

Bruno Arfib
Université Aix-Marseille
Laboratoire CEREGE

Master Sciences de l'Eau

Cours d'Hydrogéologie générale

www.karsteau.fr

1- Introduction

Qu'est-ce que l'hydrogéologie?

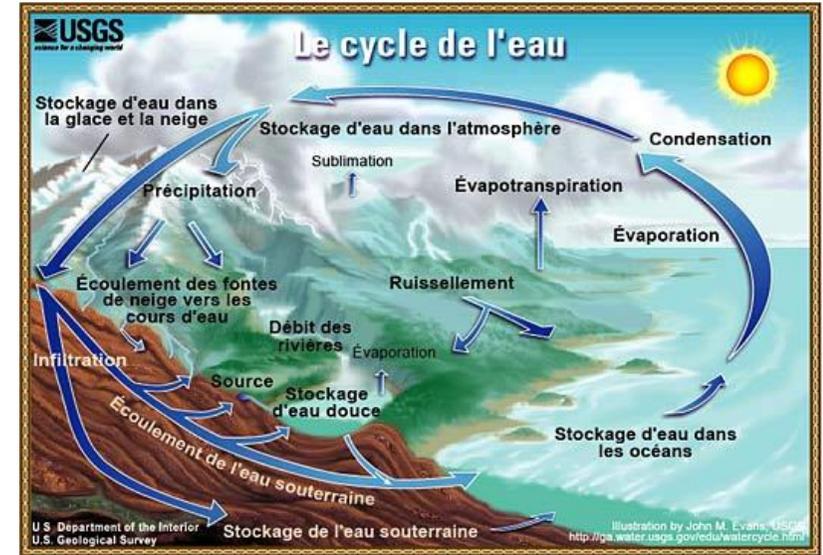
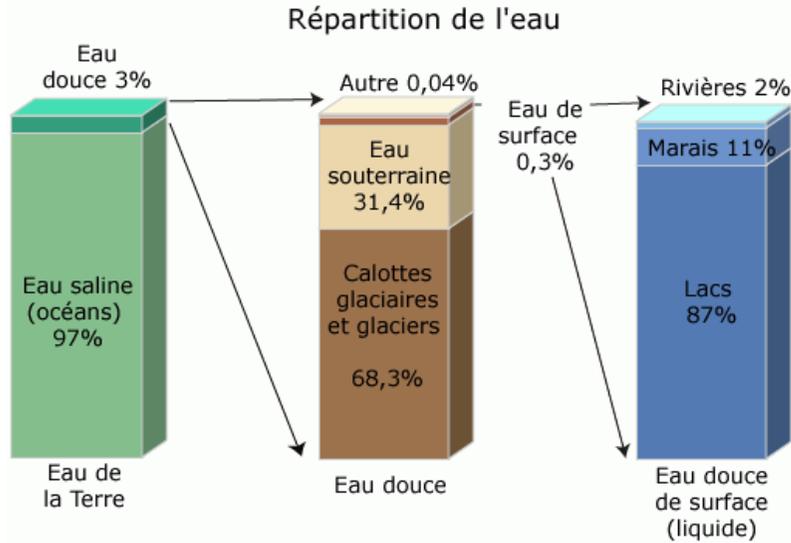
Pourquoi étudier l'hydrogéologie?

➔ eau souterraine = ressource en eau potable, relations eau souterraine - eau de surface (qualité de l'eau, quantité d'eau, écosystèmes), eau dans de nombreux risques (mouvements gravitaires (mouvement de terrain, avalanches), inondations, coulées boueuses)...

Objectifs du cours :

- Connaître les méthodes de mesure de terrain (in-situ) de l'eau souterraine.
- Connaître le vocabulaire hydrogéologique, les grands types d'aquifères et de nappes
- Quantifier l'écoulement de l'eau autour des ouvrages de captage (en particulier les forages)
- Connaître le cadre réglementaire de l'AEP et la définition des périmètres de protection
- Caractériser le phénomène d'intrusion saline en aquifère côtier.

L'eau sur la terre et le cycle de l'Eau



Estimation de la distribution globale de l'eau :

Source d'eau	Volume d'eau (km ³)	Volume d'eau (miles ³)	% d'eau douce	% d'eau totale
Océans, mers & baies	1,338,000,000	321,000,000	--	96.5 %
Calottes glaciaires, glaciers et neiges éternelles	24,064,000	5,773,000	68.7 %	1.74 %
Eau souterraine	23,400,000	5,614,000	--	1.7 %
douce	10,530,000	2,526,000	30.1 %	0.76 %
saline	12,870,000	3,088,000	--	0.94 %
Humidité du sol	16,500	3,959	0.05 %	0.001 %
Hydrolaccolithe & pergélisol	300,000	71,970	0.86 %	0.022 %
Lacs	176,400	42,320	--	0.013 %
d'eau douce	91,000	21,830	0.26 %	0.007 %
d'eau saline	85,400	20,490	--	0.006 %
Atmosphère	12,900	3,095	0.04 %	0.001 %
Eau marécageuse	11,470	2,752	0.03 %	0.0008 %
Rivières	2,120	509	0.006 %	0.0002 %
Eau biologique	1,120	269	0.003 %	0.0001 %
Total	1,386,000,000	332,500,000	-	100 %

Source: Gleick, P. H., 1996: Water resources. In Encyclopedia of Climate and Weather, ed. by S. H. Schneider, Oxford University Press, New York, vol. 2, pp.817-823.

Définitions

AQUIFERE

Un *aquifère* est un corps (couche, massif) de roches perméables comportant une zone saturée suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre :

- l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et
- le captage de quantité d'eau appréciable.

Un aquifère peut comporter une zone non saturée.

AQUITARD

Un *aquitard* est une formation peu perméable (ou semi-perméable), dans laquelle l'eau souterraine circule à faible vitesse. Ces formations peuvent assurer la communication entre des aquifères superposés par le phénomène de drainance.

AQUICLUDE

Les *aquicludes* sont des formations imperméables ne produisant pas d'eau.

NAPPE

Une *nappe* est l'ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique (Margat et Castany).

BASSINS VERSANTS

Le *bassin versant* représente l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et de ses effets.

Le *bassin versant hydrologique* est défini comme la totalité de la surface topographique drainée par un cours d'eau et ses affluents à l'amont du point le plus bas considéré.

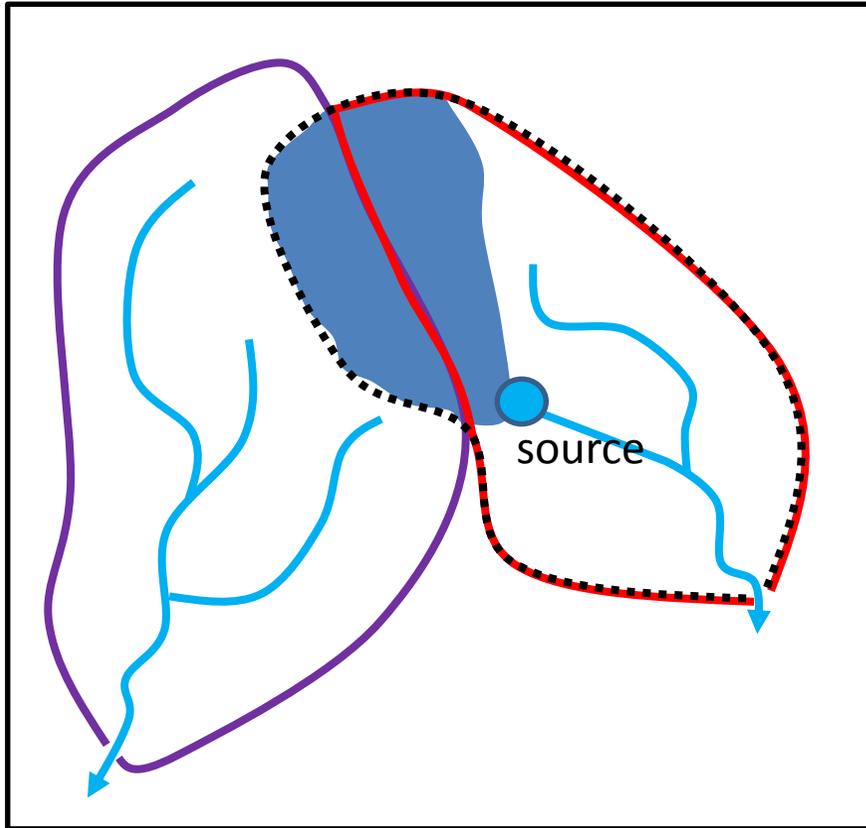
Le *bassin versant hydrogéologique, ou réel*, tient compte des écoulements d'eau souterraine. Il diffère du bassin versant hydrologique en fonction de la nature lithologique des roches à l'affleurement et en profondeur.

Bassin d'alimentation d'un captage, ou d'une source (ou impluvium) : surface topographique à travers laquelle l'eau d'infiltration (pluie, cours d'eau) alimente la nappe qui est drainée au niveau d'un captage ou d'une source.

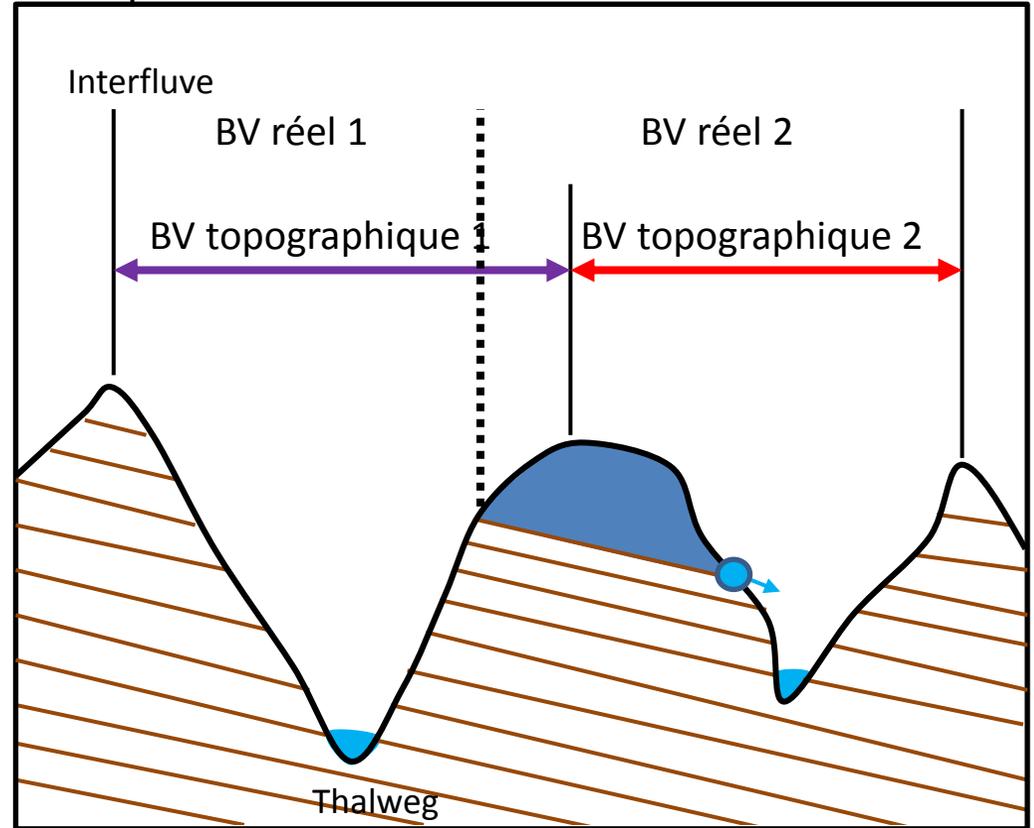
Le *niveau piézométrique* est l'altitude de la surface de l'eau d'une nappe d'eau souterraine lorsque celle-ci est en équilibre avec la pression atmosphérique. Le niveau piézométrique se mesure dans des puits, forages ou piézomètres, ainsi que sur les zones d'affleurement de l'eau souterraine (sources, lac ou rivière en connexion avec la nappe).

Bassins versants topographiques (ou hydrologique) / bassins versants réels (hydrogéologiques)

Plan



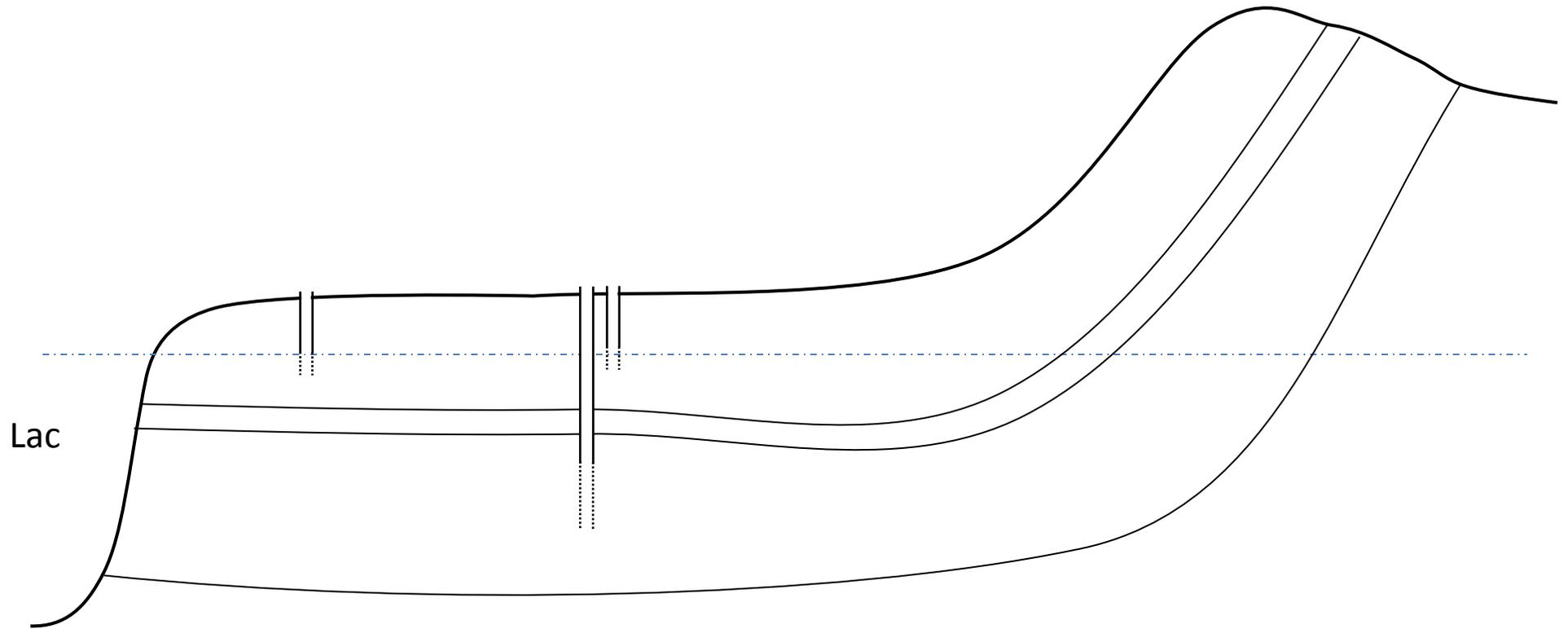
Coupe



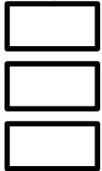
- Bassin versant topographique 1
- Bassin versant topographique 2

- Bassin versant réel 2
- zone karstique

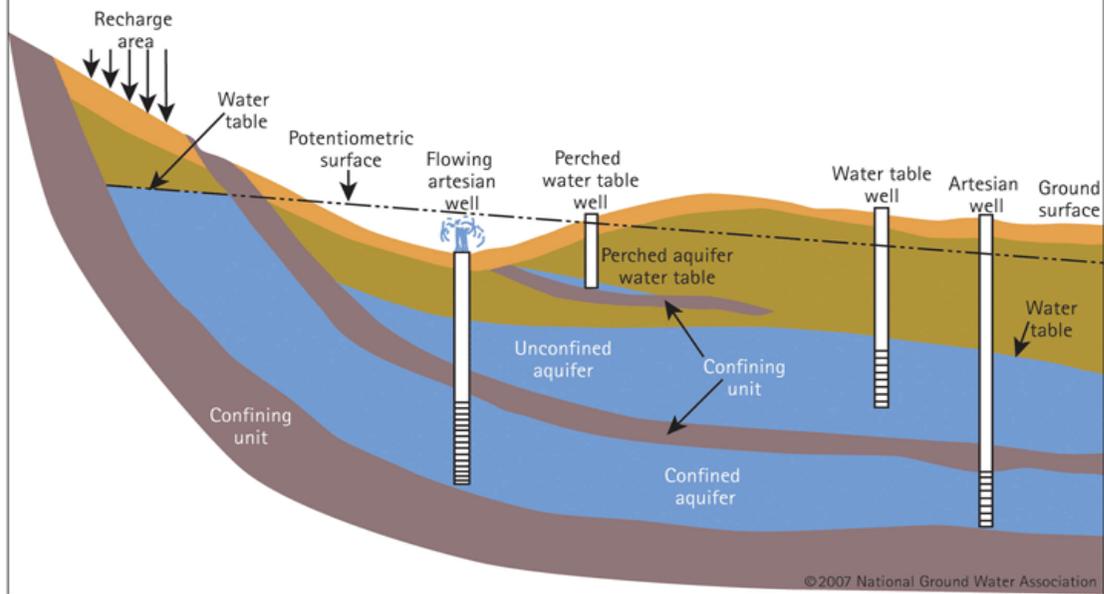
Coupe schématique de synthèse des différents types de nappes à l'échelle d'un bassin versant, et les particularités hydrogéologiques associées



Propriétés hydrogéologiques



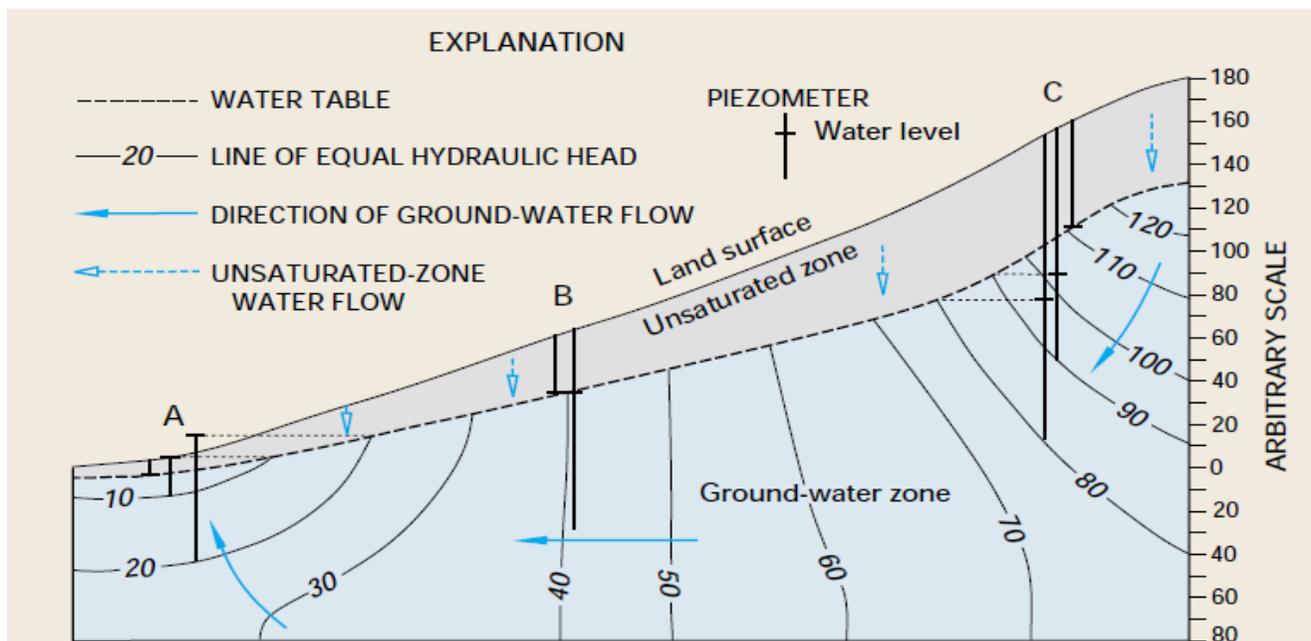
Confined/Unconfined Aquifers

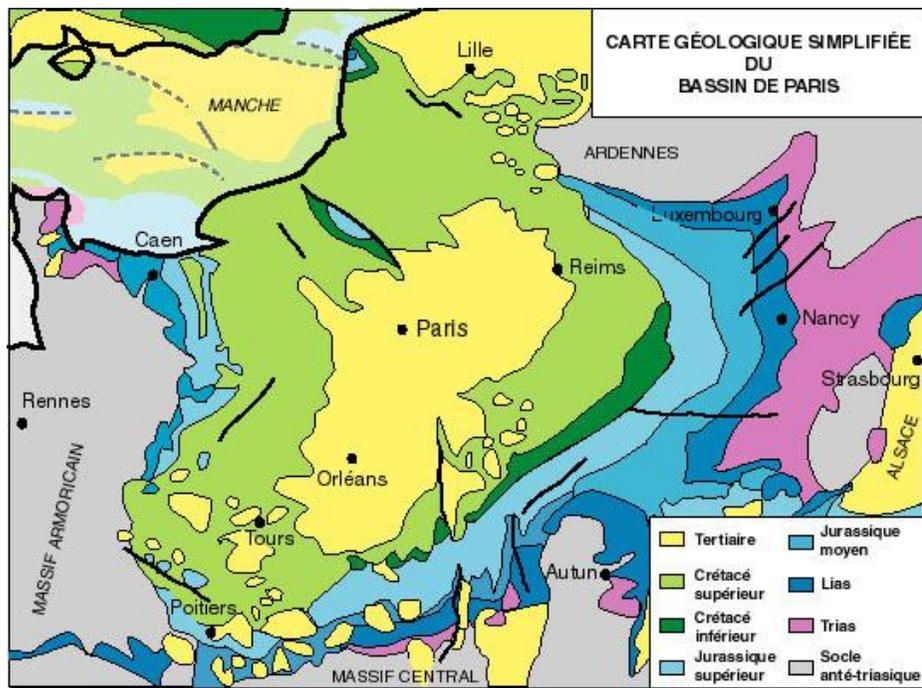


<http://www.ngwa.org/fundamentals/hydrology/pages/unconfined-or-water-table-aquifers.aspx>

Winter T.C., Harvey J.W., Franke O.L. (1998) - Ground Water and Surface Water A Single Resource. U.S. Geological Survey Circular 1139, Denver, Colorado.

Figure A-3. If the distribution of hydraulic head in vertical section is known from nested piezometer data, zones of downward, lateral, and upward components of ground-water flow can be determined.





