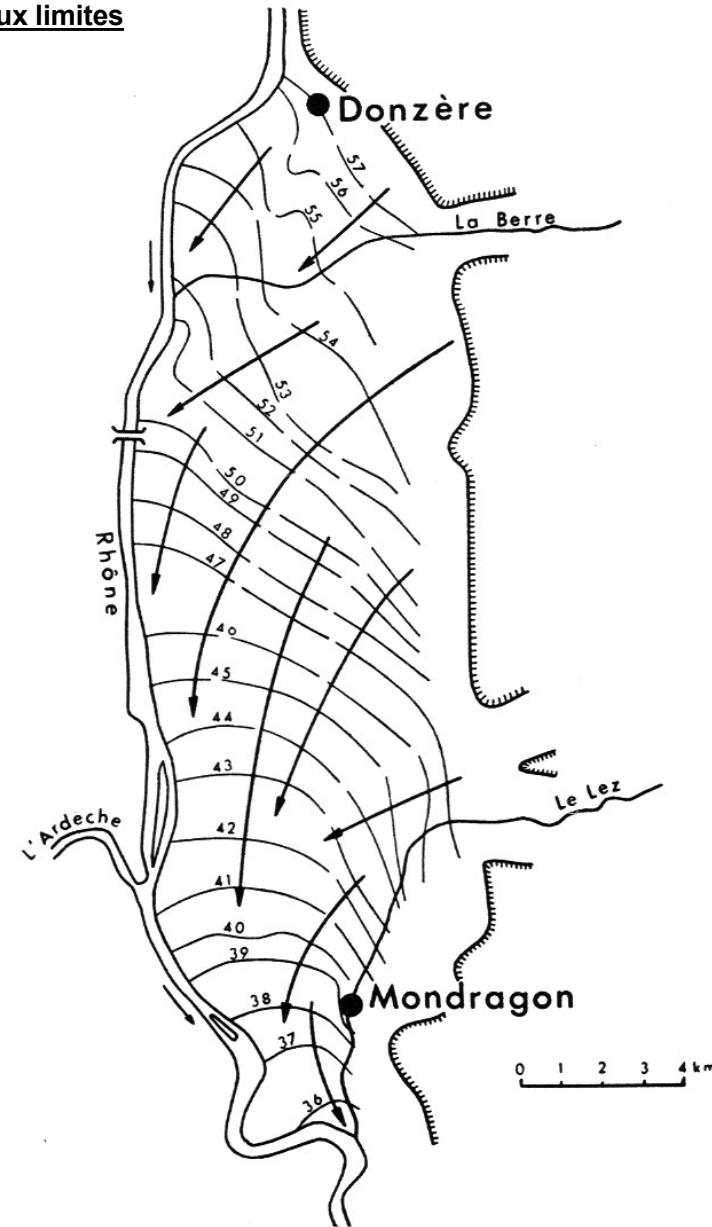
Carte de la surface piézométrique
de la nappe des
alluvions de la Moselle au
sud de Metz

Noter la dépression au nord due au
pompage des captage
de Metz-sud.

