@Mohamed_Nahli

BIOLOGIE MAROC
www.biologie-maroc.com

Hydrogéologie

STU S5

Shop
• Cahiers de Biologie + Lexique
• Accessoires de Biologie

Etudier
Visiter Biologie Maroc pour étudier et passer des QUIZ et QCM enligne et Télécharger TD, TP et Examens résolus.

Emploi
• CV • Lettres de motivation • Demandes...
• Offres d'emploi
• Offres de stage & PFE

Bruno Arfib
Université Aix-Marseille
Laboratoire CEREGE

Master GeE (Sciences de l'Eau, GERINAT, MAEVA)
+ Master STPE

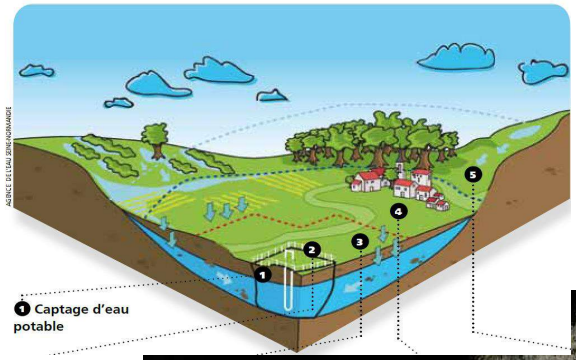
Cours d'Hydrogéologie générale

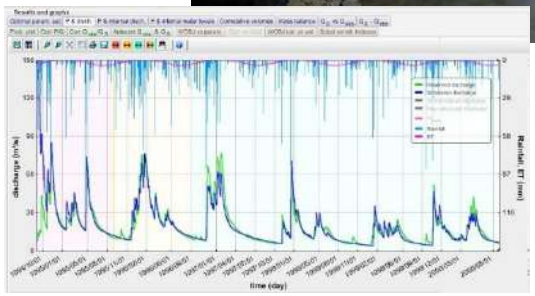
www.karsteau.fr

+ AMETICE

Objectifs

- Connaître le vocabulaire de l'hydrogéologie, les grands types d'aquifères et de nappes
- Comprendre et quantifier les flux d'eau dans les hydrosystèmes (relations eau de surface – eau souterraine)
- Acquérir les méthodes d'étude de l'écoulement de l'eau souterraine dans les milieux poreux et karstiques



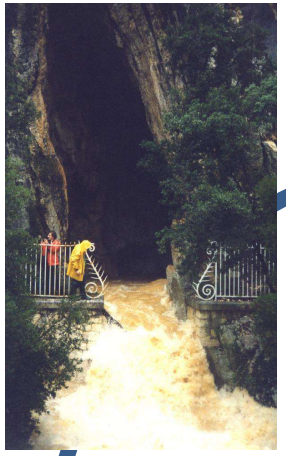


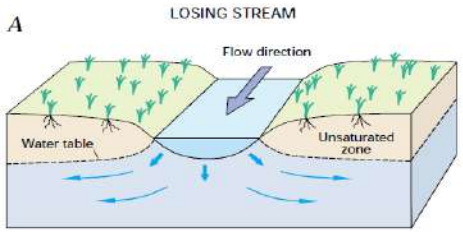
- Manipuler les concepts de l'hydrogéologie appliquée à travers des exercices généralement tirés de cas d'étude.
- Apprentissage des méthodes classiques d'investigation de la ressource en eau

Thèmes abordés

Aix*Marseille université

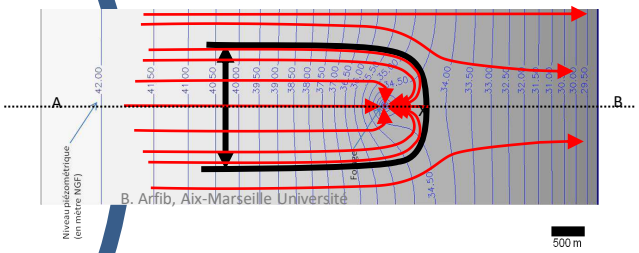
Karst et hydrogéologie régionale (Toulon, Cassis)