Forage exécuté de 1835 à 1841 jusqu'à 548 m de profondeur (sables verts de l'Albien)

Fontaine artésienne de Grenelle, Place Breteuil
Eau à 28 °C. Niveau d'eau stabilisé à 33 m de hauteur

COUPE SYNTHÉTIQUE DU BASSIN DE PARIS

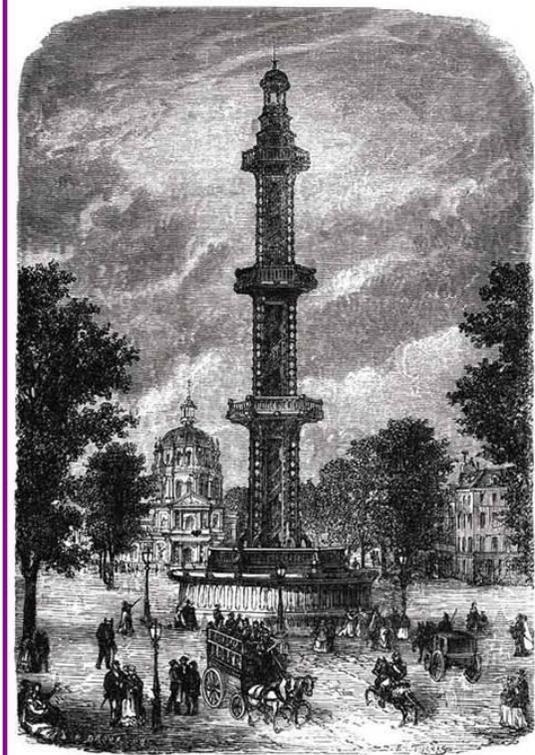
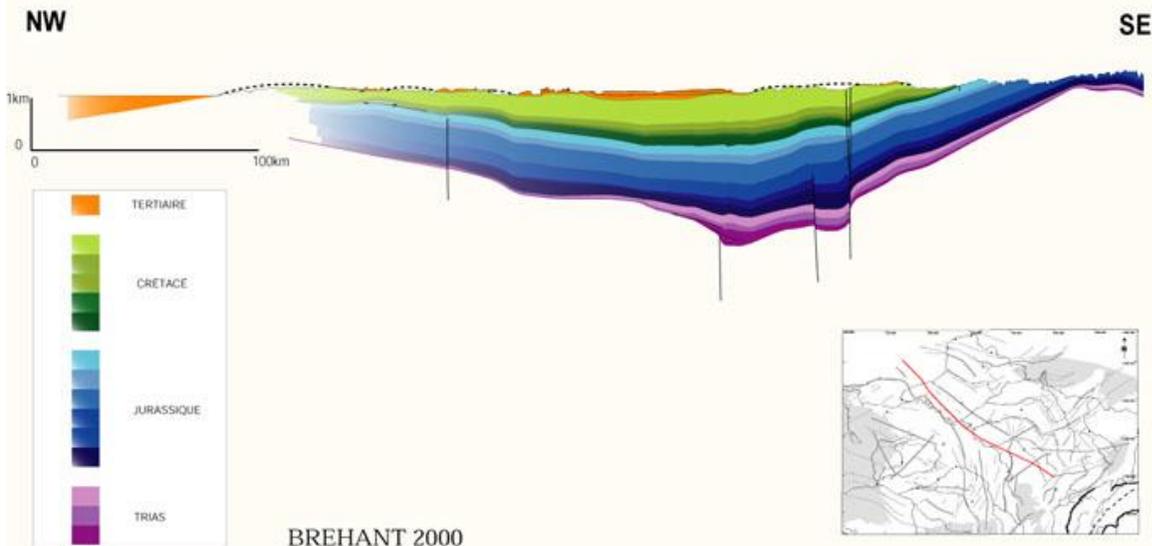
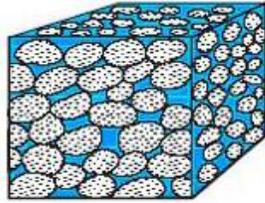


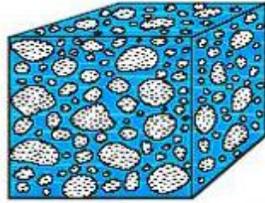
Fig. 381.— La colonne monumentale du puits de Grenelle, sur la place Breteuil.



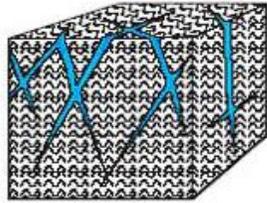
http://www.uved.fr/modules/moduleDynResNat/html/m2c2_m2c2p3_m2c2p3sp3_1.html



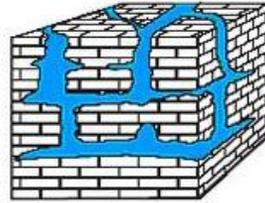
Well-sorted sand



Poorly sorted sand



Fractures in granite



Caverns in limestone

Conduit



Foux de Nans les Pins, France

Karst

Matrice

Calcaire du Plattenkalke, Crète



http://lithotheque.ac-aix-marseille.fr/Affleurements_PACA/04 Terrasses_bleone/04 Terrasses_alluv_anc.htm

arène granitique (poreux)



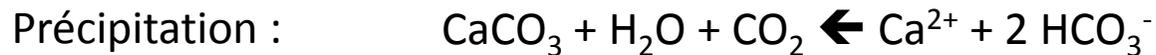
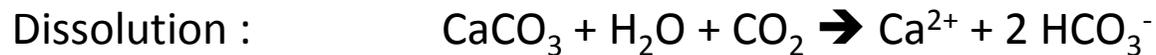
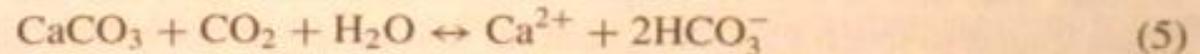
granite sain fracturé

Pourquoi les vides karstiques existent-ils?

Dissolution of carbonate minerals in the presence of CO_2 proceeds, according to the following stoichiometric equations:



The solubility product corresponding to reaction 3 is quite small. However, because the carbonate ion (CO_3^{2-}) is "removed" by protonation (eq 4), dissolution of carbonate minerals can proceed to a significant extent, depending on the quantity of carbonic acid that is available and delivers protons (eq 2). Equations 1–4 can be summarized by:

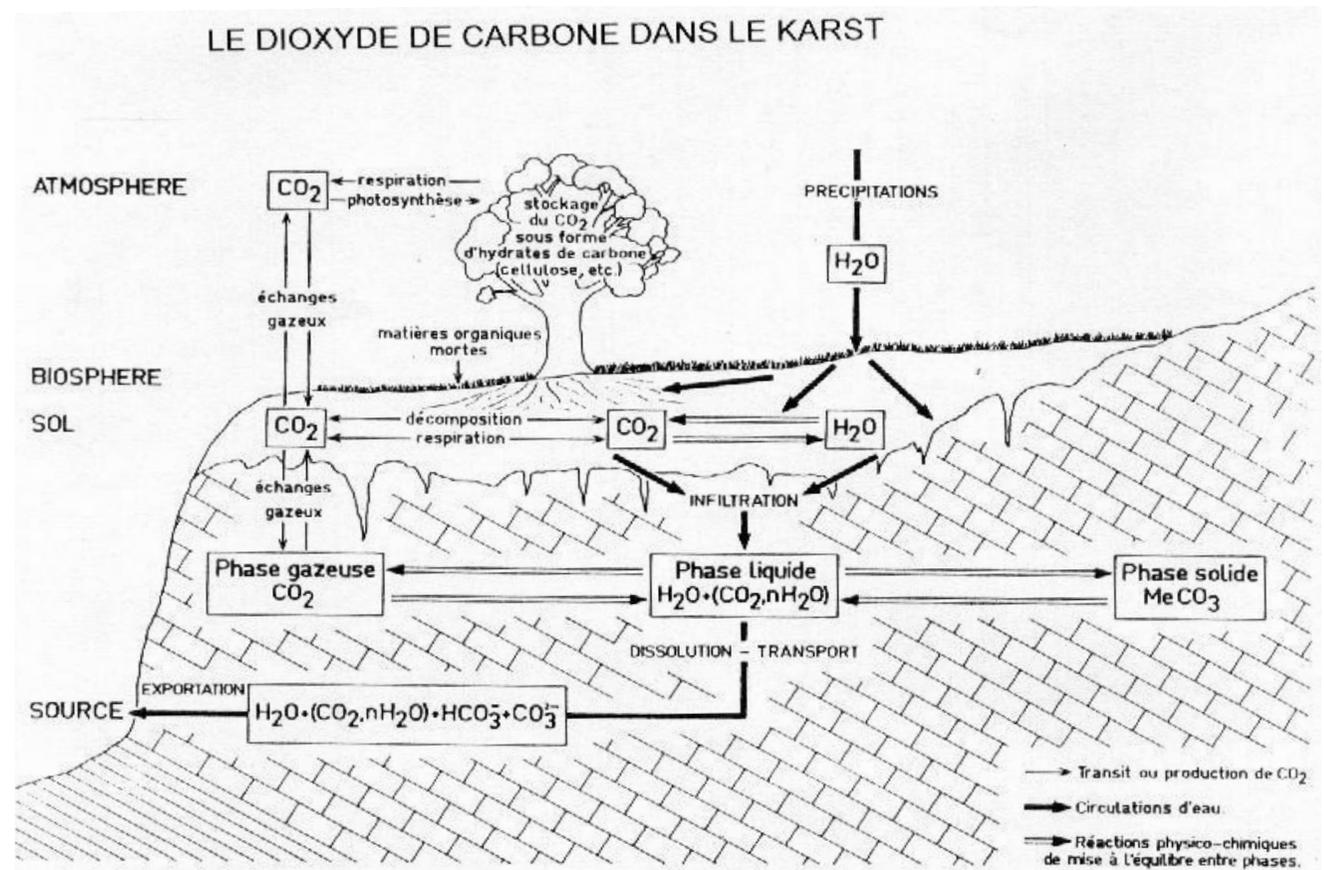


→ Karstification = dissolution du carbonate de calcium par une eau acide
Nécessite du CO_2 et un écoulement

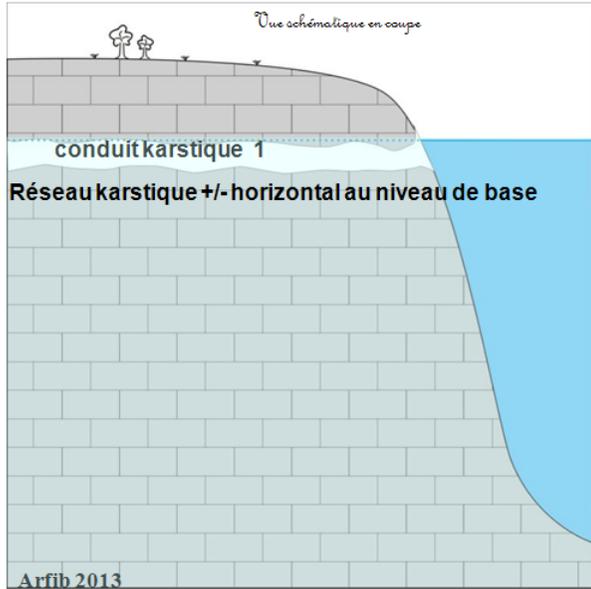
Pourquoi les vides karstiques existent-ils? Dissolution / Précipitation

L'origine du CO_2 ? → l'activité biologique dans le sol

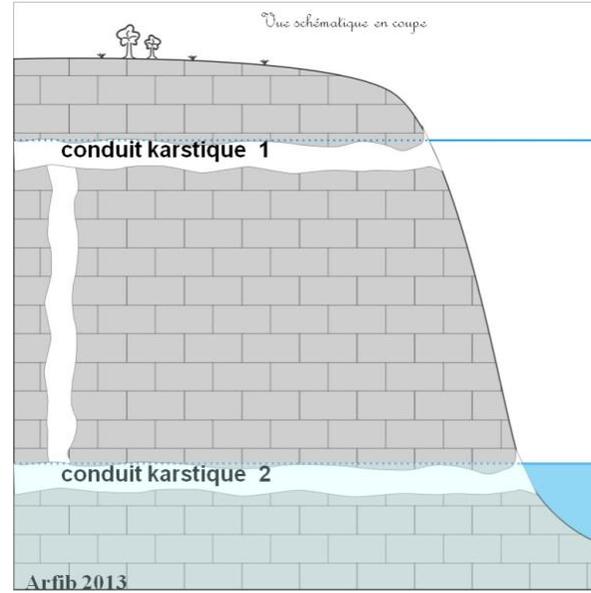
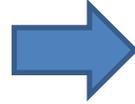
- Une pression partielle en CO_2 x100 dans le sol
- Déplacement du CO_2 dans l'eau (forme dissoute) et sous forme gazeuse (écoulement diphasique)



Niveau de développement des conduits karstiques : influence des variations du niveau de base



niveau 1



niveau 1

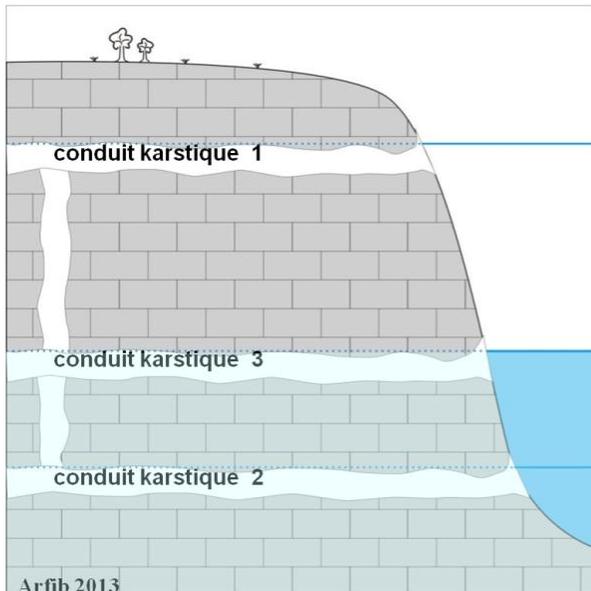
chute du
niveau de
base



niveau 2



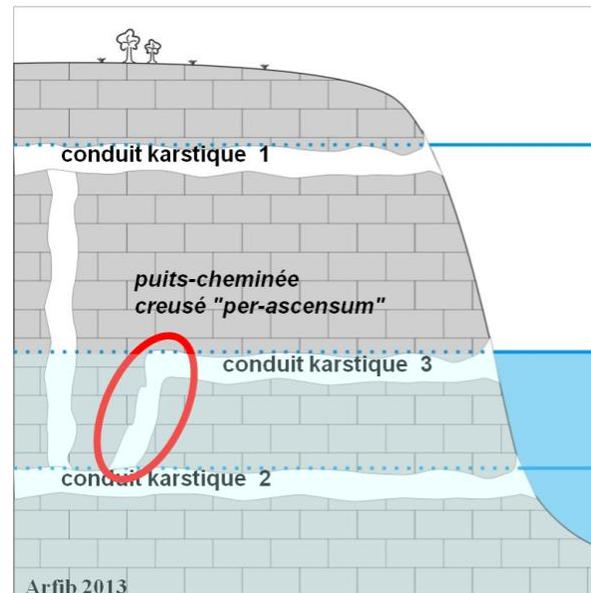
OU



niveau 1

niveau 3
montée du
niveau de
base

niveau 2



niveau 1

niveau 3
montée du
niveau de
base

niveau 2

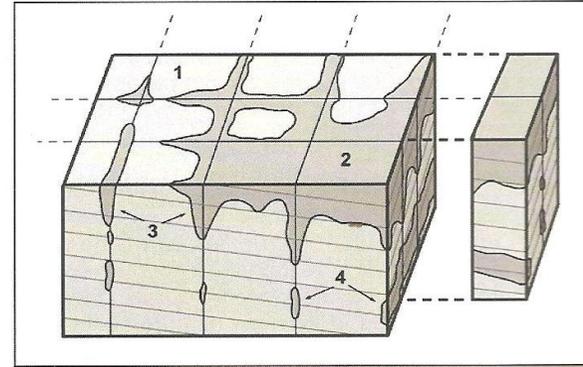
Pourquoi les vides karstiques existent-ils?

Un nouveau processus : la fantômisation

- concept nouveau, développé dans les années 2000 (Quinif)
- un mode de formation des vides en 2 temps, déconnectés temporellement

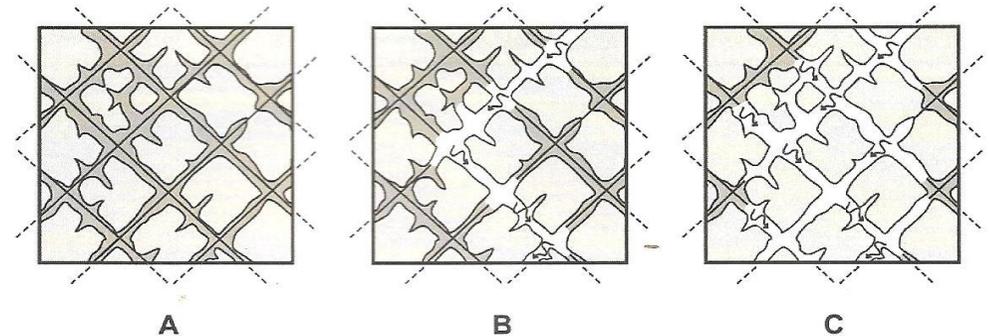
→ Formation d'un réseau karstique anastomosé, de type labyrinthe

1- Altération du calcaire en place avec un très faible gradient hydraulique, formant un milieu poreux isovolumique : le fantôme



Bloc-diagramme schématique montrant les différents types de fantômes. La roche saine (1) est parcourue de nombreuses discontinuités (fractures, joints de strates) qui sont exploitées préférentiellement par l'altération. Dans les parties fantômisées, on distingue les altérations en masse (2), en poches ou en couloir (3) et les pseudo-endokarsts (4) qui sont caractérisés par la présence d'un toit calcaire.

2- Lorsque le niveau de base varie, un fort gradient hydraulique se met en place qui provoque le soutirage du fantôme et l'export des matériaux poreux



Plan schématique d'un pseudo-endokarst. Tant qu'il n'y a pas assez d'énergie potentielle (courant), les circulations ne peuvent évacuer l'altérite (A). Puis, l'apparition d'un gradient hydraulique permet la mise en place d'une circulation et l'évidement des conduits par érosion régressive (B). Progressivement, le maillage tectonique sur lequel s'était calée l'altération se dessine et laisse apparaître un labyrinthe de galeries (C). Les parties trop éloignées des principales circulations resteront colmatées par le fantôme.

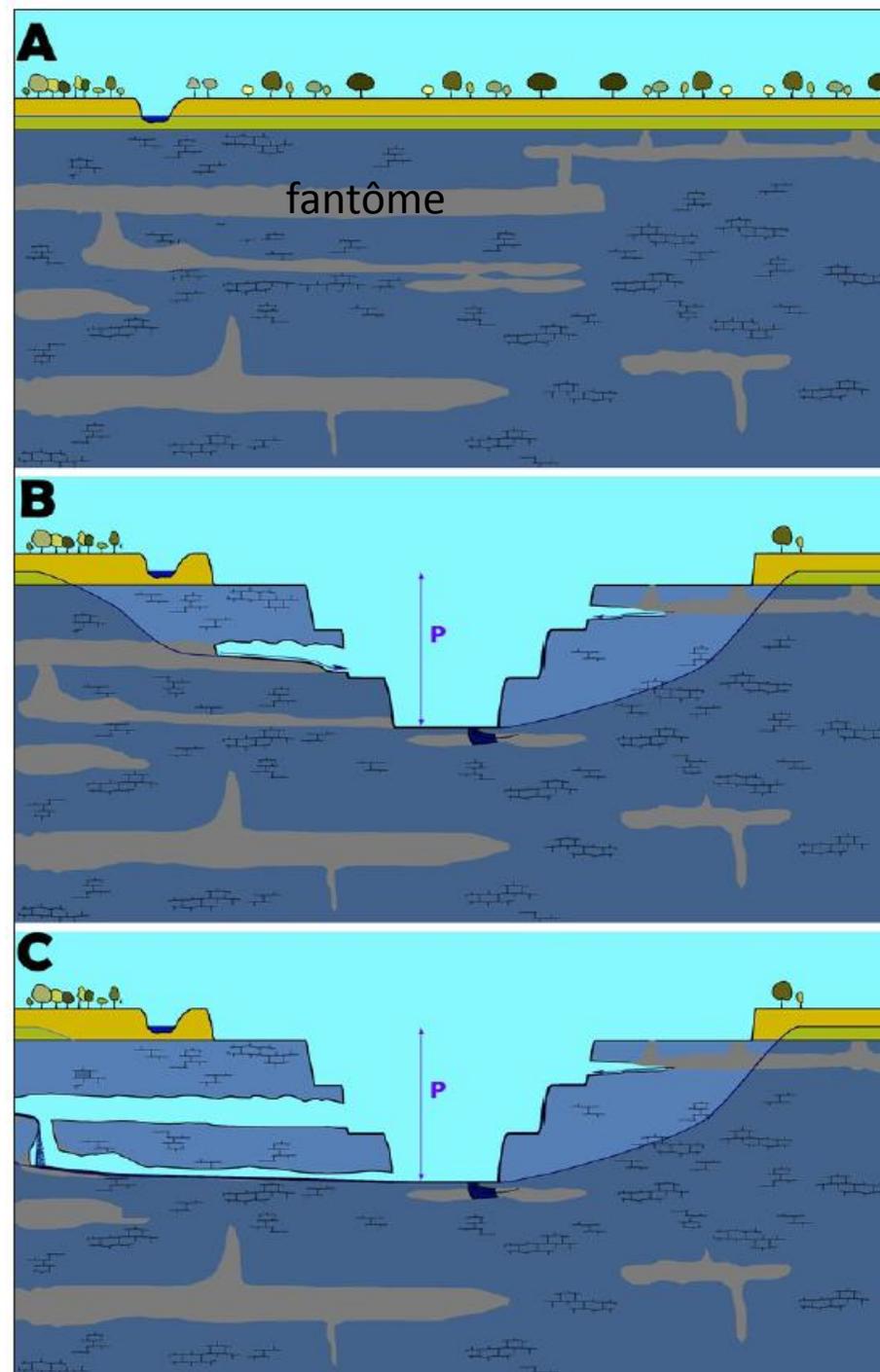
Fantômisation

Exemple extrait de Quinif et al 2014., carrière de Nocarcentre (Belgique)