Exemple de configuration de nappe en fonction des conditions aux limites

Carte piézométrique de la nappe alluviale du Rhône de Donzère à Mondragon

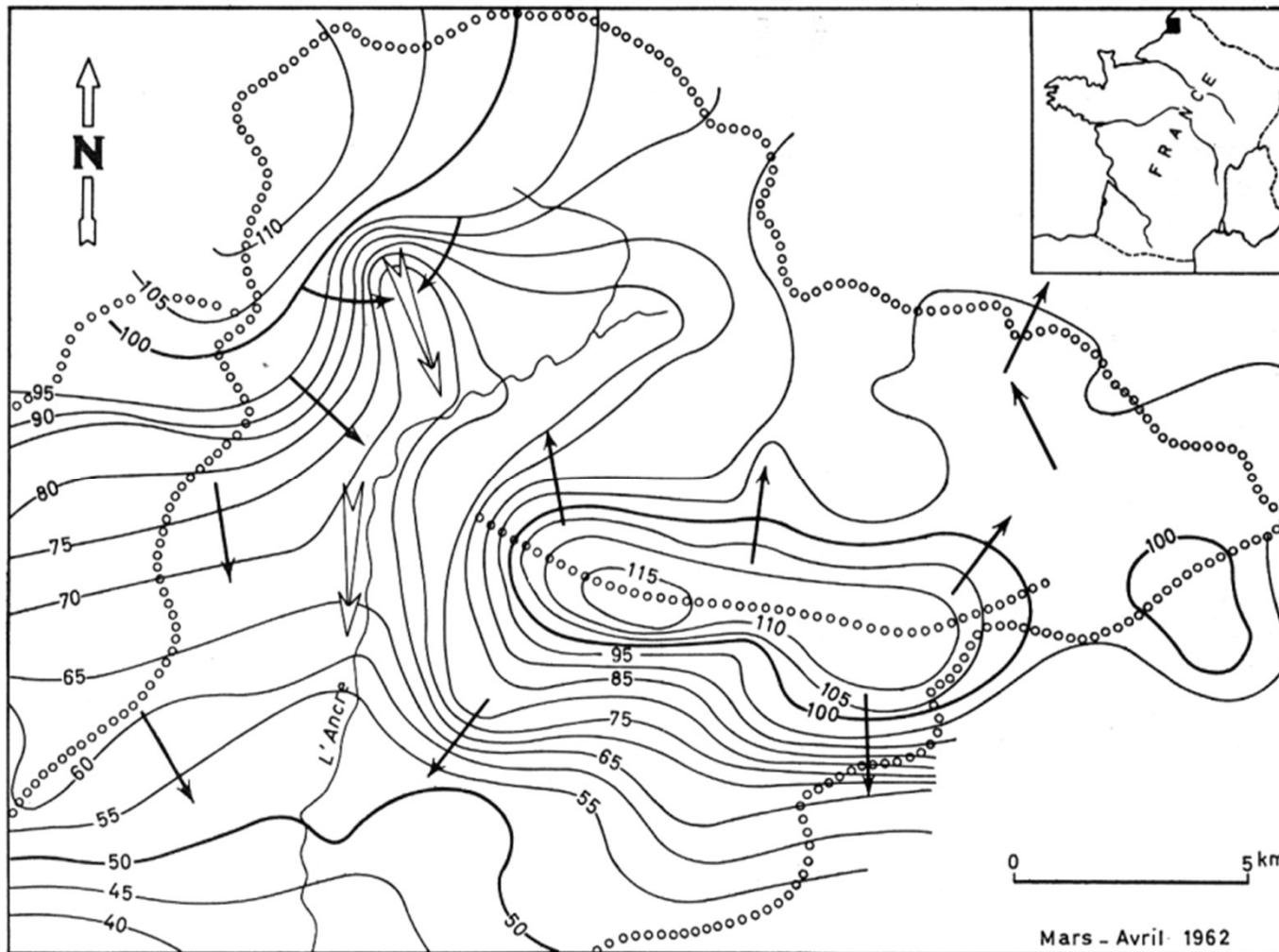
L'écoulement des eaux souterraines est indépendant de celui des eaux superficielles. Les affluents rive gauche alimentent la couche aquifère qui se déverse vers le Rhône.