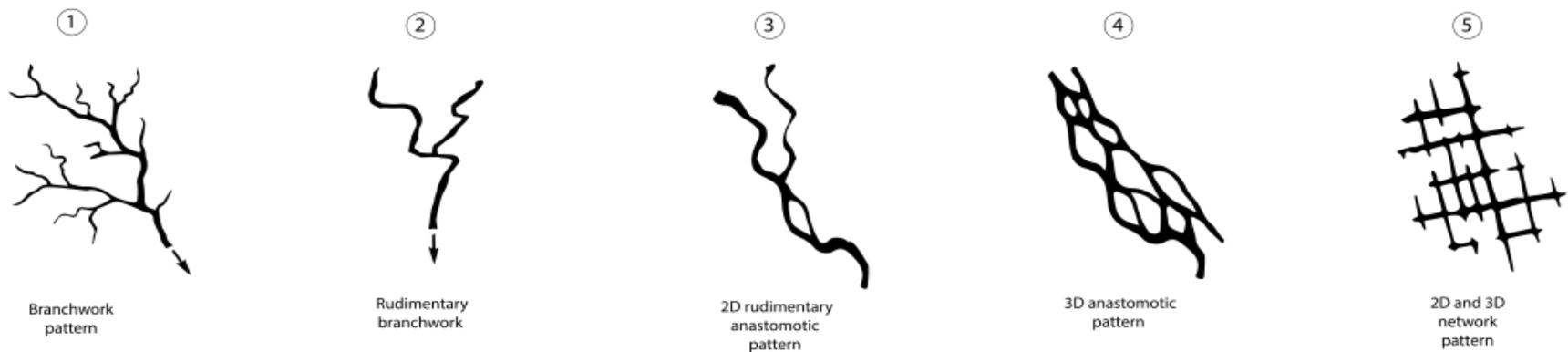
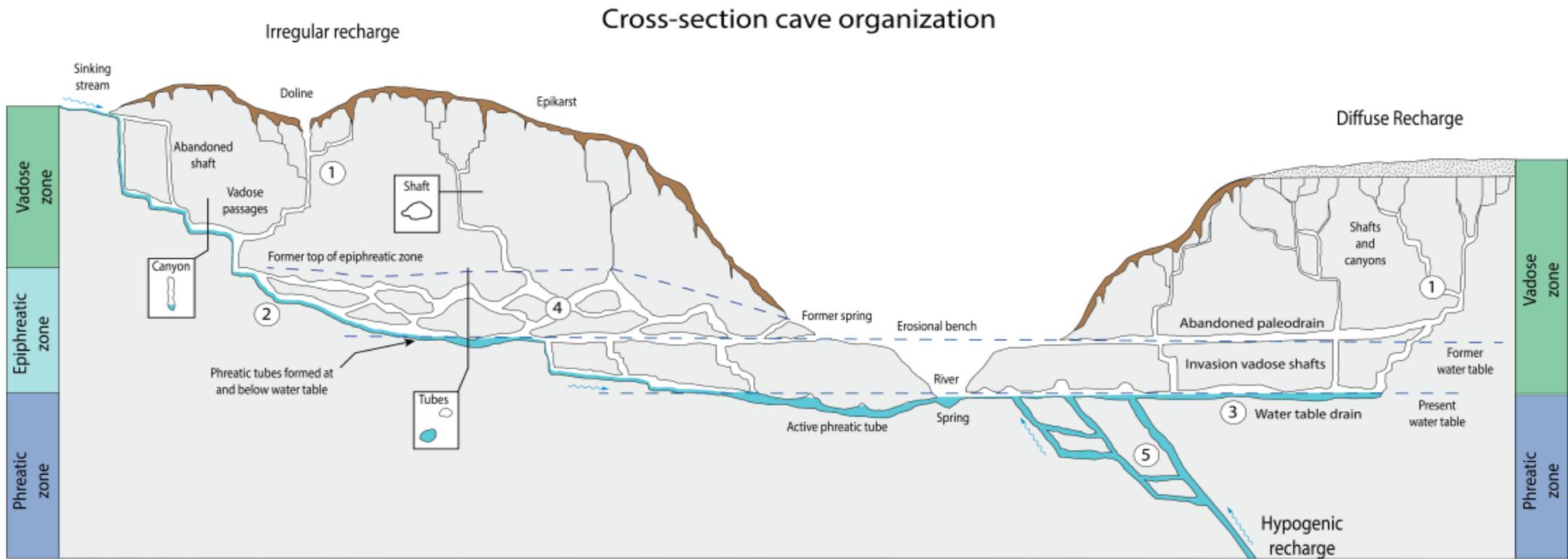
1- Altération isovolumique :
karstogénèse par fantômisation

2- Gradient hydraulique fort : spéléogénèse.
Evacuation des matériaux meubles (le fantôme) et
formation d'un vide de grande dimension

3- Gradient hydraulique fort :
évolution rapide à l'échelle humaine
(formation du vide de grande dimension en
quelques mois-années)

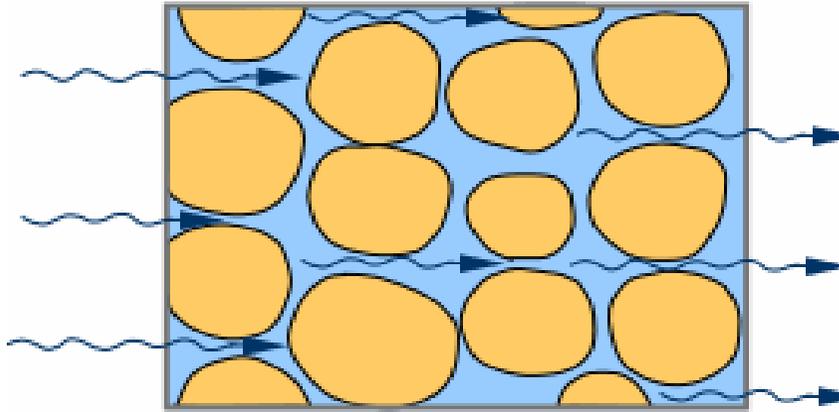


Une organisation du réseau karstique en fonction de son histoire spéléogénétique

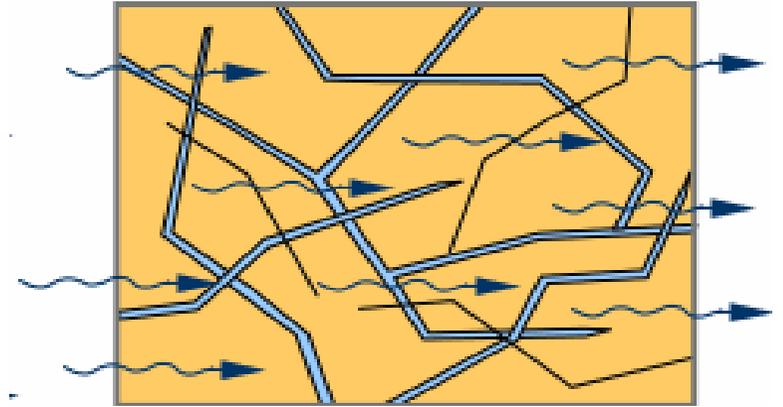


Plan view cave pattern

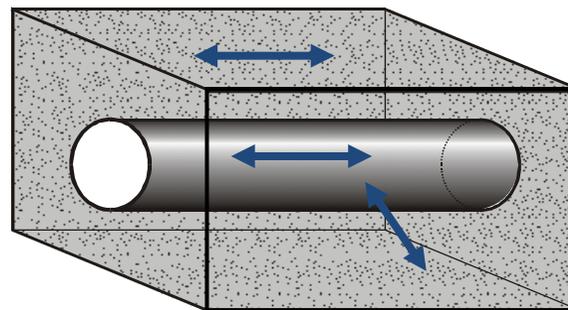
Les grands types d'aquifères



Milieu poreux



Milieu fracturé



Milieu karstique

VER Volume Élémentaire Représentatif.

Le VER est un volume d'aquifère qui est représentatif de la propriété moyenne d'une plus grande zone. Il doit être suffisamment grand pour contenir un grand nombre de pores, de façon que l'on puisse y définir une propriété moyenne globale, avec l'assurance que l'effet de fluctuation d'un pore à l'autre sera négligeable. Il doit être suffisamment petit pour pouvoir faire une mesure sur ce volume.

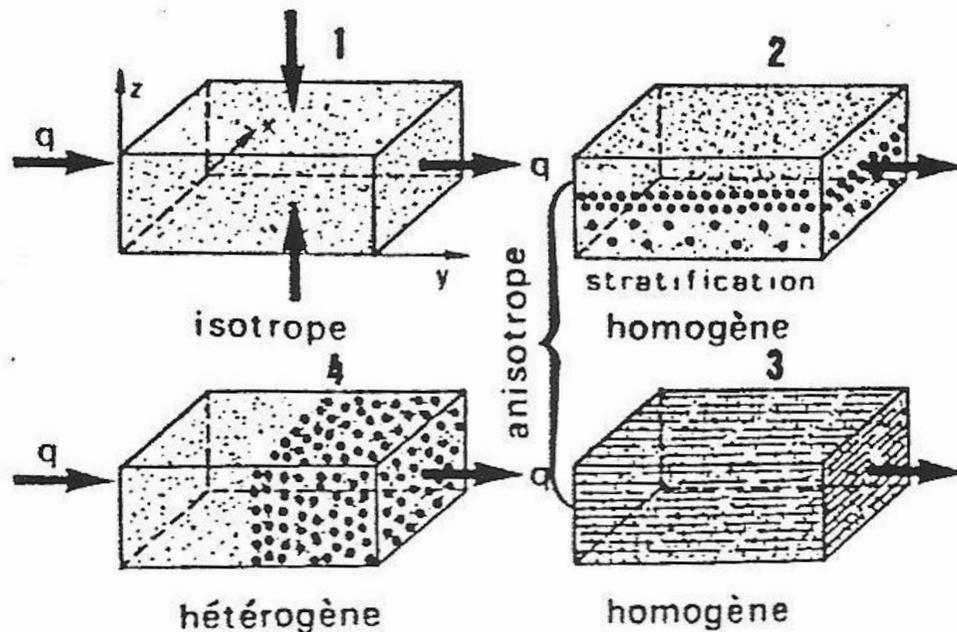


Figure 37 - Isotropie (1) et anisotropie (2, 3, 4). Homogénéité (2 et 3) et hétérogénéité (4).

3 grands types d'aquifères (schéma à modifier en cours)

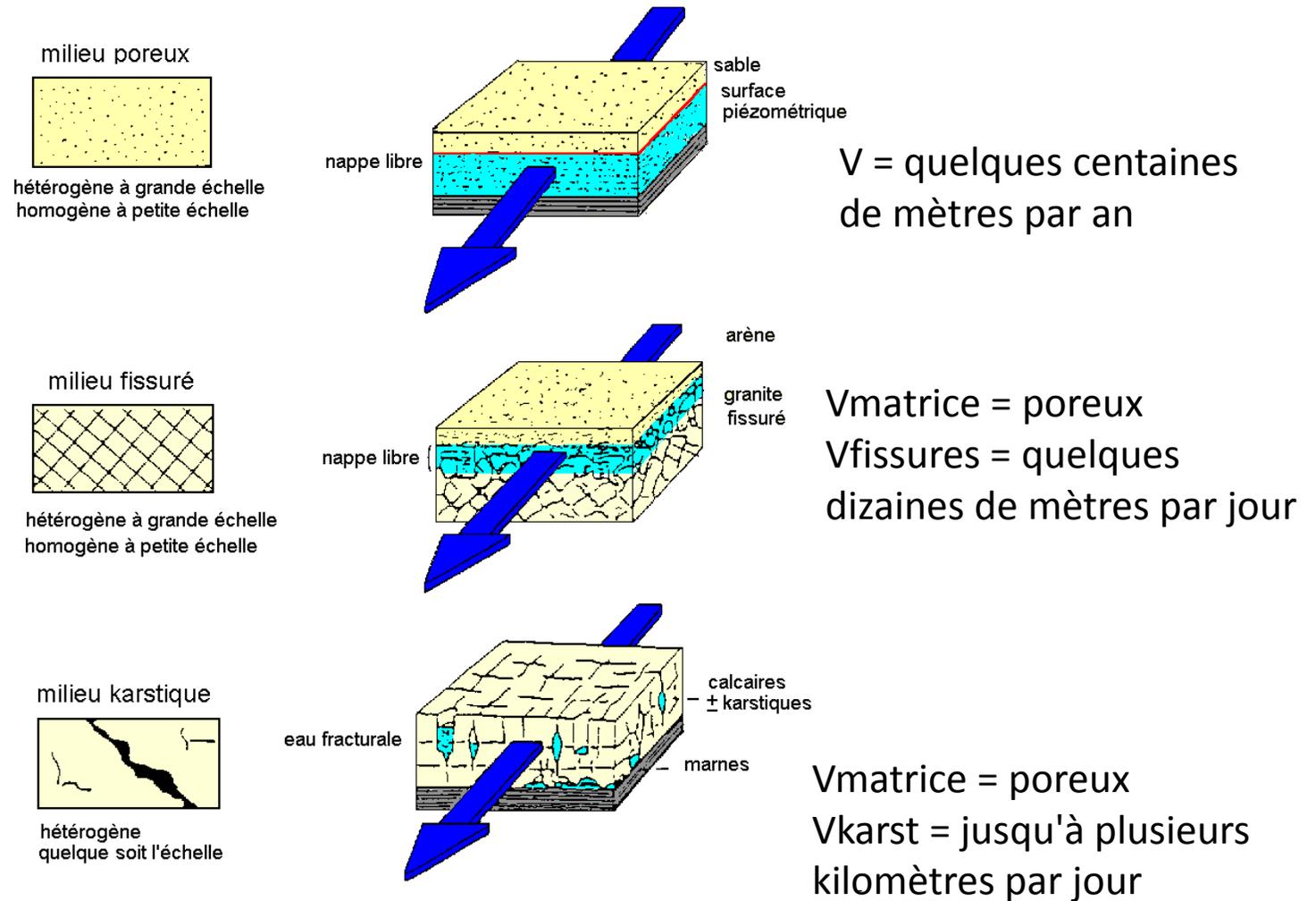


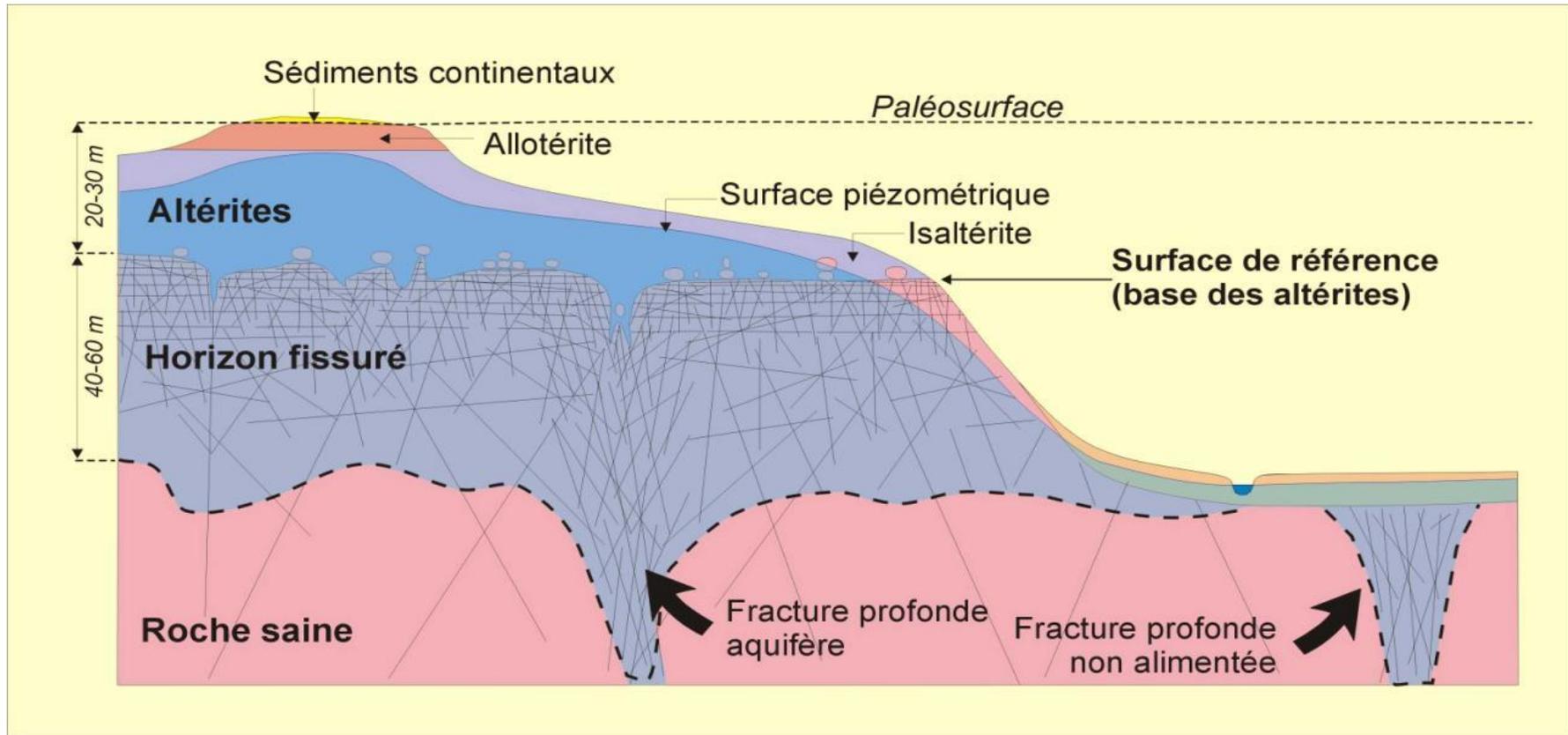
Figure 7-16A: Hétérogénéité des aquifères et vitesse d'écoulement (adapté de DROGUE in GUILLEMIN et ROUX).

Table 5.11 Principal differences between single-, double- and triple-porosity aquifers. Most karst aquifers have triple-porosity characteristics Reproduced from Worthington, S. R. H., and Ford, D. C., Chemical hydrogeology of the carbonate bedrock at Smithville. Smithville Phase IV Bedrock Remediation Program. Ministry of the Environment, Ontario, 2001

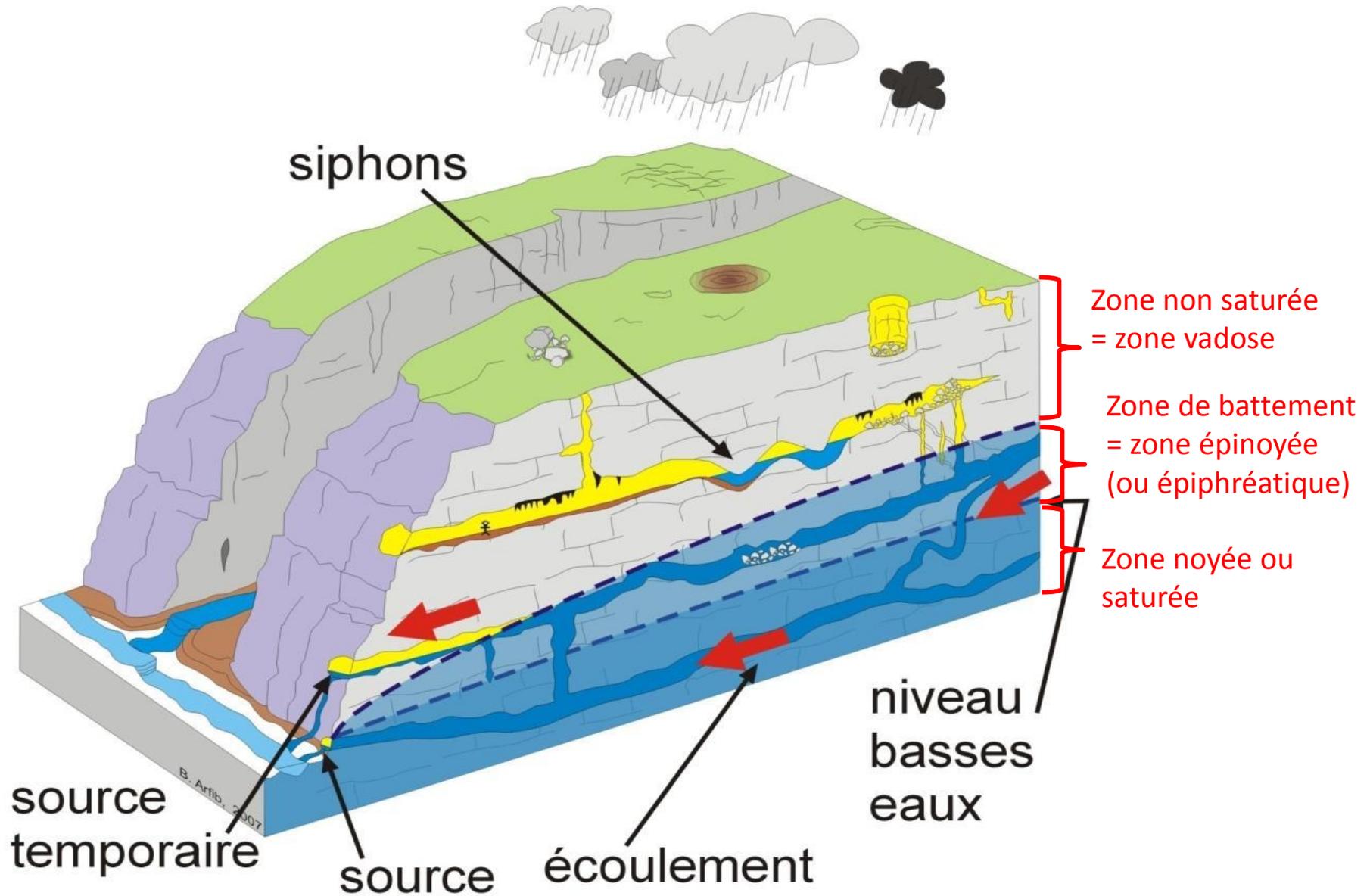
Parameter	Aquifer type		
	Single porosity (porous medium)	Double porosity	Triple porosity (karst)
Flow components	Matrix	Matrix Fracture	Matrix Fracture Channel
Flow laws	Darcy	Darcy Hagen–Poiseuille	Darcy Hagen–Poiseuille Darcy–Weisbach
Flow modes	Laminar	Laminar	Laminar Turbulent
Flow lines are	Parallel	Mostly parallel	Convergent to channels

Les grands types d'aquifères : Milieu fissuré

Schéma conceptuel stratiforme d'un aquifère de socle
(Wyns et al, Bulletin de la Société Géologique de France 2004)



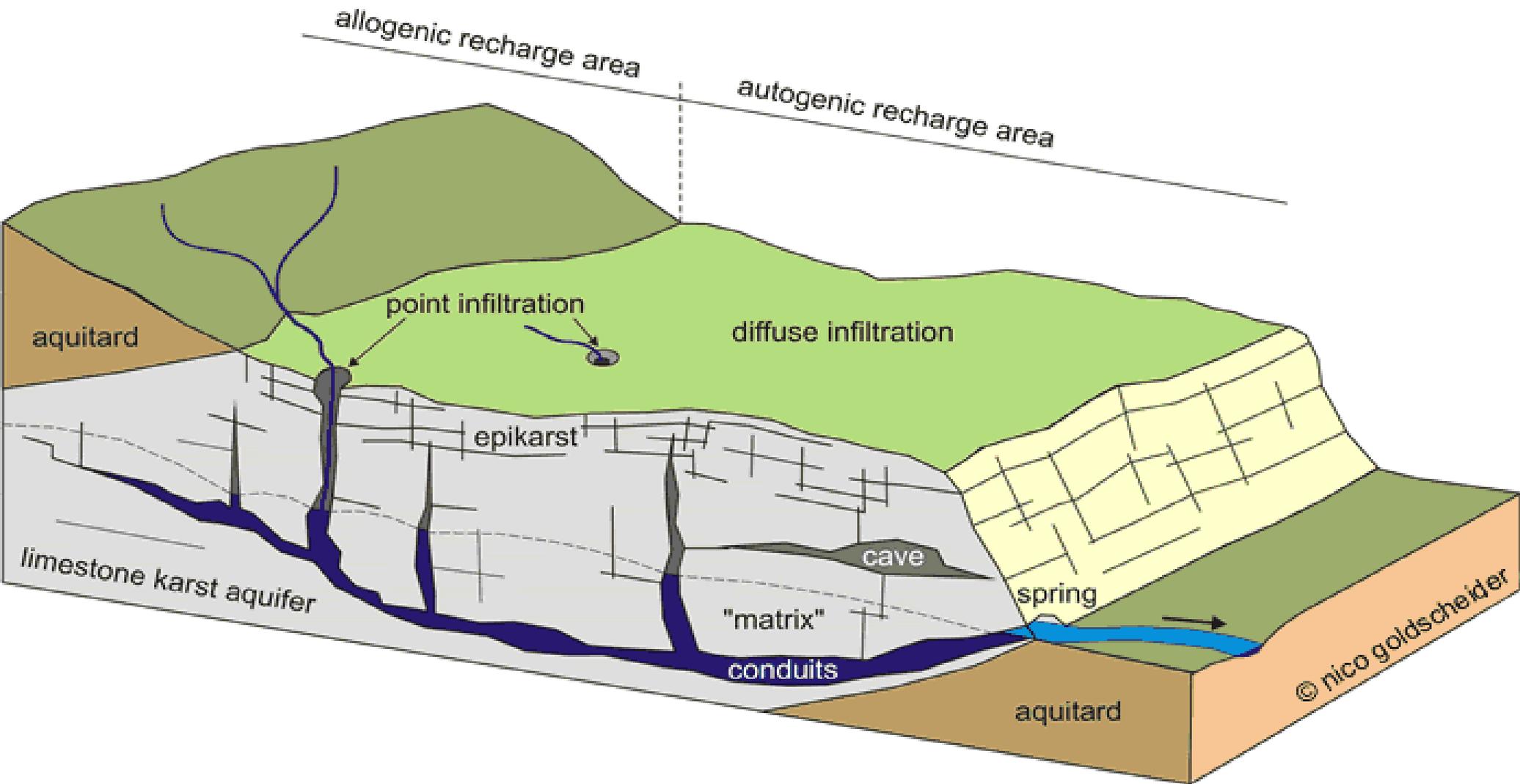
L'aquifère karstique : Ecoulement en hautes eaux