Exemple de configuration de nappe en fonction des conditions aux limites

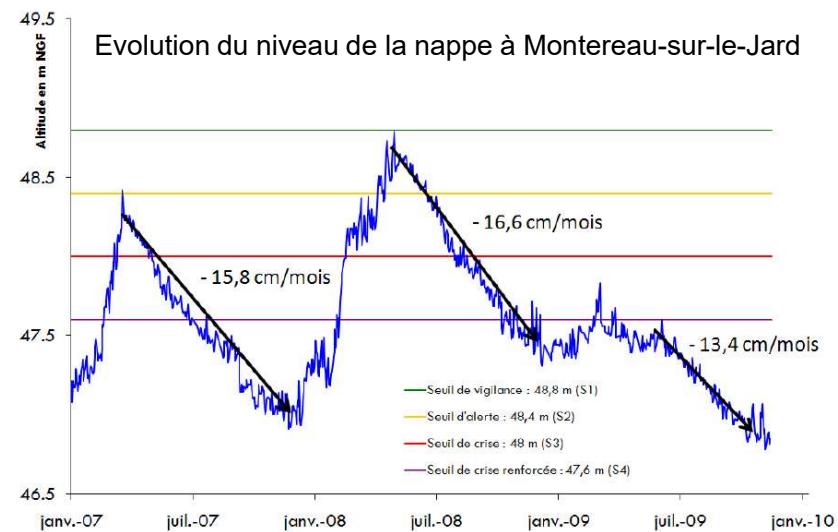
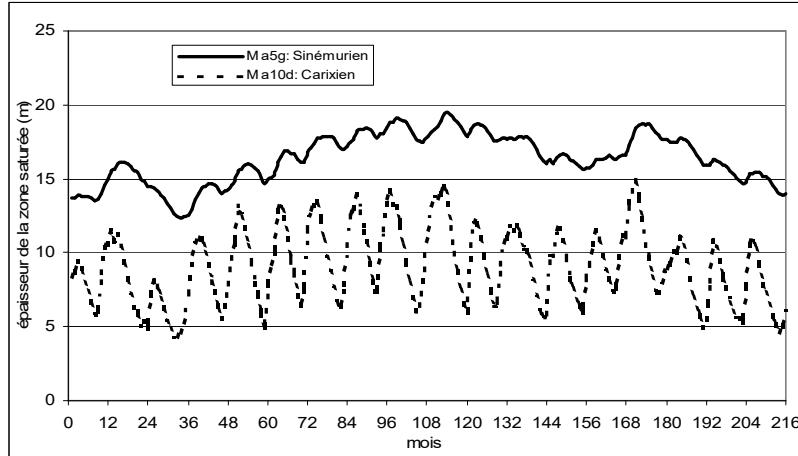
Carte piézométrique de la nappe de la craie du bassin de l'Ancre

Protubérance de la surface piézométrique due à une alimentation directe par l'eau des précipitations. Noter à l'ouest l'importante zone de drainage de la nappe par l'Ancre et la ligne de partage des eaux souterraine au centre



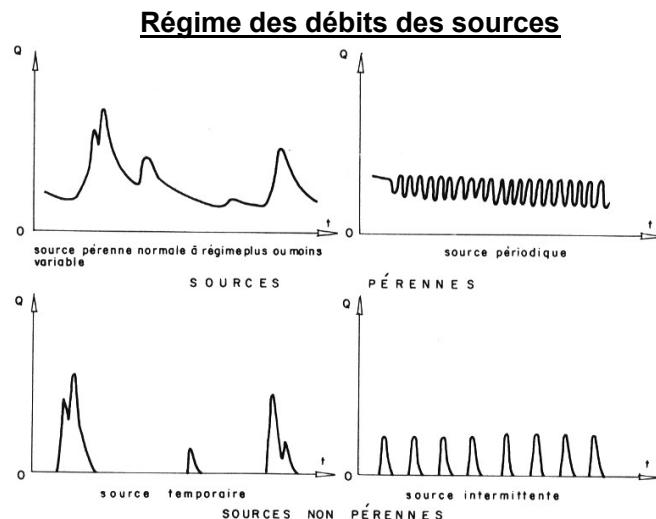
Fluctuations piézométriques

Fluctuation de la surface piézométrique de 1974 à 1991 pour 2 nappes de l'aquifère des G.A.L

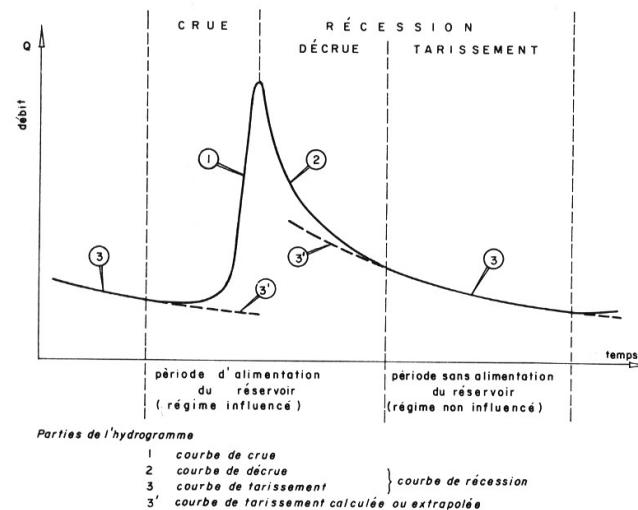


Caractérisation des aquifères et exploitation

Les sources: comme lieu et phénomène d'apparition et d'écoulement naturel d'eau souterraine à la surface du sol, leurs régimes physico-chimique renseigne sur les caractéristiques de l'aquifère.