L'aquifère karstique

Recharge allochtone

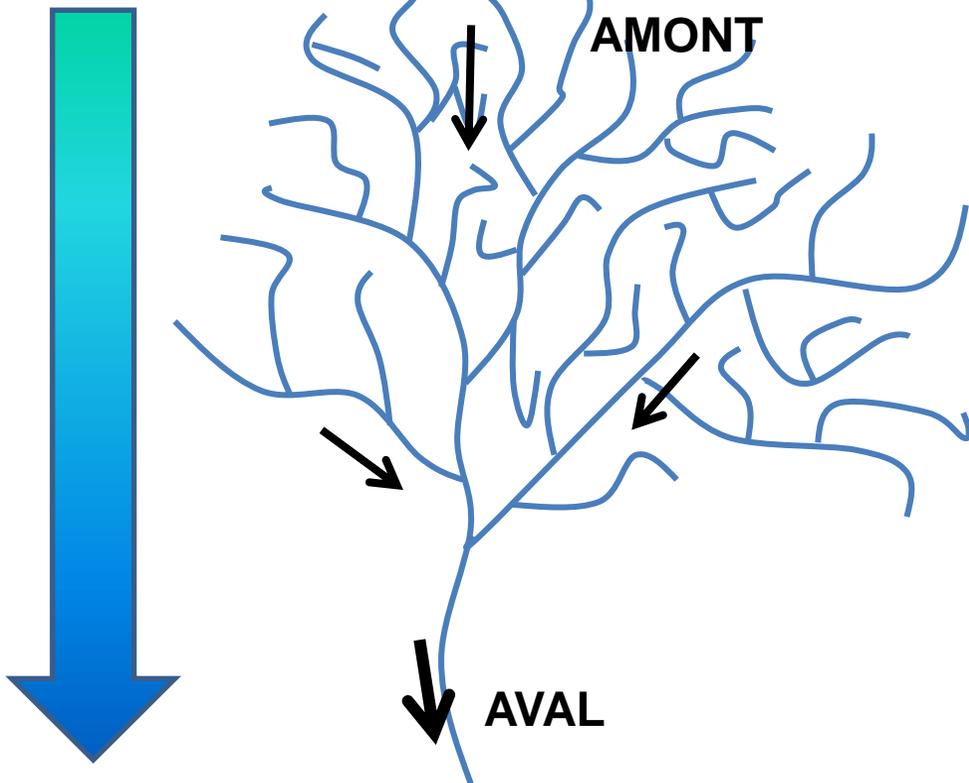
Recharge autochtone



Tous les aquifères karstiques ne sont pas identiques

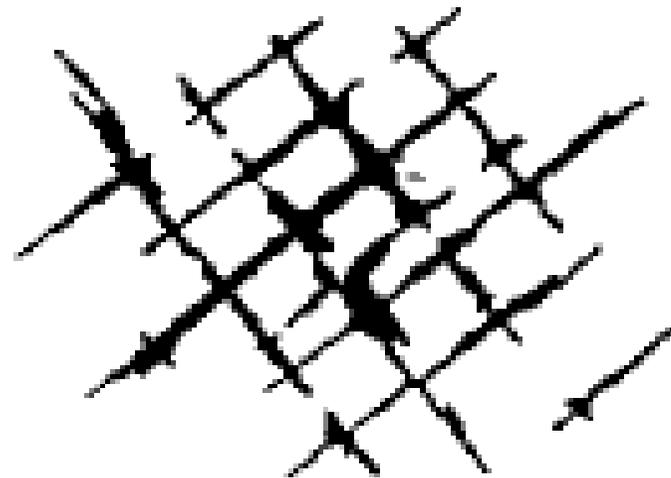
**Réseau karstique hypothétique
vu en plan (type Branchwork)**

Faible débit par drain karstique
Forte densité de drains



Fort débit dans le drain principal
Difficulté d'atteindre le drain principal
par forage

**Réseau karstique hypothétique
vu en plan (type Network)**



FISSURES, NETWORKS

Palmer 1991

Le Ragas de Dardennes

Un gouffre, une source temporaire, un piézomètre, un exutoire de trop-plein lors des mises en charge du karst



photo du 08/10/2013

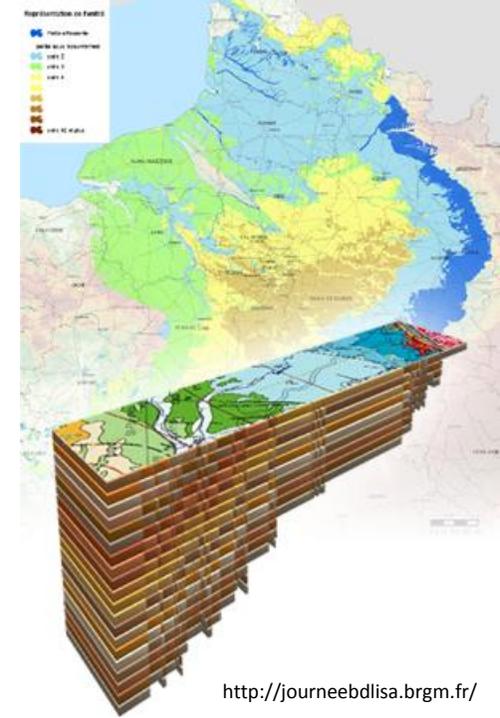
crue de janvier 1999



photo P. Maurel et T. Lamarque

Qu'est-ce que le référentiel BDLISA ?

BDLISA un référentiel géographique proposant un découpage du territoire national en **entités hydrogéologiques (formations géologiques aquifères ou non)**.



Une entité hydrogéologique est une partie de l'espace géologique :

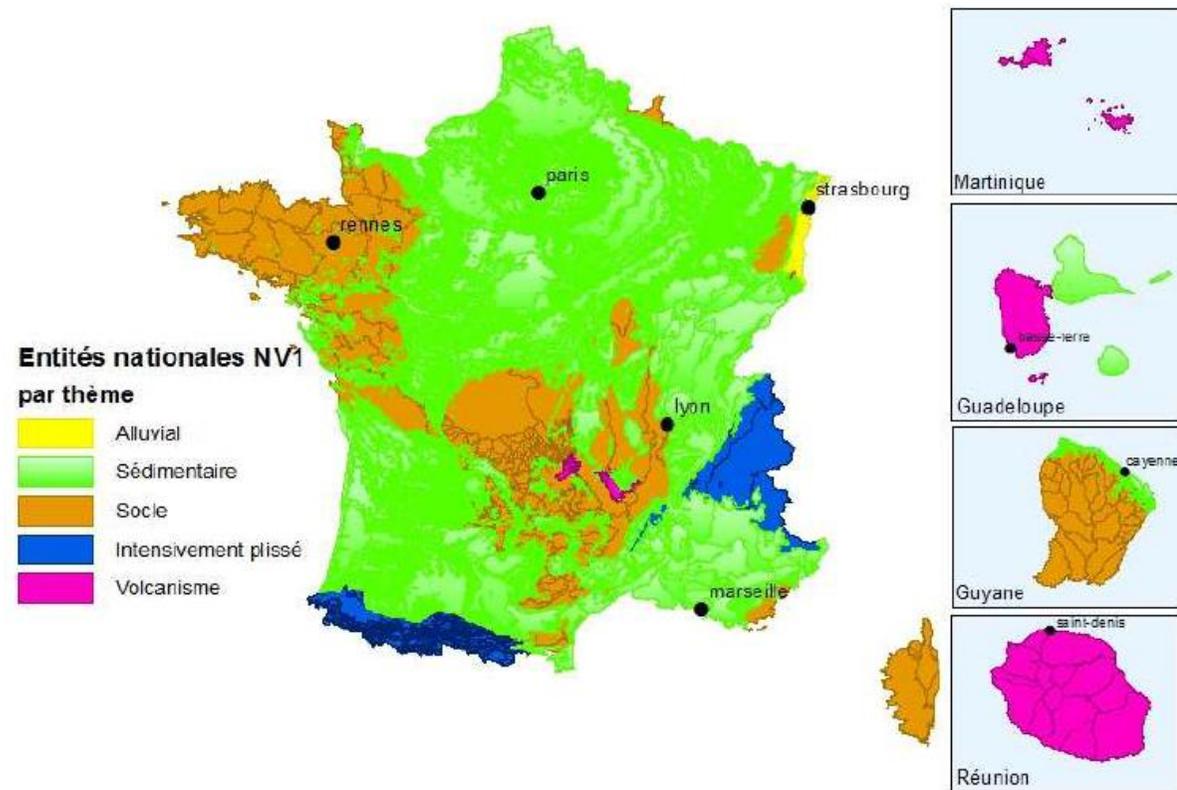
- délimitée à une certaine **échelle géographique** : le "**niveau**" (a) ;
- rattachée à un **type de formation géologique** : le "**thème**" (b) ;
- définie par ses **potentialités aquifères** : la "**nature**" (c) ;
- caractérisée par un **type de porosité (qui permet de distinguer les principaux modes de circulation de l'eau)** : le "**milieu**" (d) ;
- caractérisée par la **présence ou non d'une nappe, qui peut être libre et/ou captive** : l'"**état**" (e).

BDLISA

5 grands types de formation géologique

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

Carte schématique de répartition des entités nationales de niveau 1 selon les types de formation géologique



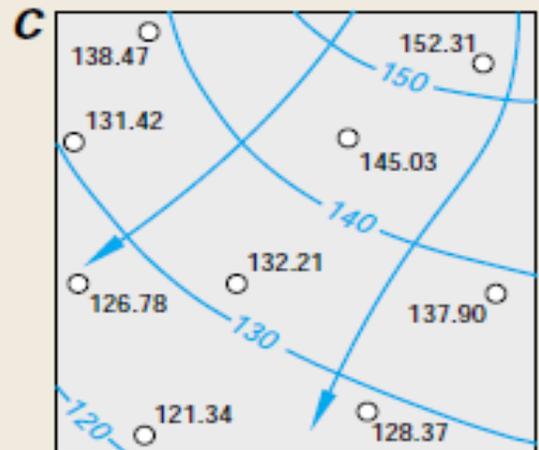
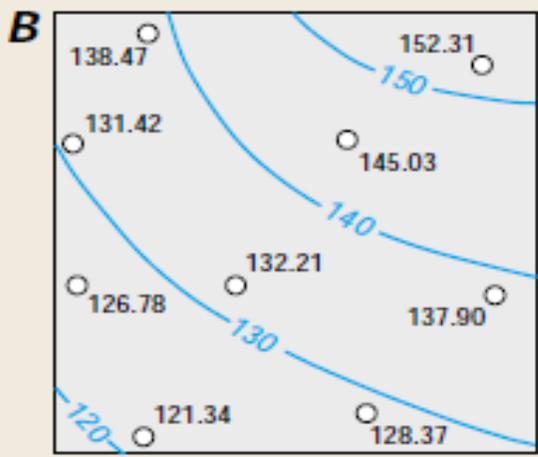
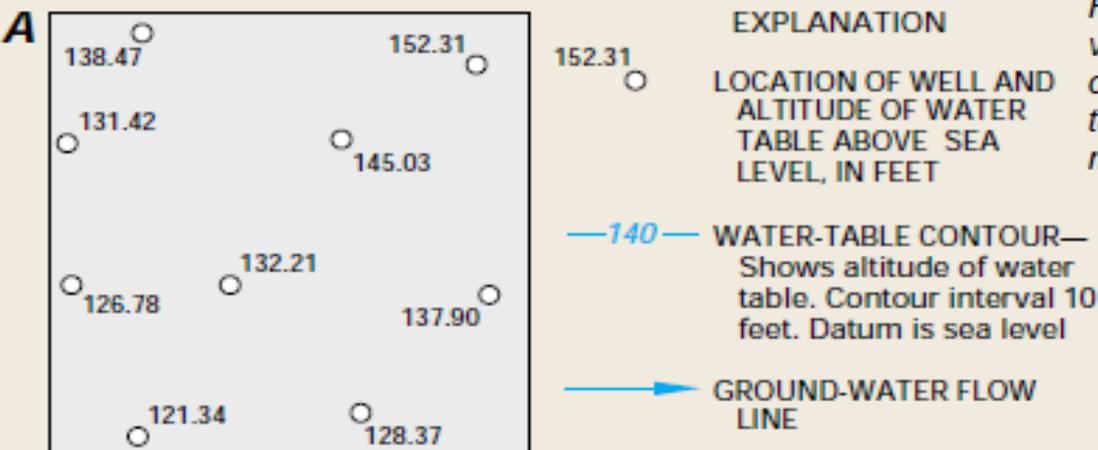
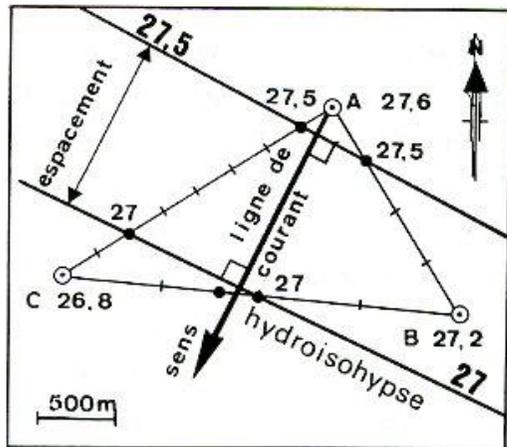


Figure A-2. Using known altitudes of the water table at individual wells (A), contour maps of the water-table surface can be drawn (B), and directions of ground-water flow along the water table can be determined (C) because flow usually is approximately perpendicular to the contours.

Tracé des courbes hydro-isohypses

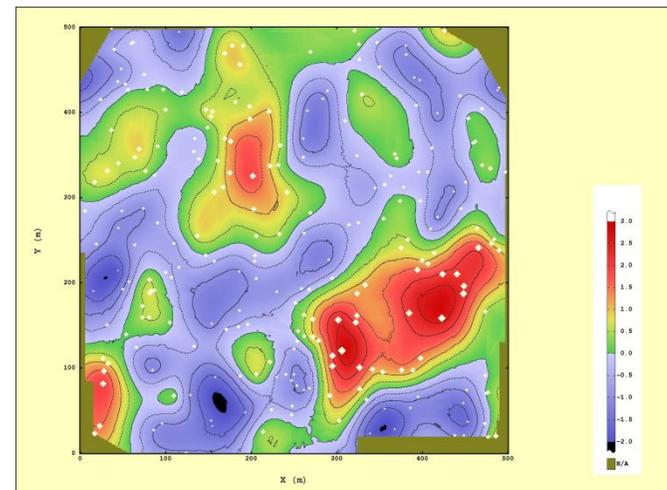
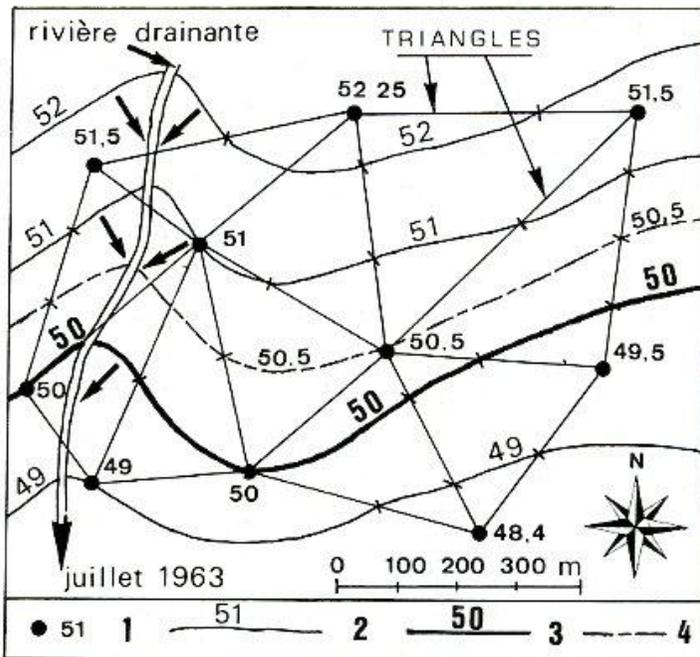
Interpolation linéaire



Castany

Interpolation par méthode géostatistique

Le **krigeage** est, en géostatistique, la méthode d'estimation linéaire garantissant le minimum de variance. Le krigage réalise l'interpolation spatiale d'une variable régionalisée par calcul de l'espérance mathématique d'une variable aléatoire, utilisant l'interprétation et la modélisation du variogramme expérimental. C'est le meilleur estimateur linéaire non-biaisé ; il se fonde sur une méthode objective. Il tient compte non seulement de la distance entre les données et le point d'estimation, mais également des distances entre les données deux-à-deux. (wikipedia)



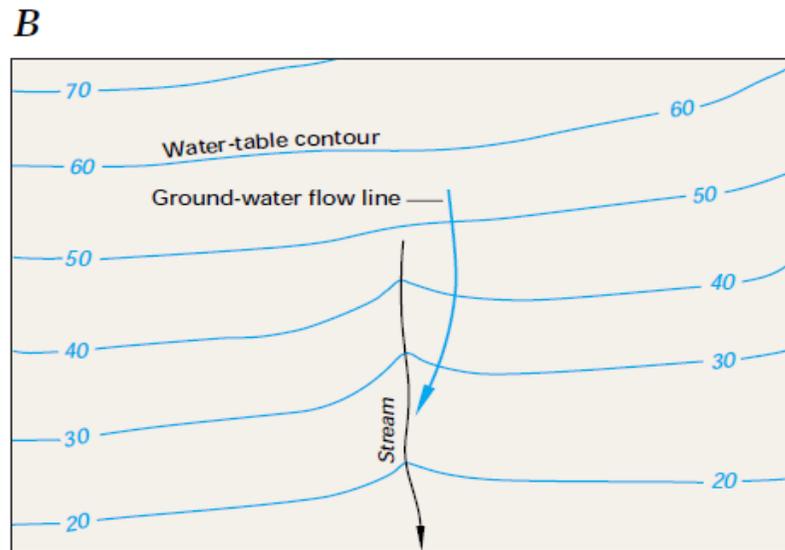
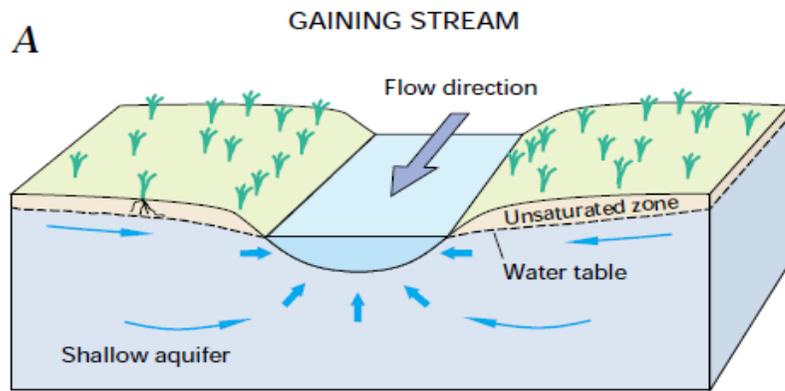


Figure 8. Gaining streams receive water from the ground-water system (A). This can be determined from water-table contour maps because the contour lines point in the upstream direction where they cross the stream (B).

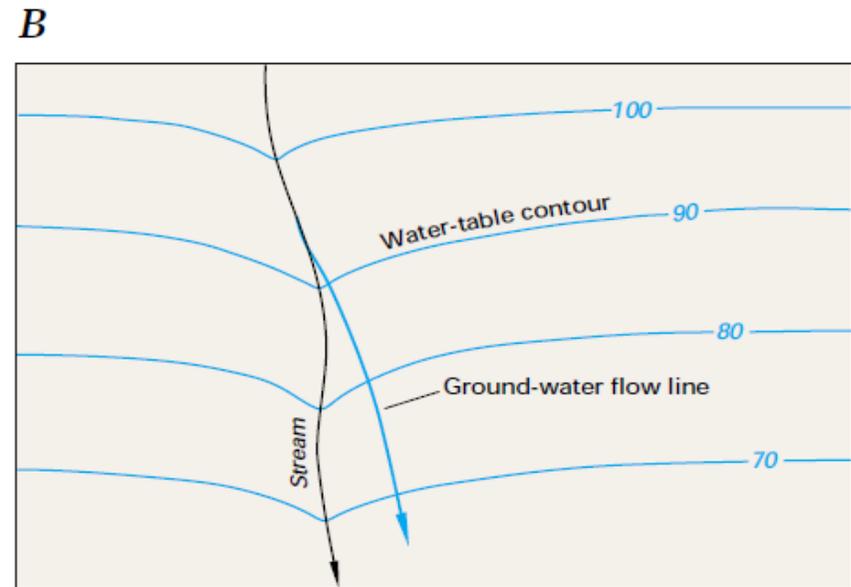
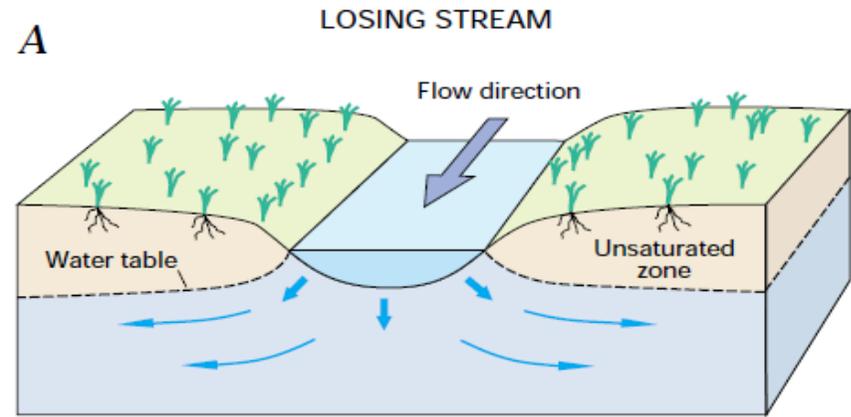


Figure 9. Losing streams lose water to the ground-water system (A). This can be determined from water-table contour maps because the contour lines point in the downstream direction where they cross the stream (B).