Les phases hydrologiques



La courbe de tarissement exprime la loi de vidange de la couche aquifère. Elle permet de calculer le coefficient de tarissement a qui intègre les différentes variables de la loi de Darcy (n_e , T et K). La formule de tarissement la plus couramment utilisée est celle de Maillet qui admet une décroissance exponentielle des débit:

$$Q_t = Q_0 \cdot (1 - Cvn)^t \quad \text{avec}$$

ou

$$Q_t = Q_0 \cdot (k)^t$$

Il est ainsi possible d'estimer le volume d'eau dynamique disponible derrière la source à t :

$$V_t = \frac{Q_t}{Cvn} \quad (\text{voir } Cvn \text{ dans ORCHY})$$

Q_t : débit à l'instant t

Q_0 : débit au début du tarissement

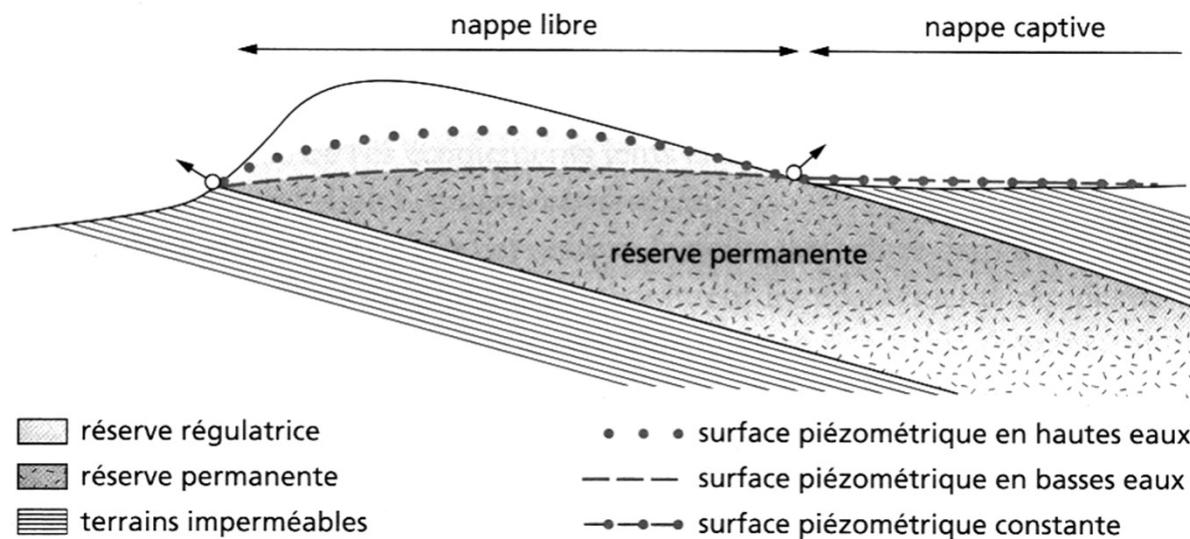
Cvn : coefficient de vidange des nappes (k : coefficient de tarissement)

t : temps écoulé depuis le début du tarissement

Il est également possible d'estimer, à partir d'un débit Q_0 le temps nécessaire pour que le réservoir se soit vidé de moitié en l'absence de réalimentation (« demi-vidange », $T_{1/2}$) :

$$T_{1/2 \text{ vidange}} = \frac{\ln(Q_0/2) - \ln Q_0}{\ln(k)} = \ln(2) / (-\ln(1 - Cvn))$$