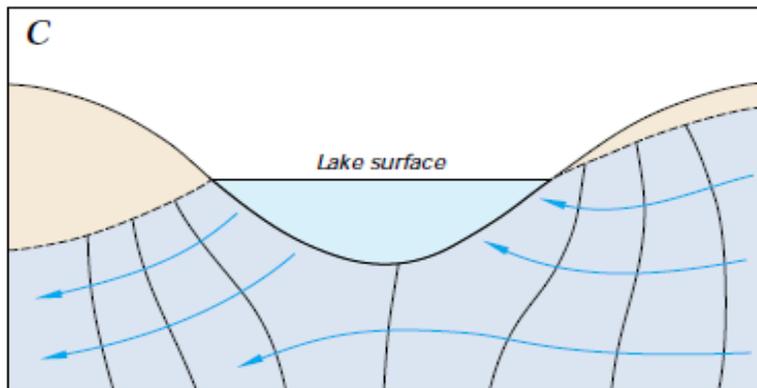
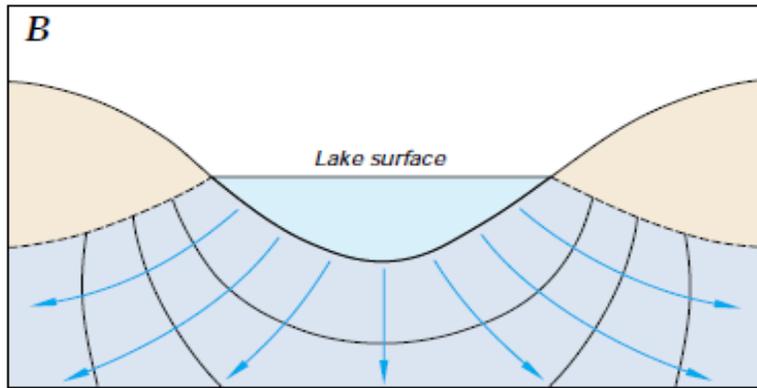
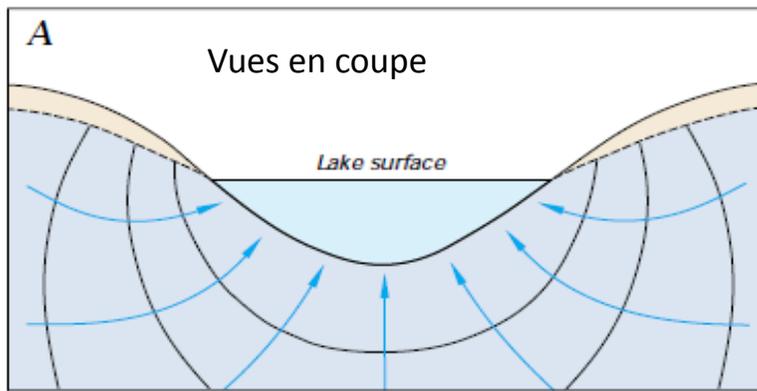
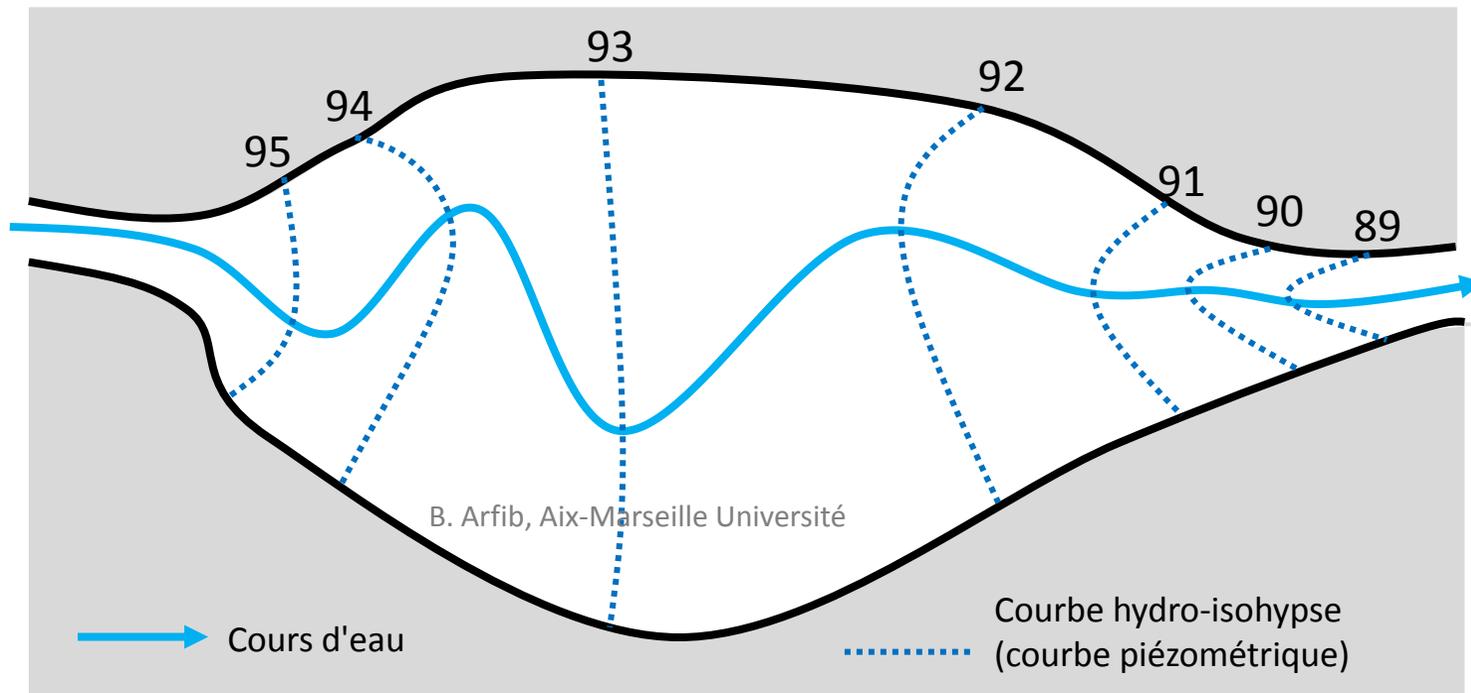


Figure 16. Lakes can receive ground-water inflow (A), lose water as seepage to ground water (B), or both

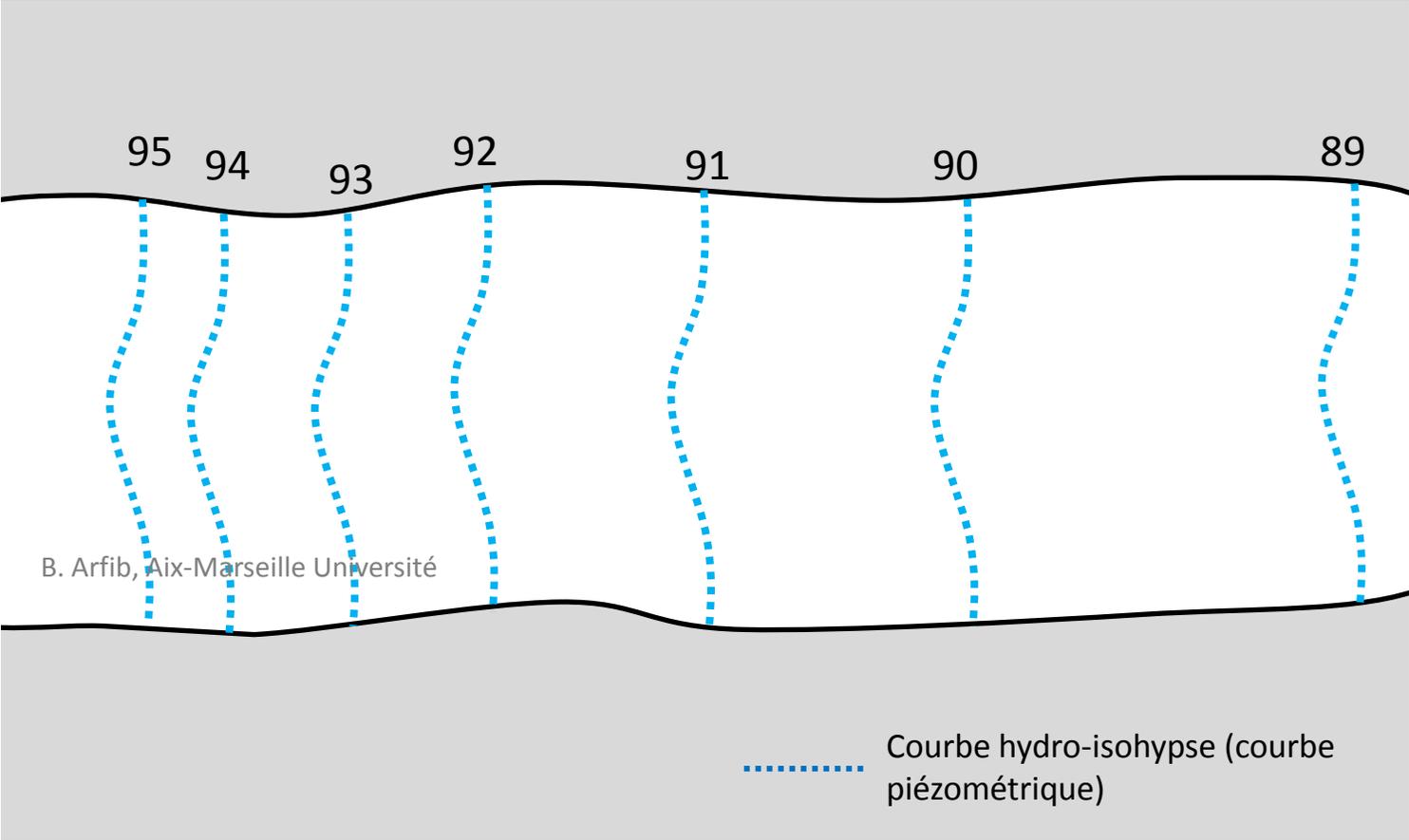
Nappe libre alluviale, en relation avec la rivière



Rivière = Limite à charge imposée (condition de Dirichlet)

Limite à flux imposé (condition de Neumann)

Cas particulier : flux nul



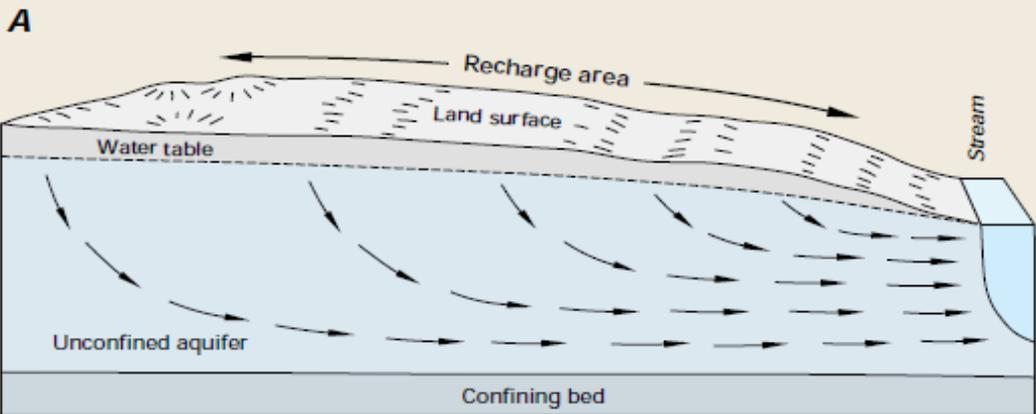
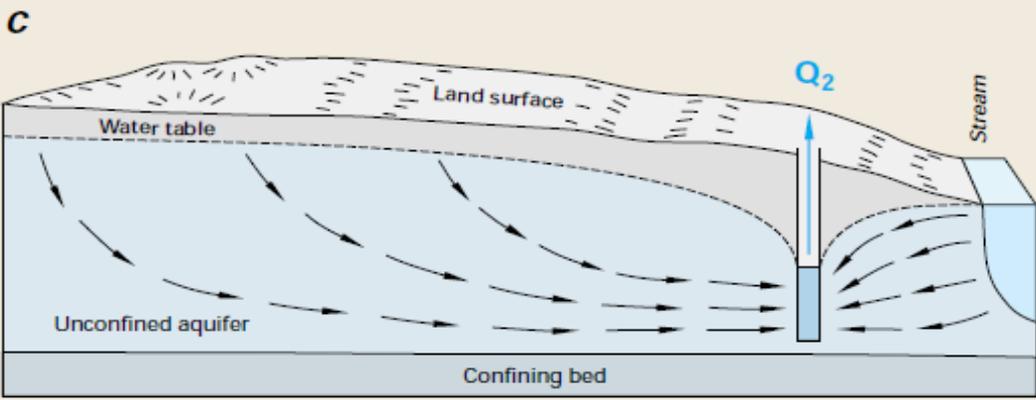
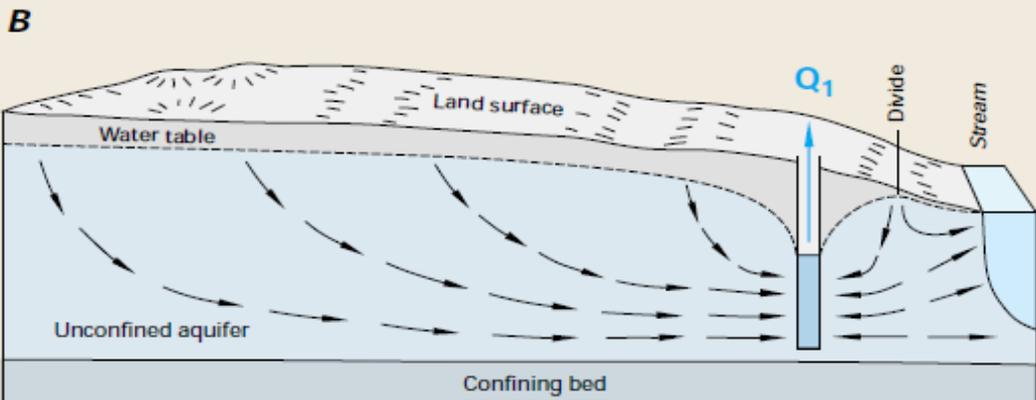
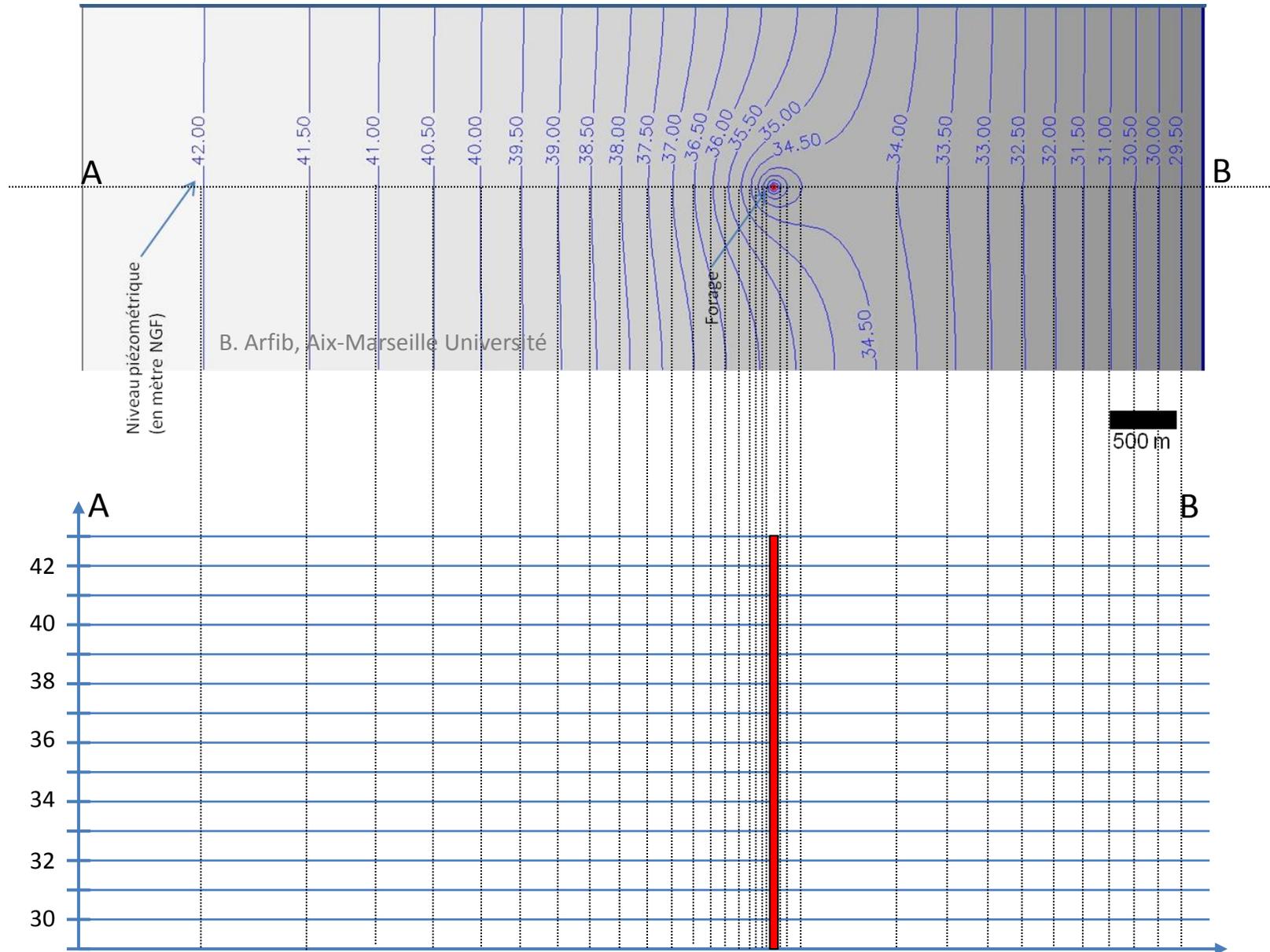


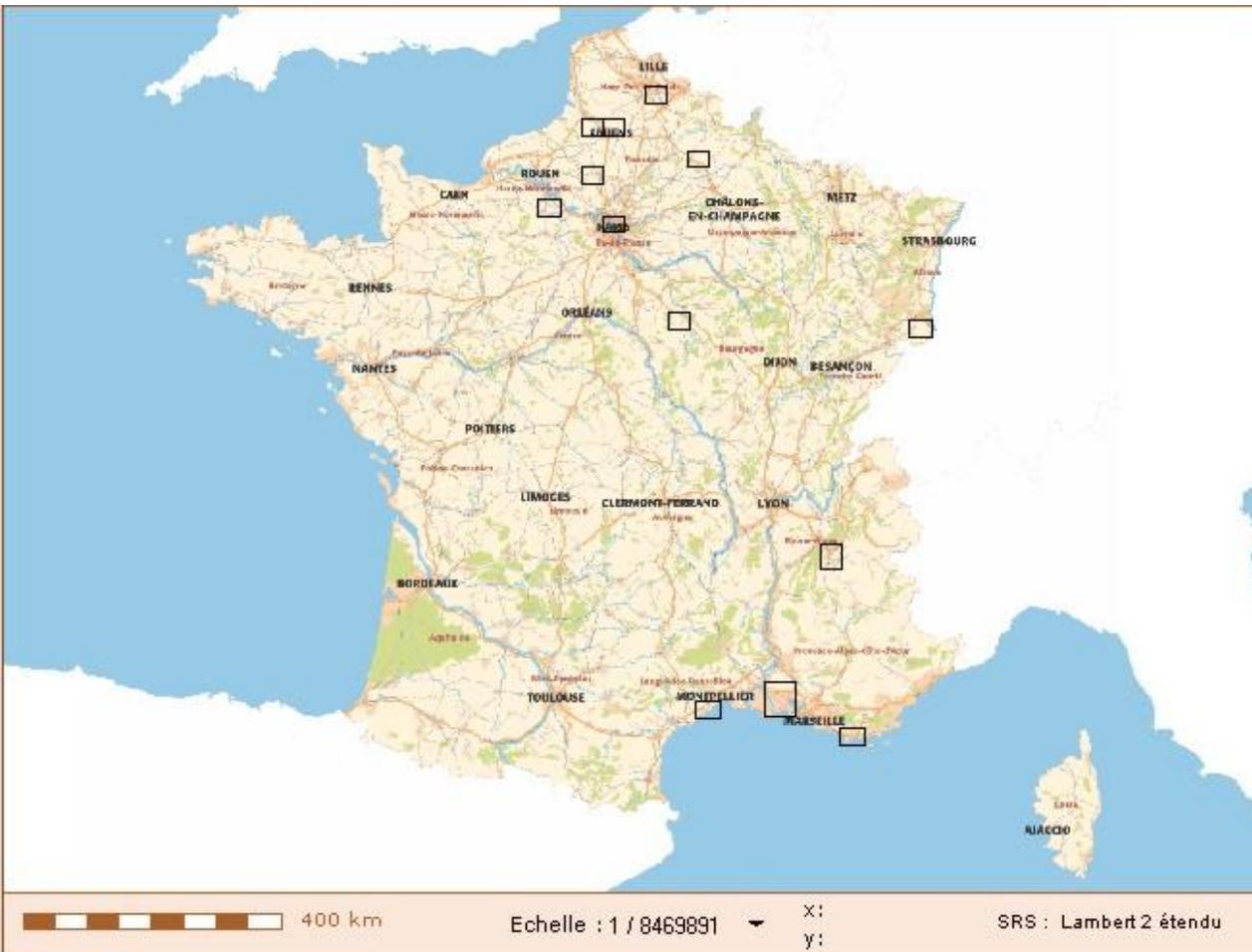
Figure C-1. In a schematic hydrologic setting where ground water discharges to a stream under natural conditions (A), placement of a well pumping at a rate (Q_1) near the stream will intercept part of the ground water that would have discharged to the stream (B). If the well is pumped at an even greater rate (Q_2), it can intercept additional water that would have discharged to the stream in the vicinity of the well and can draw water from the stream to the well (C).



Effet du prélèvement sur un forage



Cartes hydrogéologiques BRGM



CARTE HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN DE L'AUTHION(BHYD51)

CARTE HYDROGEOLOGIQUE DE LA France A 1/50 000 - REGION GRENOBLE(HYD005)

CARTE HYDROGEOLOGIQUE DE LA France A 1/50 000 - SETE(HYD009)

CARTE HYDROGEOLOGIQUE DE LA France A 1/50 000 - ALTKIRCH(HYD010)

CARTE HYDROGEOLOGIQUE DE LA France A 1/50 000 - LAON(HYD011)

CARTE HYDROGEOLOGIQUE DE LA France A 1/50 000 - EVREUX(HYD012)

CARTE HYDROGEOLOGIQUE DE LA France A 1/50 000 - HALLENCOURT(HYD013)

CARTE HYDROGEOLOGIQUE DE LA France A 1/50 000 - BEAUVAIS(HYD014)

CARTE HYDROGEOLOGIQUE DE LA France A 1/50 000 - TOULON(HYD015)

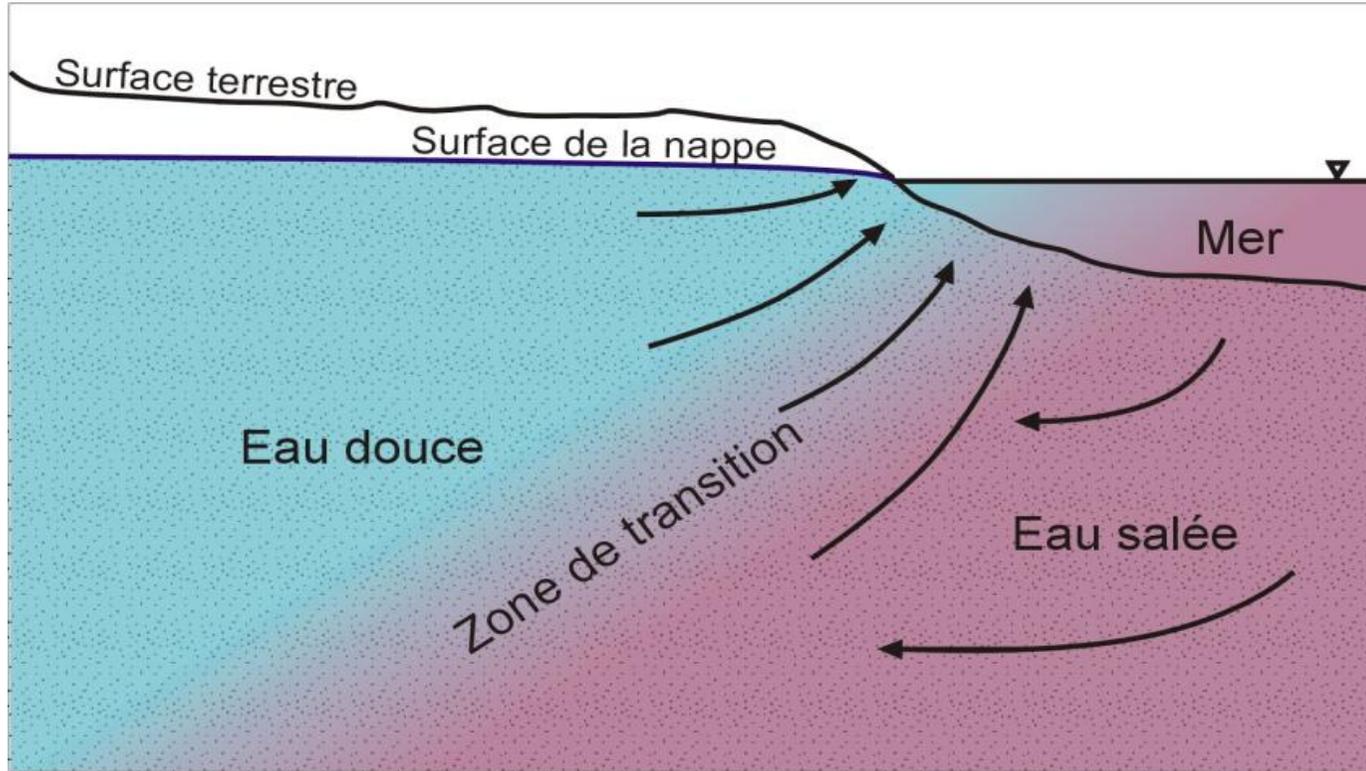
CARTE HYDROGEOLOGIQUE BASSINS DU CARAMY ET DE L'ISSOLE (VAR) A 1/50 000(HYD019)

CARTE HYDROGEOLOGIQUE. ETUDE DU NORD-EST VAROIS A 1/50 000(HYD020)

CARTE HYDROGEOLOGIQUE DE LA France A 1/50 000 – LA CRAU

Les aquifères côtiers

Aquifère poreux homogène



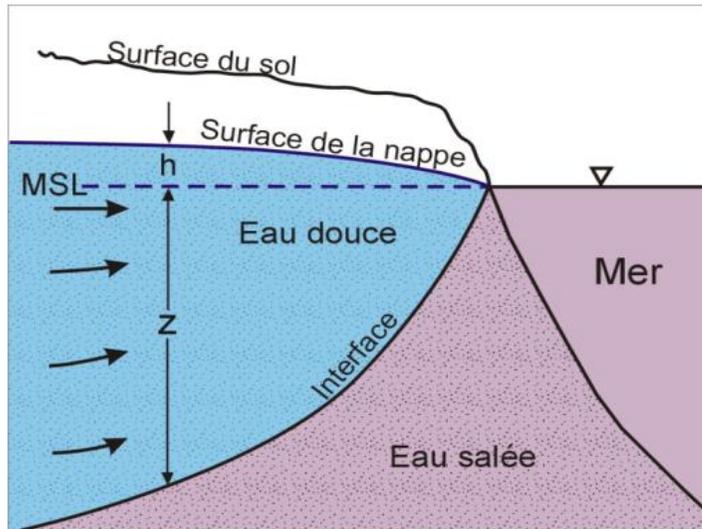
vue en coupe

➔ Intrusion saline dans les terres

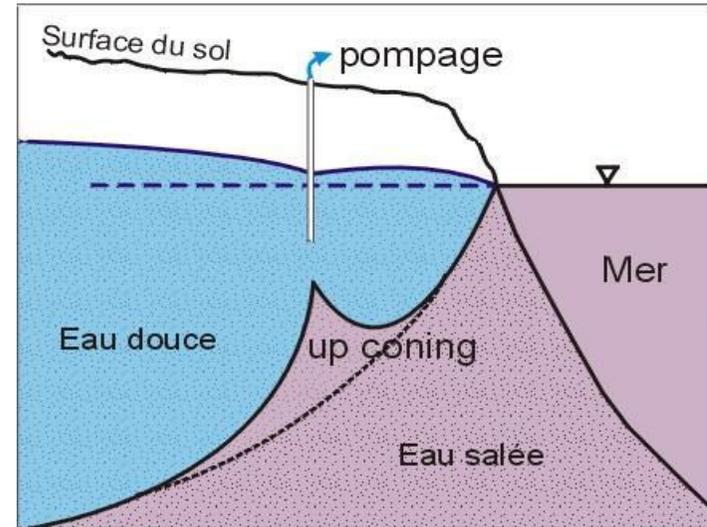
Les aquifères côtiers

Aquifère poreux homogène – Cas des fluides non miscibles

Le principe de Ghyben-Herzberg



$$z = 40.h$$

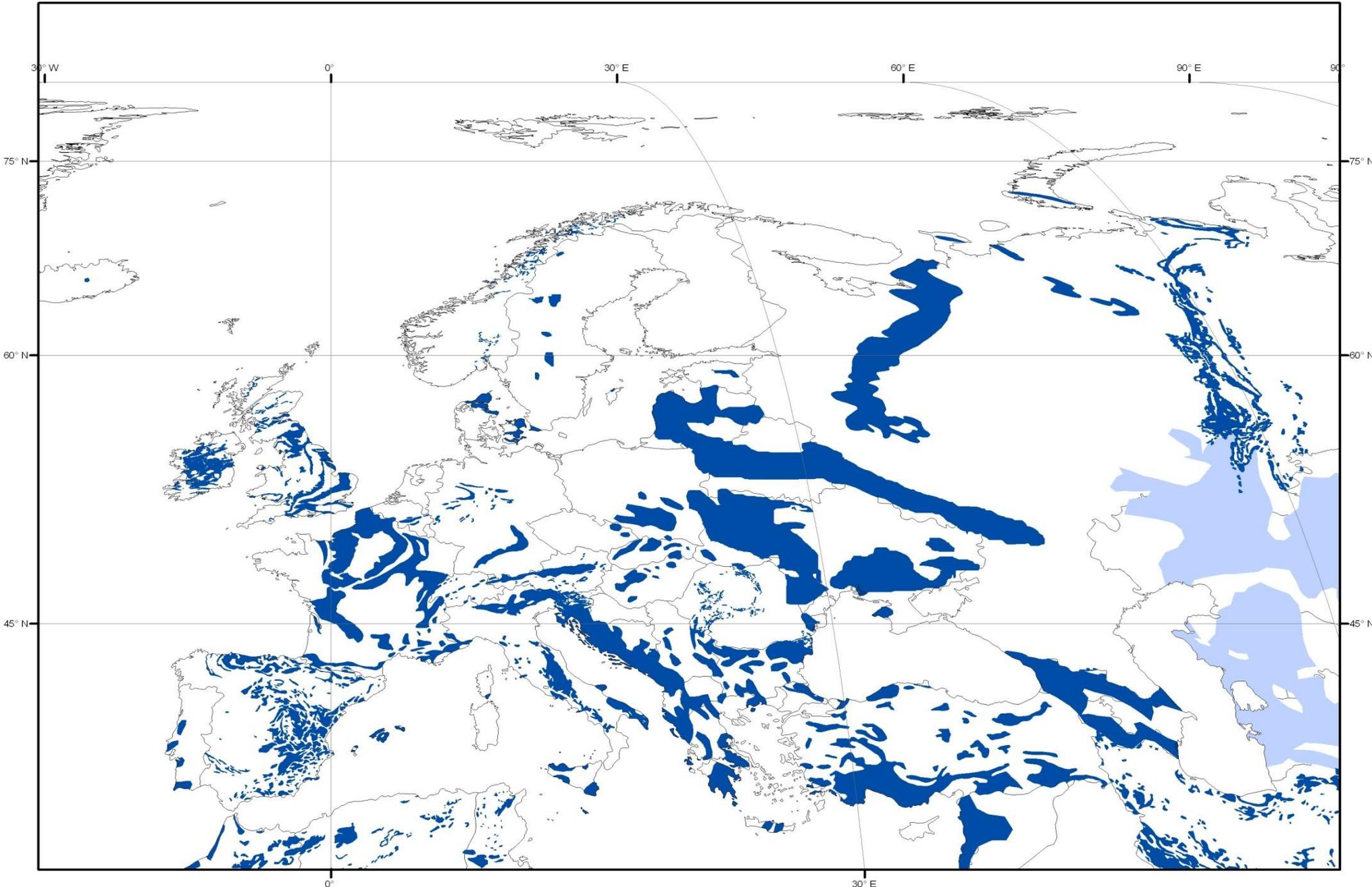


Effet d'un pompage

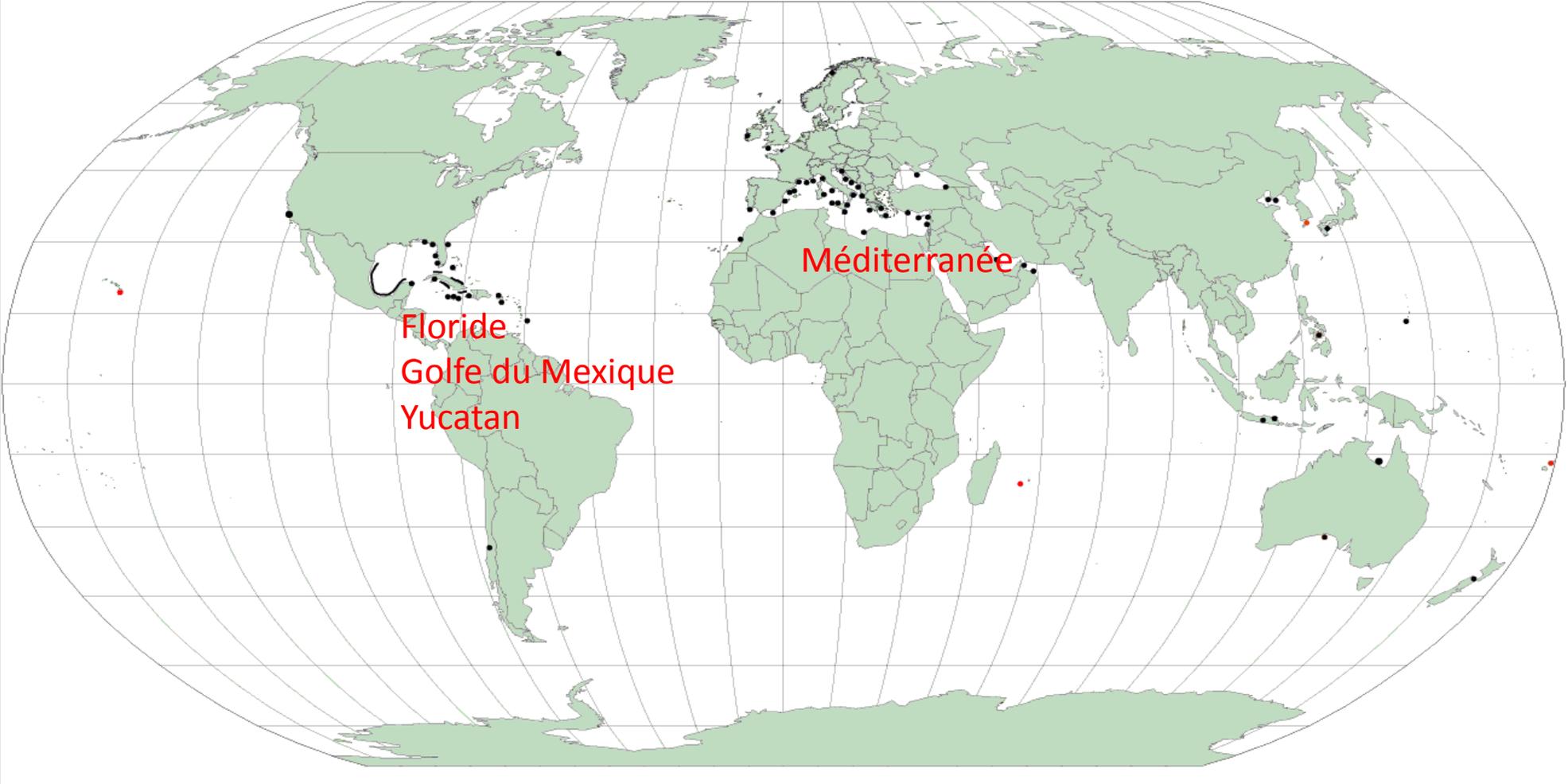
vue en coupe

➔ Intrusion saline dans les terres

Le karst à l'affleurement en Europe



Les sources karstiques côtières à travers le monde



Fleury 2005

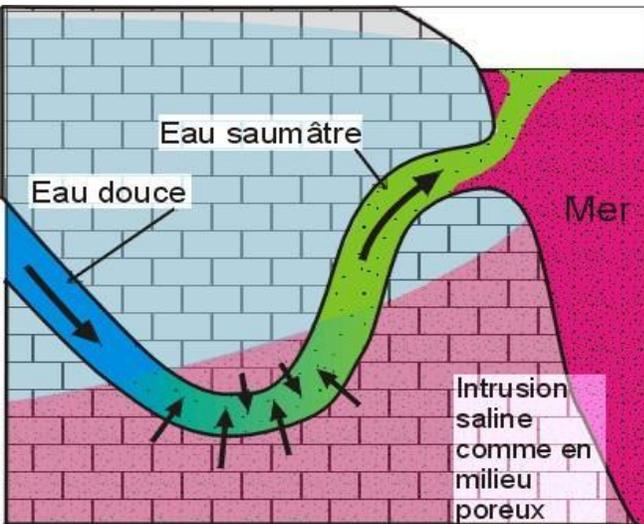
Intrusion saline en aquifères côtiers karstiques

Aquifère karstique : conduit et matrice

Source sous-marine

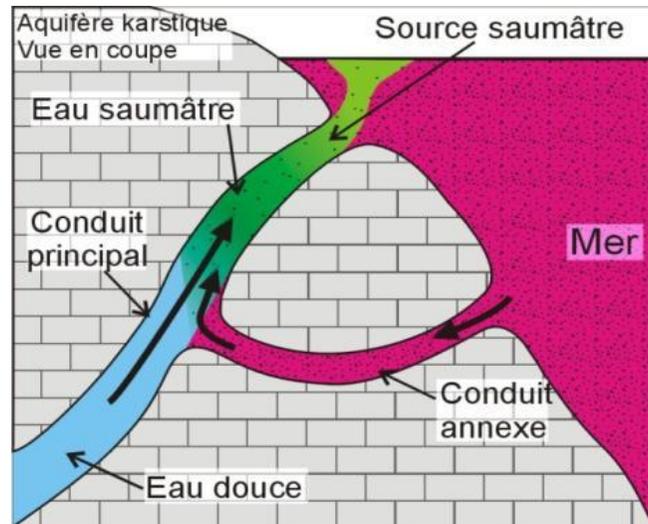
Salinité inversement proportionnelle au débit

Intrusion diffuse



Vue en coupe

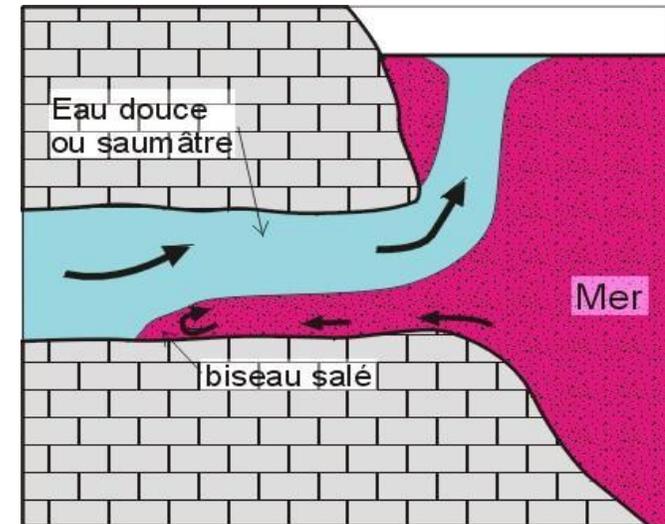
Intrusion par connexion de conduits



➔ Intrusion saline dans les terres

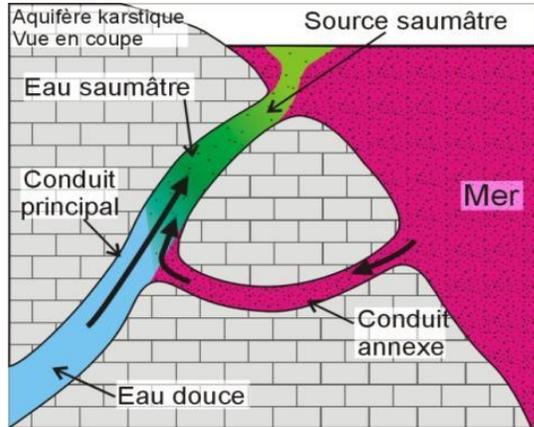
➔ source saumâtre

Intrusion à l'exutoire



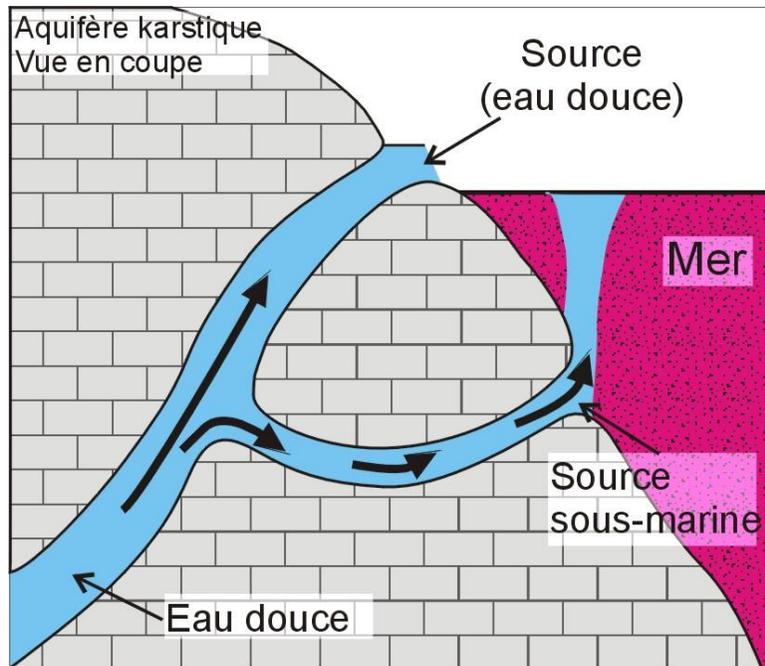
Intrusion saline en aquifères côtiers karstiques

Salinité inversement proportionnelle au débit

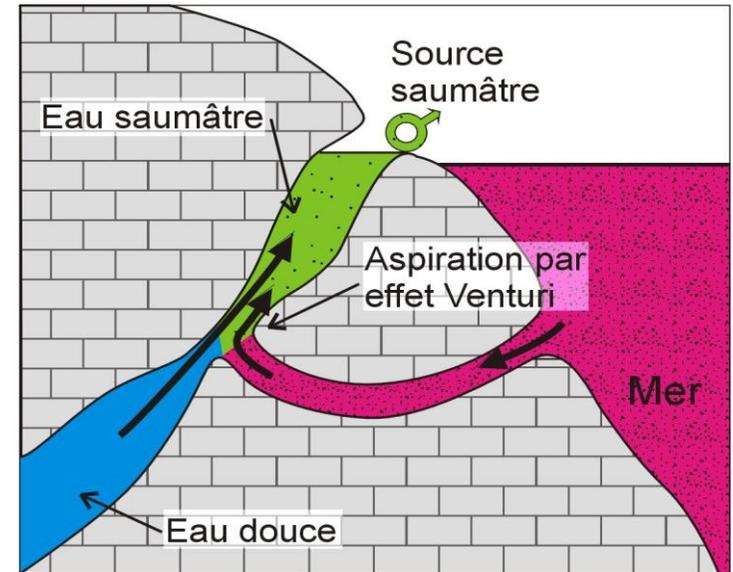


Intrusion par connexion de conduits

Estavelle



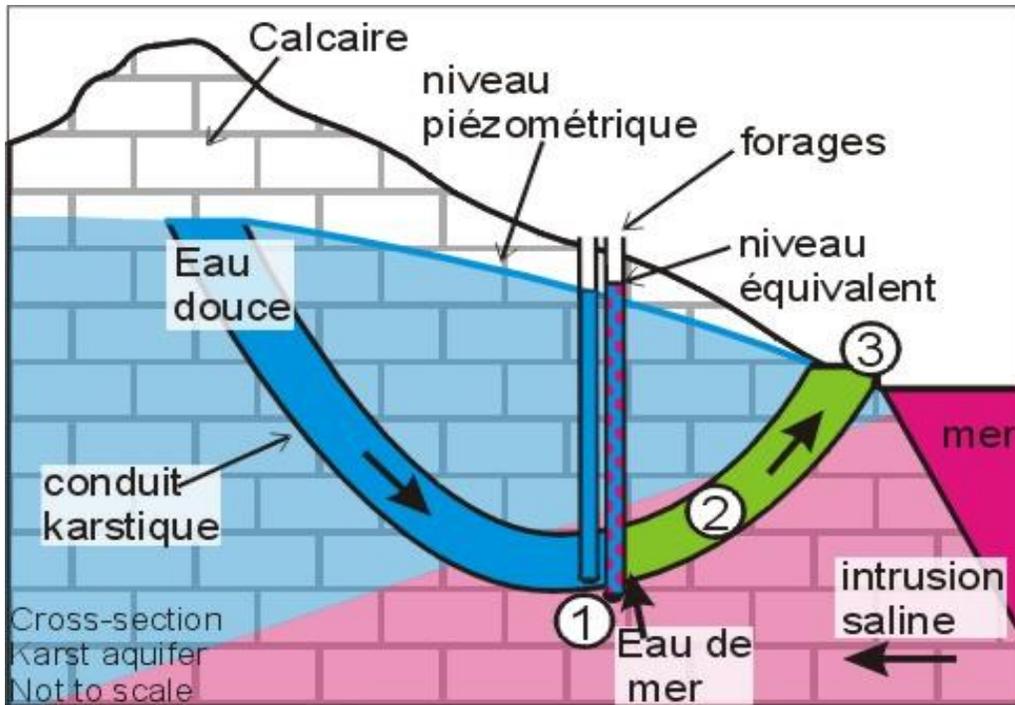
Le cas particulier de l'effet Venturi : Salinité proportionnelle au débit



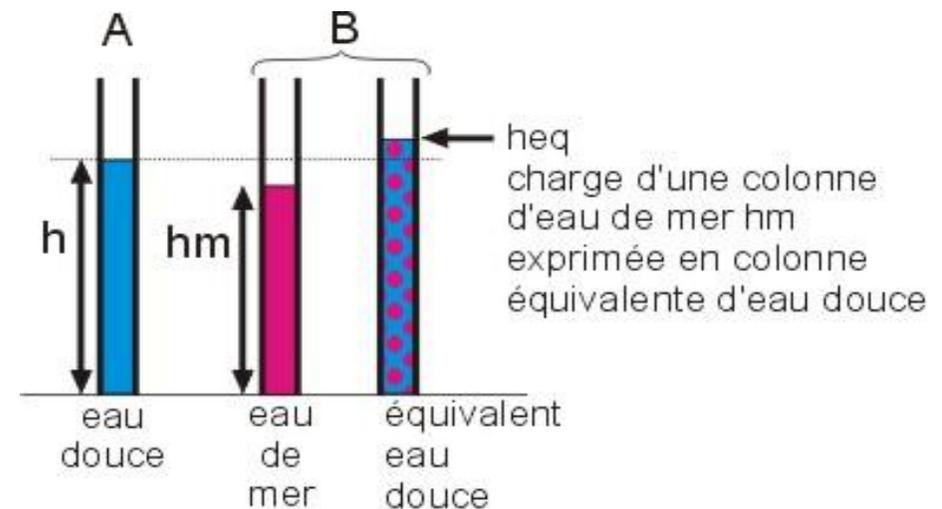
Connexion de conduits karstiques

Relation directe avec la mer

Le cas des sources saumâtres dans les terres : Comment l'eau de mer peut s'écouler à un niveau plus haut que la mer ? !