Réserve régulatrice et réserve permanente



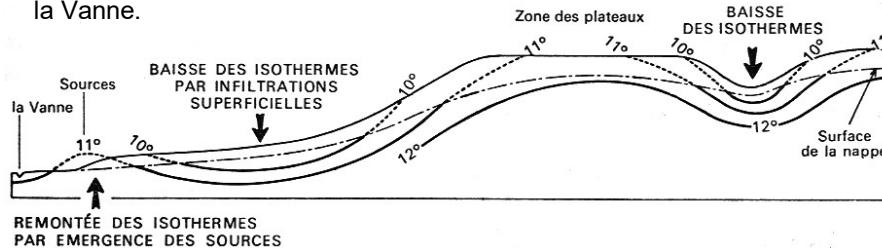
Réserve régulatrice: elle correspond au volume d'eau libre stocké dans la tranche de couche aquifère délimitée par 2 niveaux piézométriques extrêmes, minimal et maximal, de la surface piézométrique au cours de la période considérée.

Réserve permanente: ou profonde, représente le volume d'eau stocké dans la couche aquifère délimitée à la base par le substratum imperméable et au sommet par la surface piézométrique minimale

La réserve régulatrice peut être retrouvée dans ORCHY dans les fluctuations du réservoir nappes

Températures des sources

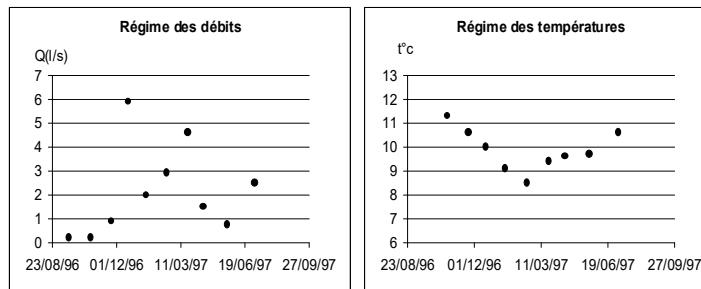
Profil des températures de l'eau de la nappe de la craie dans le bassin de la Vanne.



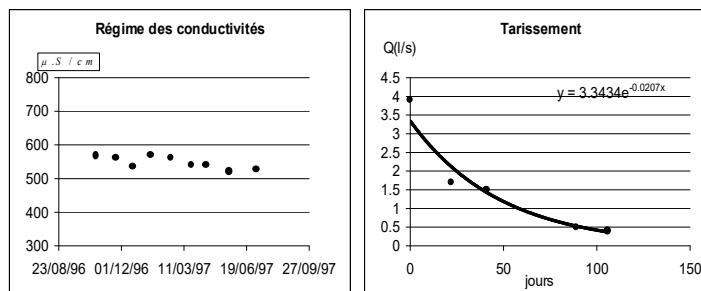
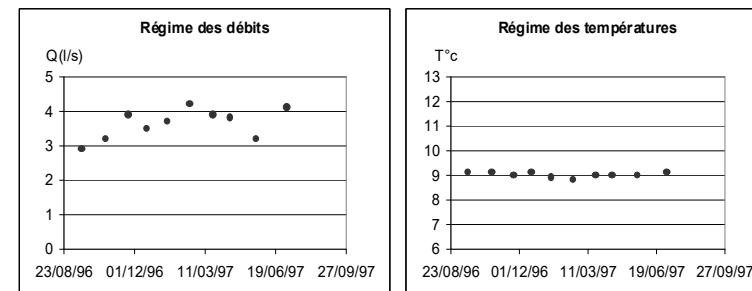
La température des sources permet notamment de distinguer une circulation souterraine de l'eau dans la zone d'hétérothermie ou d'homothermie.

Quatre caractéristiques physiques de source de l'aquifère multicouche des Grès d'Ardenne-Luxembourg

Aquifère peu capacitif



Aquifère très capacitif



La variabilité plus ou moins accusée du régime des débits, des températures et de la conductivité, ainsi qu'une décroissance plus ou moins rapide des débits en période de tarissement témoignent d'une circulation souterraine de l'eau plus ou moins rapide.

La conductivité électrique (μ.siemens / cm)

La conductivité est fonction de la concentration et de la nature des sels dissous (minéralisation)

	Conductivité (μ.siemens / cm)
Eau pure absolue	$3,6 \cdot 10^{-2}$
Eau très pure	0,7
Eau distillée	1,4 à 10
Eau de la Moselle	200
Eaux potables	100 à 5000