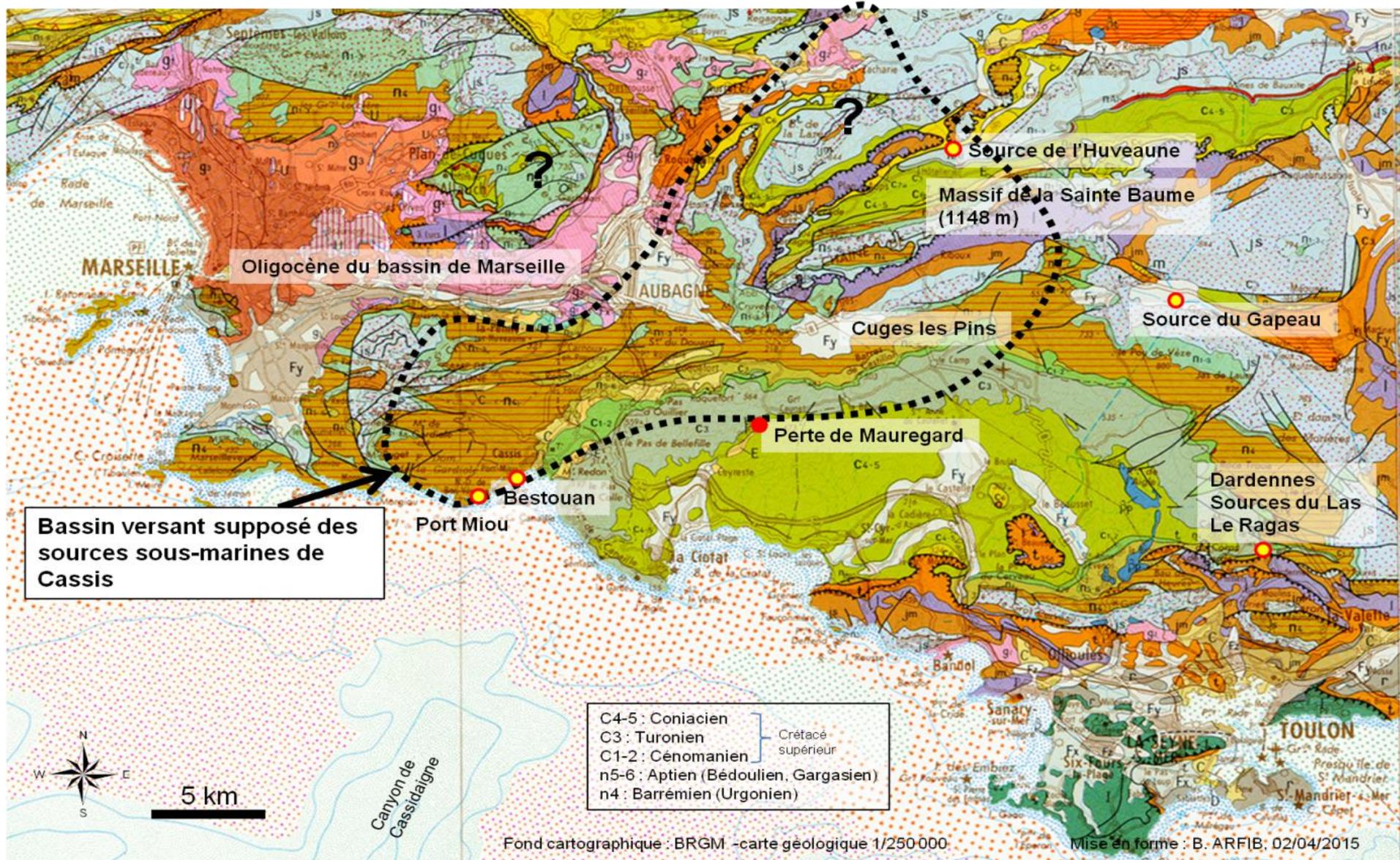


- ① Zone d'échange matrice-conduit
- ② Zone confinée d'écoulement de l'eau saumâtre
- ③ Source karstique côtière saumâtre
- ➔ Direction d'écoulement



$heq > h$: l'eau s'écoule de B vers A

Port-Miou : l'exutoire majeur de l'aquifère régional entre Marseille et Toulon



Extrait de Arfib B. 2015, Journée scientifiques de l'OSU PYTHEAS.

La manifestation des venues d'eau sous-marines

La source de Port Miou (Cassis)



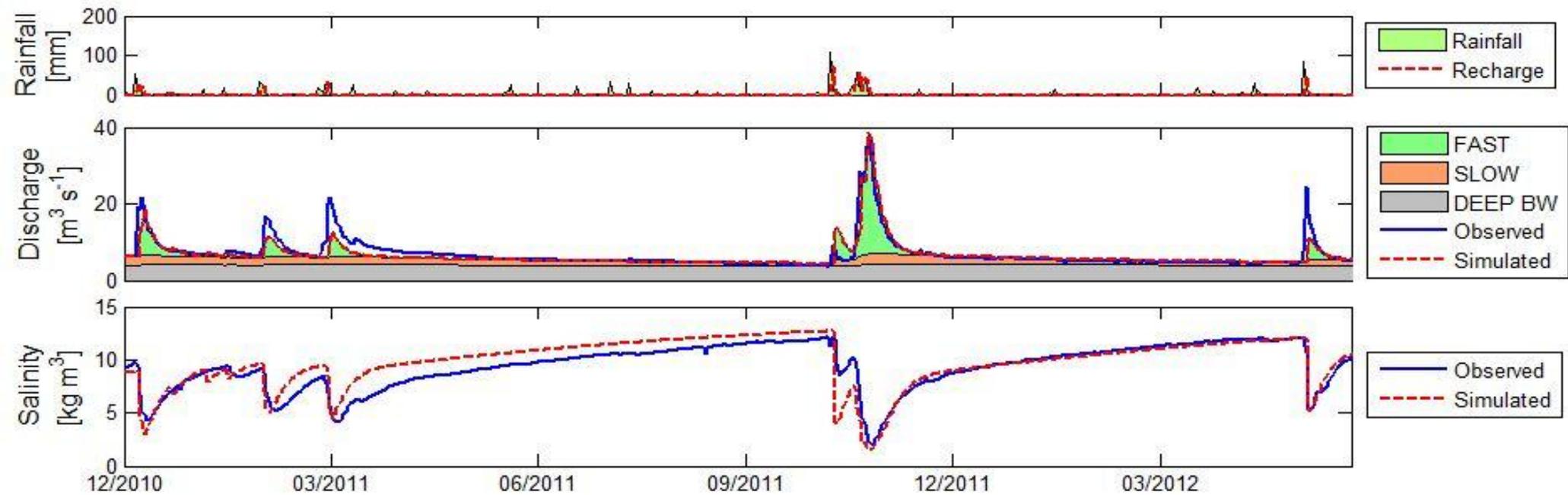
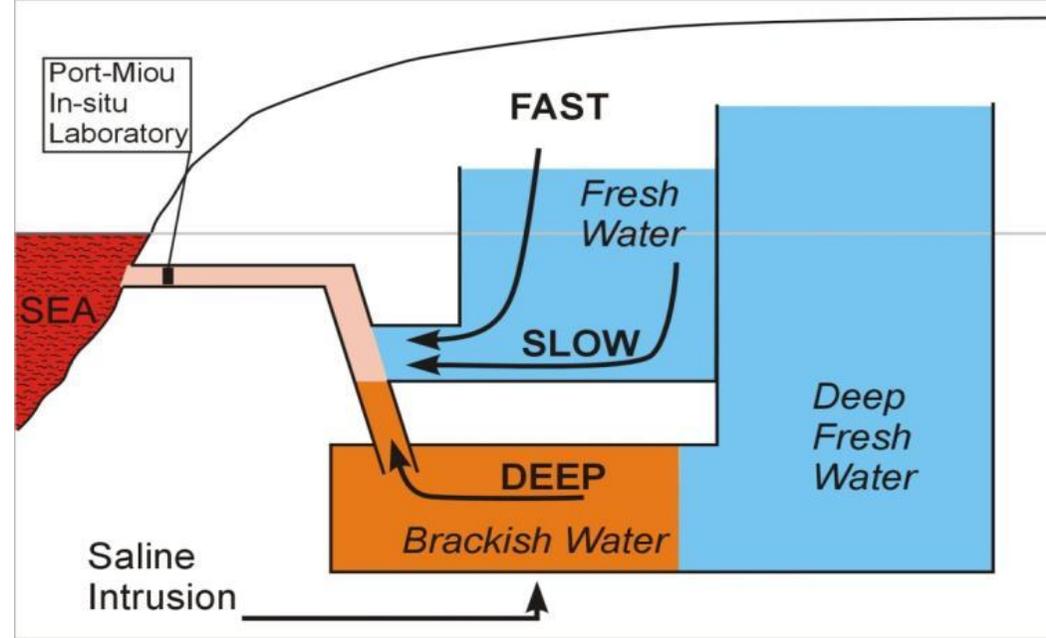
Une eau fraîche en été



Une eau turbide en crue

Port-Miou : l'exutoire majeur de l'aquifère régional entre Marseille et Toulon

Dilution d'un réservoir d'eau saumâtre par de l'eau douce



Arfib and Charlier, 2015

Un autre exemple de karst Côtier : l'Almyros d'Héraklion (Crète)

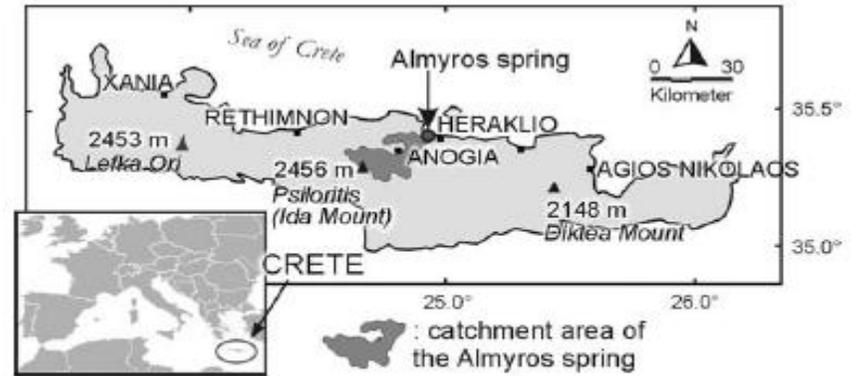
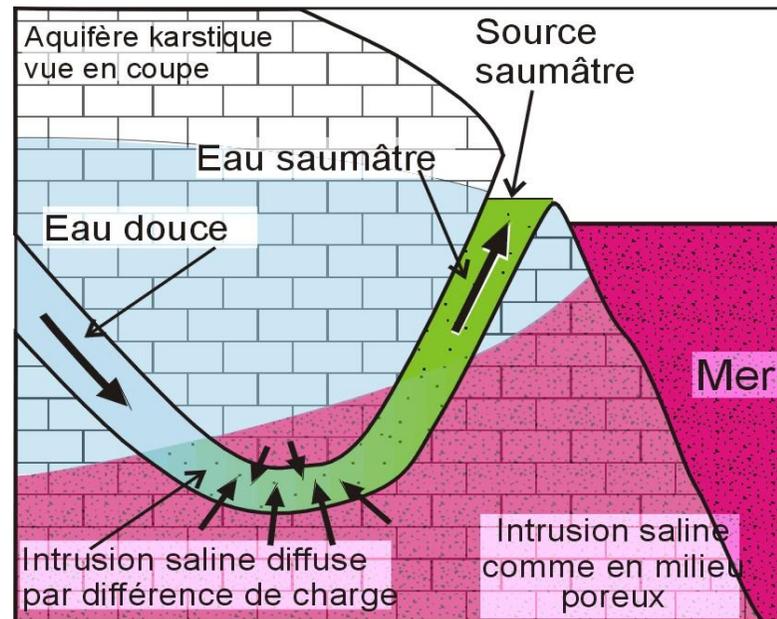


Figure 1. Location of the case study: the Almyros spring of Heraklion, in Crete (Greece).



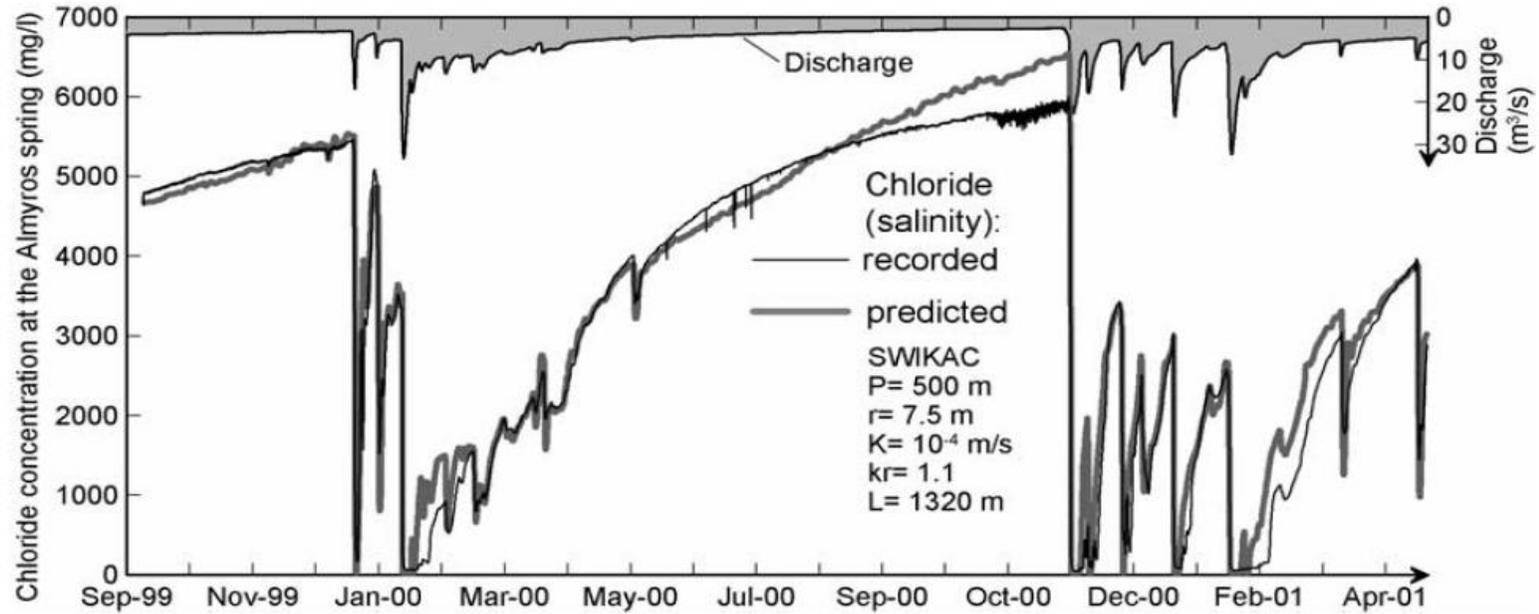


Figure 8. Recorded chloride concentration and that predicted with the SWIKAC model at the Almyros of Heraklio spring (Crete).

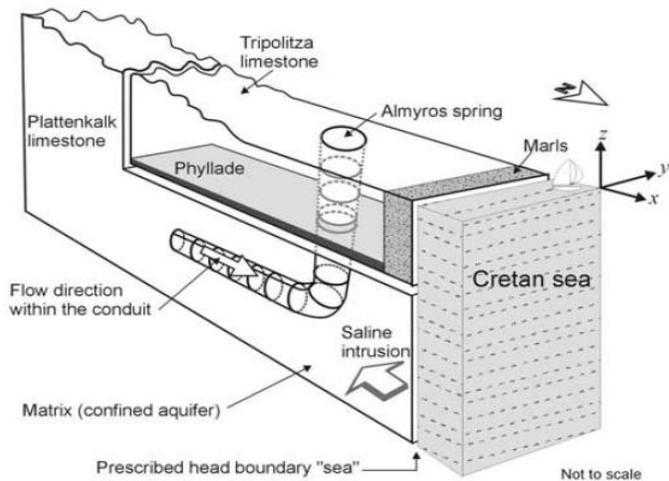
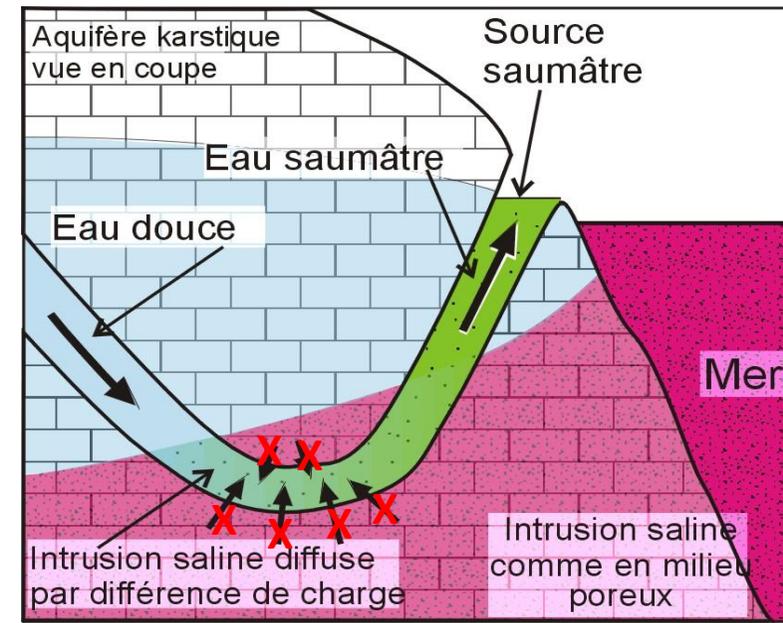


Figure 3. Schematic 3-D view of the coastal karstic aquifer of the Almyros of Heraklio spring.

L'intrusion saline dans le conduit est bloquée par l'augmentation de charge hydraulique
 → l'eau est douce en crue



Effet de l'élévation du niveau de la mer (changement climatique)

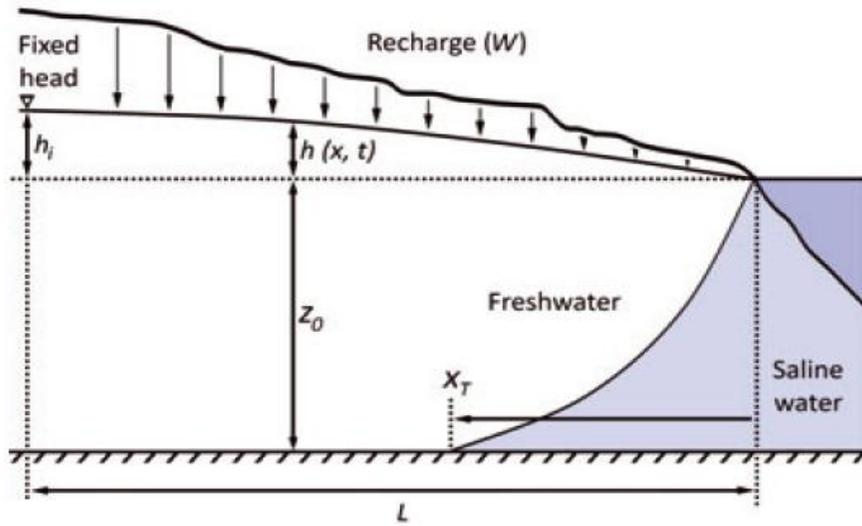


Figure 1. Conceptual model of a coastal aquifer controlled by an inland fixed-head (h_i).

Elevation du niveau de la mer de 1,5 m

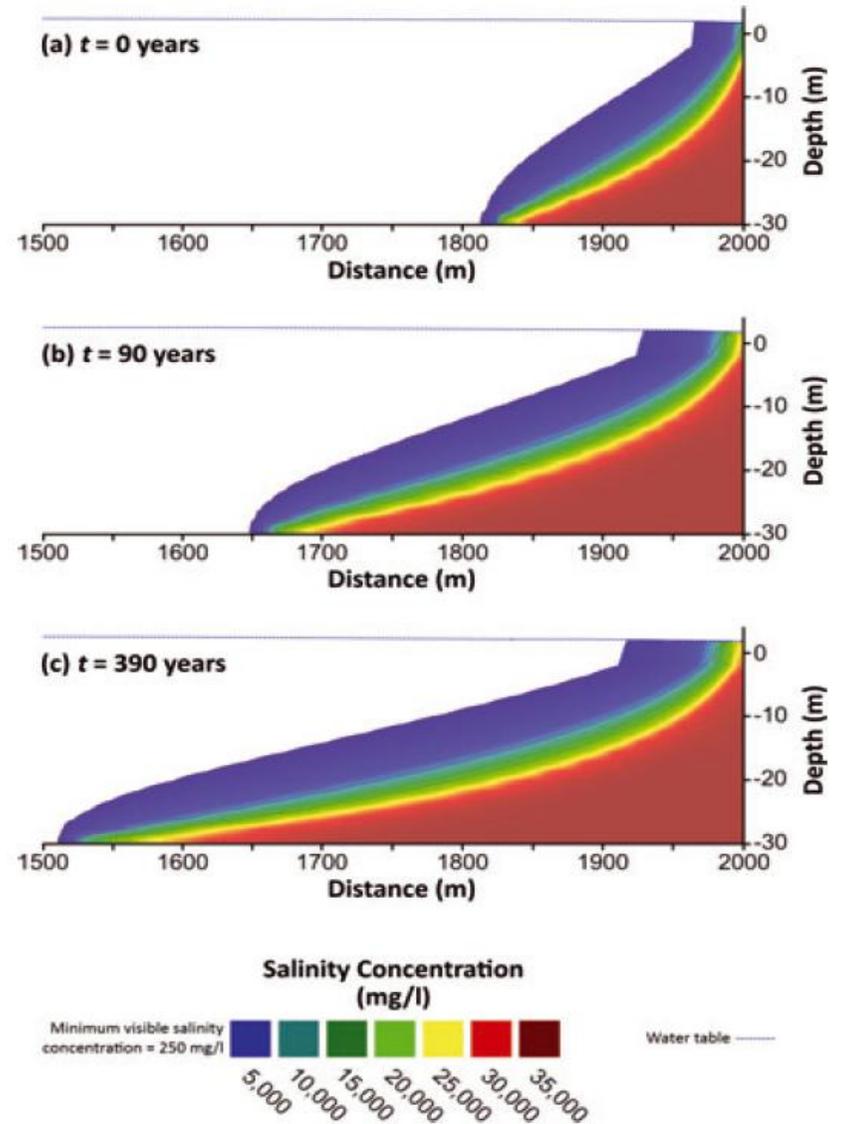
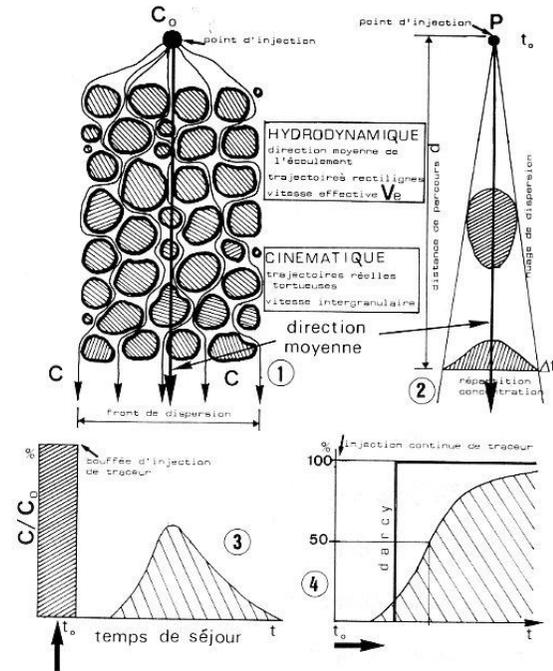
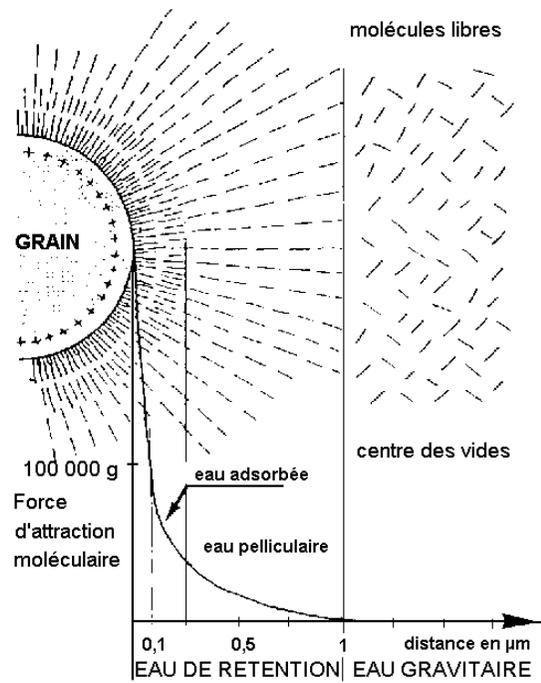


Figure 3. Salinity concentration profiles for the baseline parameter set. (a) $t = 0$ years, (b) $t = 90$ years following 1.5 m sea-level rise, and (c) new dynamic equilibrium at $t = 390$ years after boundary conditions held constant. 49



Castany

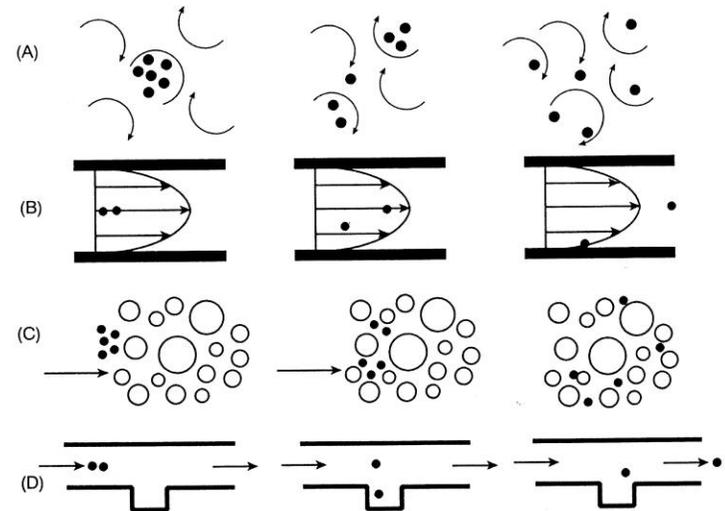
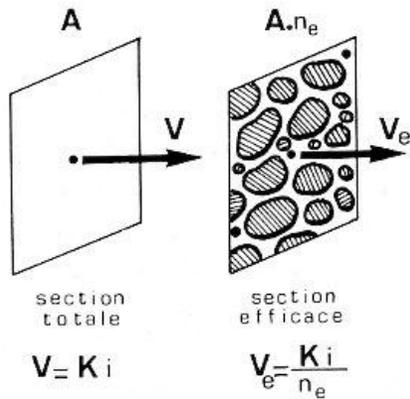


Tableau 13 - Classification granulométrique des roches meubles

Désignations		Diamètres des grains mm
Caillou, pierre, bloc		supérieur à 16
Tamis	Gravier, gravillon	16 à 2
	gros	2 à 0,5
	Sable moyen	0,5 à 0,25
	fin	0,25 à 0,06
Silt		0,06 à 0,002
Argile		plus petit que 0,02

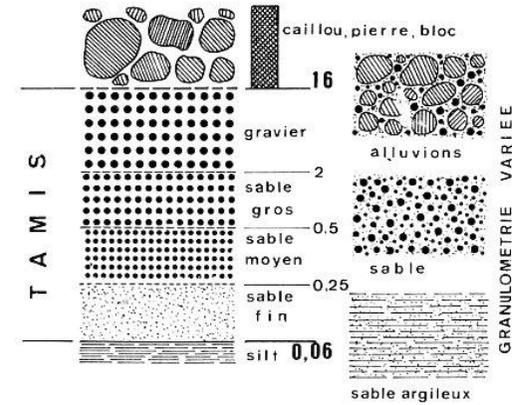
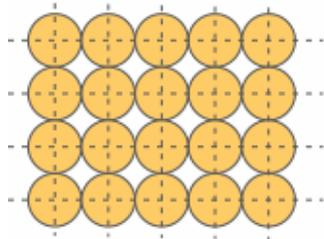


Figure 34 - Classification granulométrique.

Tassement cubique
 $P_o = 47,6\%$



Tassement rhomboédrique
 $P_o = 25,9\%$

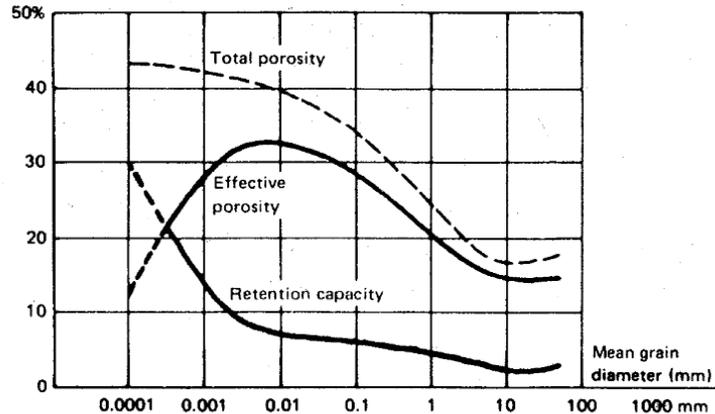
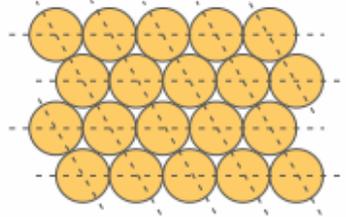


Figure 1.16 Composantes de la porosité en fonction de la granulométrie (de Marsily, 1986)

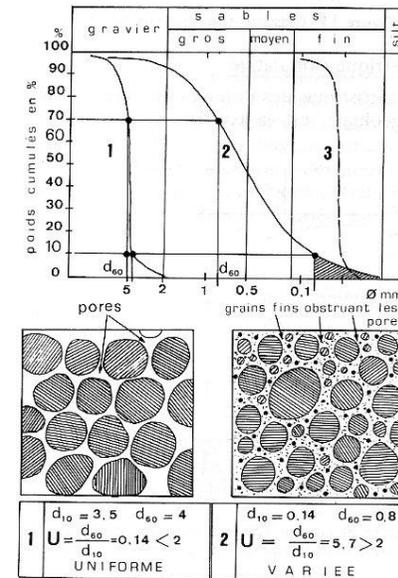
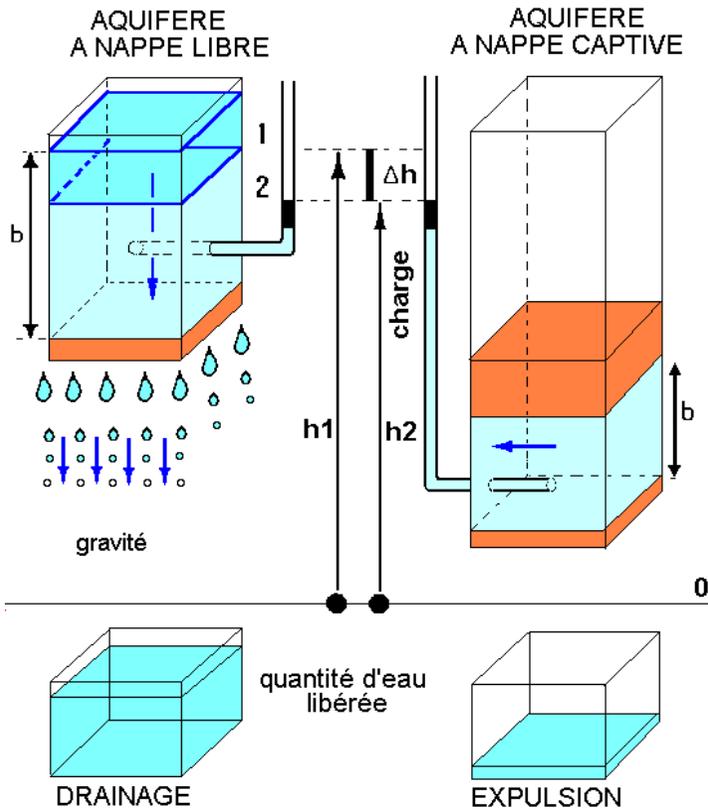


Figure 36 - Qualification d'un matériau meuble par sa granulométrie. Position et pente de la courbe granulométrique. Granulométrie uniforme et variée. Signification du diamètre efficace d_{10} . 1, gravier à granulométrie uniforme ; 2, gravier sableux à granulométrie variée ; 3, sable fin à granulométrie uniforme.

Coefficient d'emmagasinement et porosité de drainage



Coefficient de perméabilité ou conductivité hydraulique

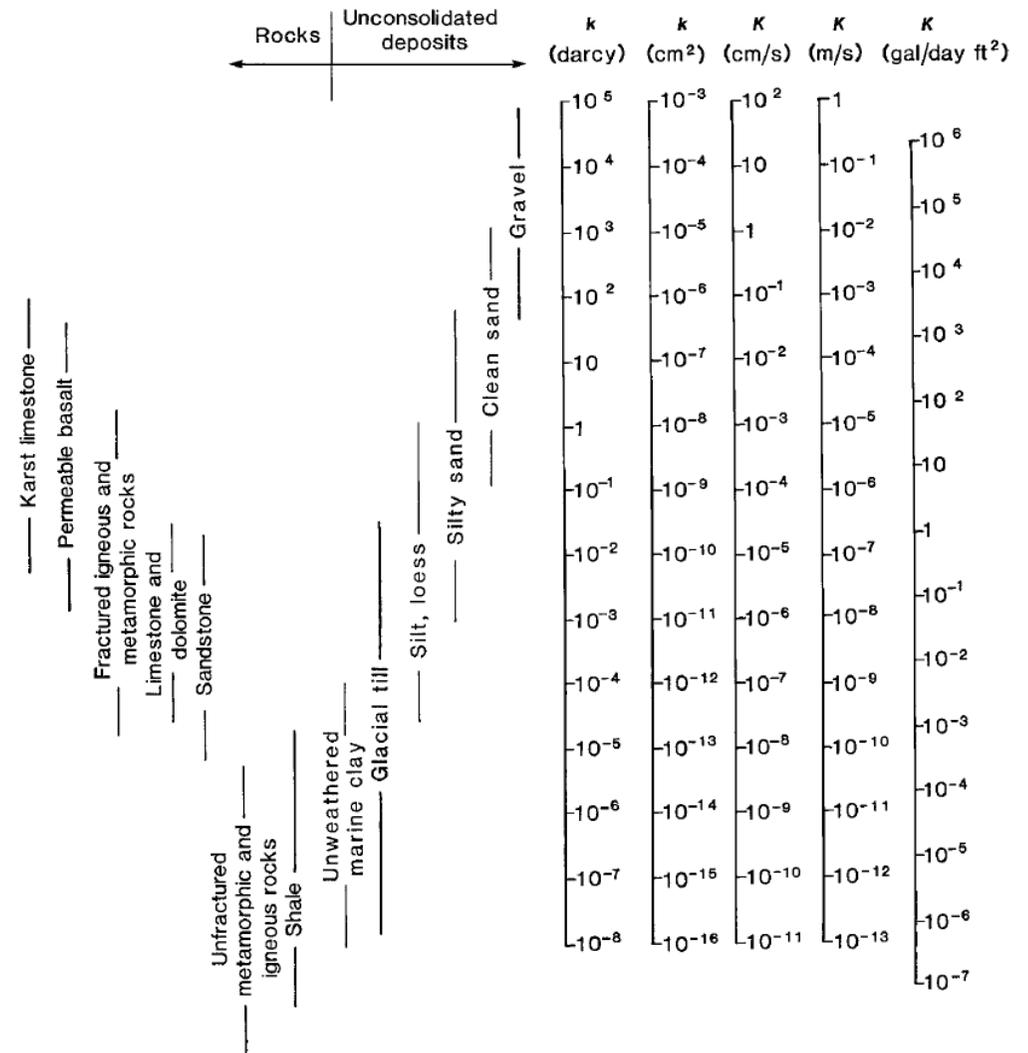


Figure 5.8 Range of values of hydraulic conductivity and permeability. Reproduced from Freeze, R.A. and J.A. Cherry, Groundwater, p. 604 © 1979 Prentice Hall.

Écoulement dans un aquifère : modèle simple

Loi de Darcy

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

K : coefficient de perméabilité (m/s)

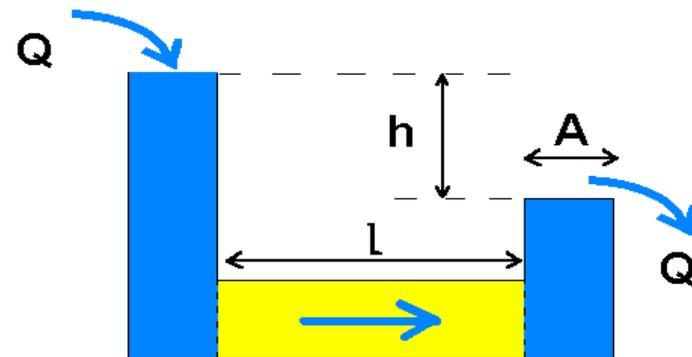
T : transmissivité (m²/s)

e : épaisseur mouillée

$$T = K \cdot e$$

* Expérience de Darcy à charge constante

* Similitude avec le milieu naturel



$$Q = K \cdot A \cdot h / L$$

Equation de la diffusivité

→ équation de l'écoulement d'une nappe d'eau souterraine en nappe libre

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\int_{\sigma}^h K_{xx} dz \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\int_{\sigma}^h K_{yy} dz \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right] = \omega_d \frac{\partial h}{\partial t} + Q$$

extrait de G. de Marsily, 1989

x, y, z : directions de l'espace

K : Coefficient de perméabilité suivant la direction

sigma : niveau du mur de l'aquifère (h-sigma=épaisseur mouillée)

ω_d : porosité de drainage (ou cinématique)

Q : terme source

h, t : niveau d'eau et temps (variables)

Si K_{xx} et K_{yy} sont constants sur toute verticale, on peut faire disparaître l'intégrale sur z :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx}(h - \sigma) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy}(h - \sigma) \frac{\partial h}{\partial y} \right] = \omega_d \frac{\partial h}{\partial t} + Q$$

En simplifiant, pour une faible variation de niveau d'eau sur la hauteur totale, la transmissivité ($T=K.e$) est constante, et pour une transmissivité isotrope et constante :

$$\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{\omega_d}{T} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{Q}{T}$$

extrait de G. de Marsily, 1989

(5.1.4)

équation aux dérivées partielles linéaire de second ordre de type parabolique, analogue à l'équation de la chaleur. ∇^2 est l'opérateur Laplacien, défini ci-dessus à deux dimensions.

Equation de la diffusivité

→ équation de l'écoulement d'une nappe d'eau souterraine en nappe captive

$$\text{div} (\overline{\overline{K}} \text{grad } h) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + q$$

extrait de G. de Marsily, 1989

x, y, z : directions de l'espace

K : Tenseur du Coefficient de perméabilité

div : divergent (notation mathématique représentant la variation dans les différentes directions de l'espace)

grad : gradient

S: coefficient d'emmagasinement (-)

Ss: coefficient d'emmagasinement spécifique ($S_s = S / e$)

q, Q : terme source

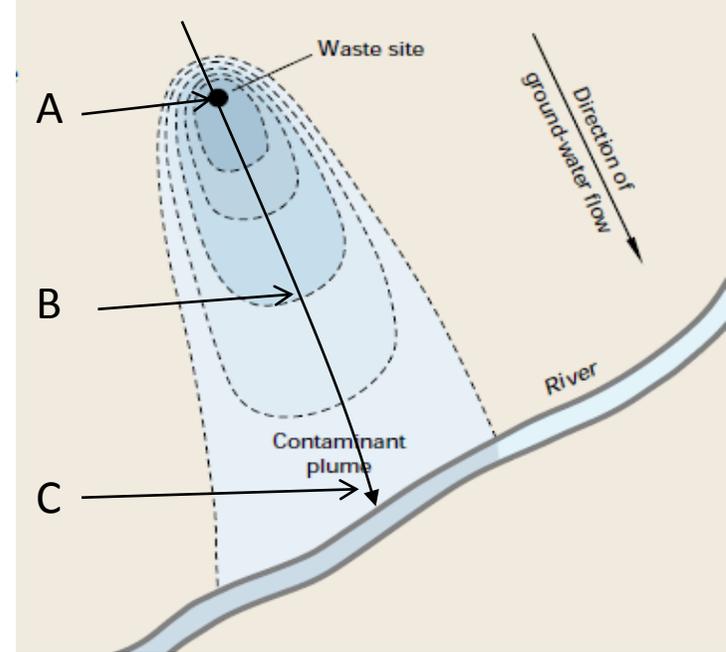
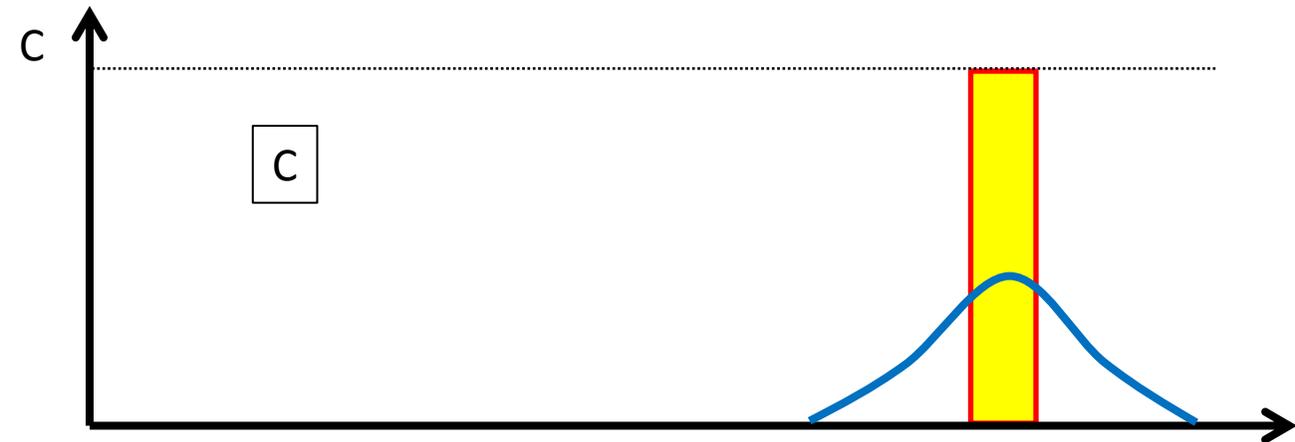
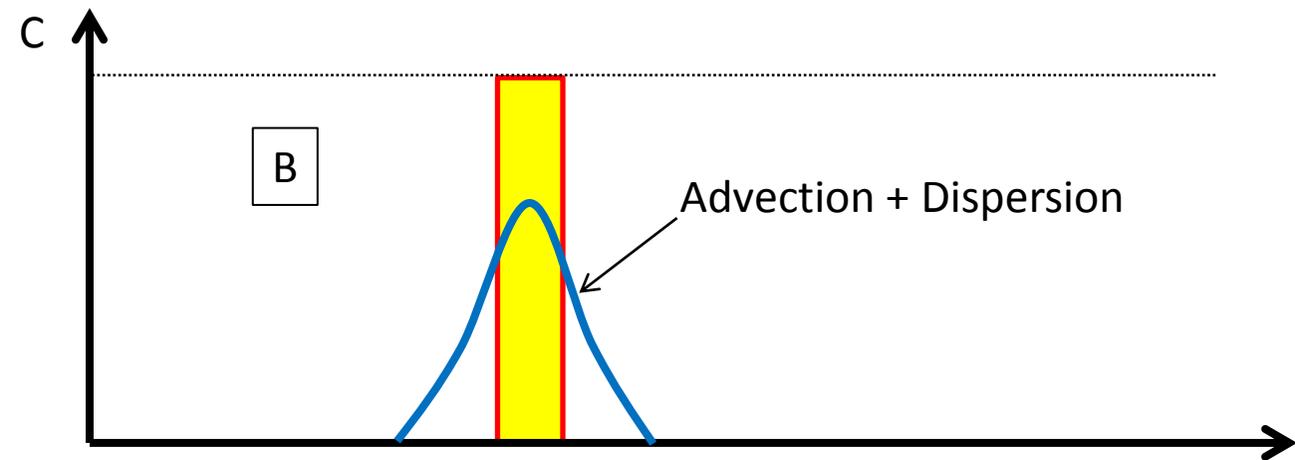
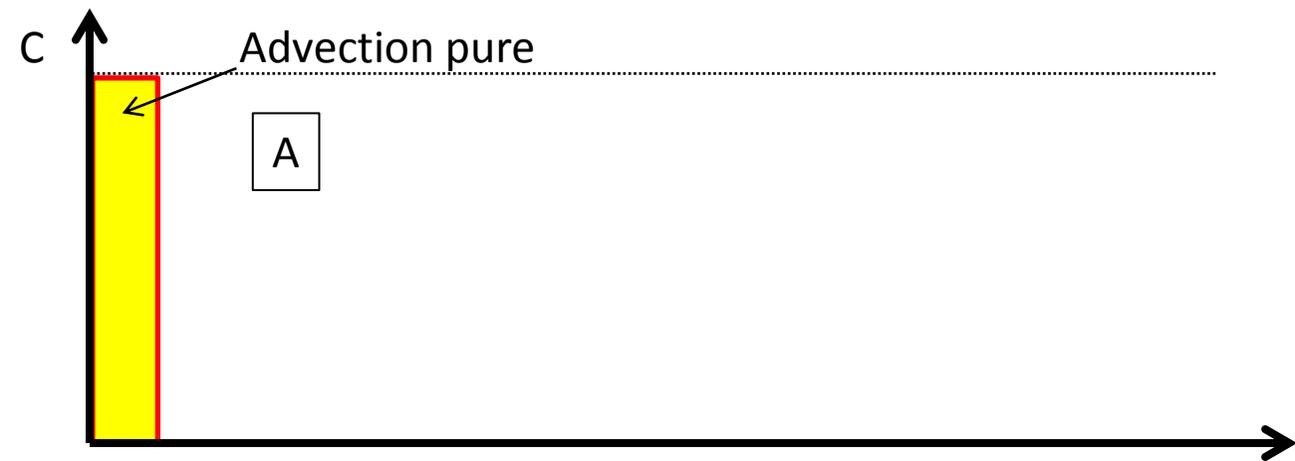
h, t : niveau d'eau et temps (variables)

T/S = diffusivité de l'aquifère

En simplifiant, pour e = constant, transmissivité ($T=K.e$) est constante, et une transmissivité isotrope et constante :

$$\text{div} (\overline{\overline{T}} \text{grad } h) = S \frac{\partial h}{\partial t} + Q$$

extrait de G. de Marsily, 1989



Temps depuis l'injection du soluté polluant