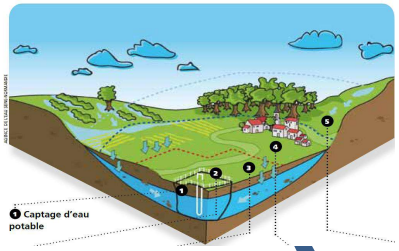


Piézométrie (carte hydrogéologique)

Loi de Darcy (quantification du débit)

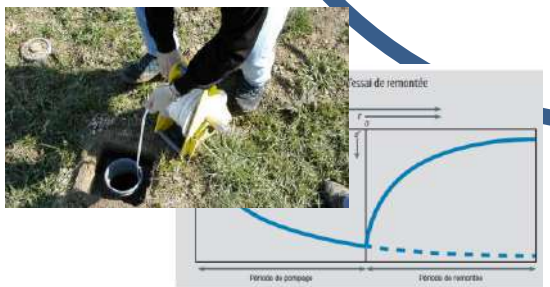


Périmètres de protection autour des captages AEP

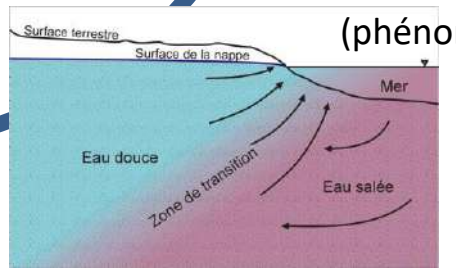


Ressource en eau
Milieu

Essais de pompage (puits et aquifère)



Ressource en eau en zone côtière (phénomène d'intrusion saline)



Introduction

Qu'est-ce que l'hydrogéologie? (Hydrologie – hydrogéologie – hydraulique)

Pourquoi étudier l'hydrogéologie?

➔ eau souterraine = ressource * (eau potable, industrie, agriculture, énergie, écosystèmes)

➔ relations eau souterraine - eau de surface (qualité de l'eau, quantité d'eau, écosystèmes),

➔ eau dans de nombreux risques (mouvements gravitaires (mouvement de terrain, avalanche), inondations, coulées boueuses)…,

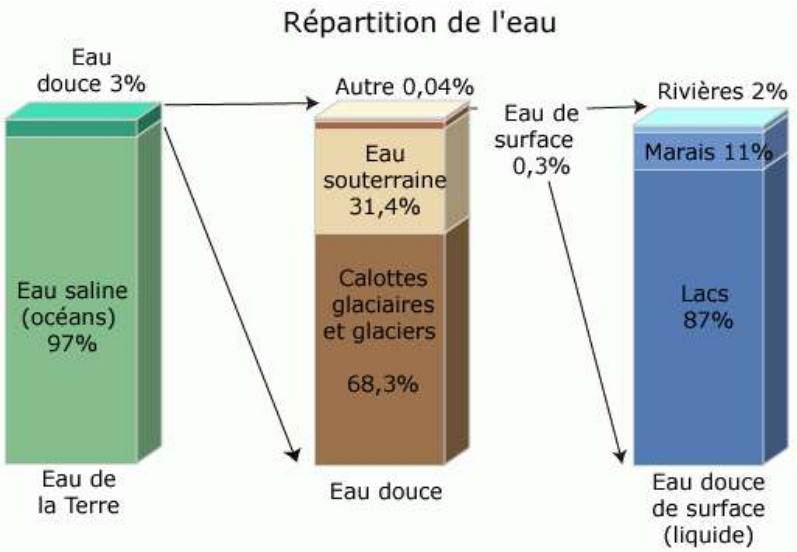
➔ nombreuses actions publiques en lien avec le contexte règlementaire (compétence GEMAPI**, autorisations d'aménagement, prélèvements et rejets d'eau…)

* U**ne ressource géologique** est un composé d'une des enveloppes solides ou fluides de la Terre pouvant faire l'objet d'une utilisation par l'homme, au bénéfice de ce dernier. Cette définition est donc relative, puisqu'elle fait référence à différents besoins humains, qui peuvent varier en fonction de facteurs culturels, technologiques, économiques, etc.

** "Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations »

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

Océans = 70 % de la surface du globe,
97% de la masse totale d'eau



97% d'eau salée
3% d'eau douce

Estimation de la distribution globale de l'eau :				
Source d'eau	Volume d'eau (km³)	Volume d'eau (miles3)	% 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.				

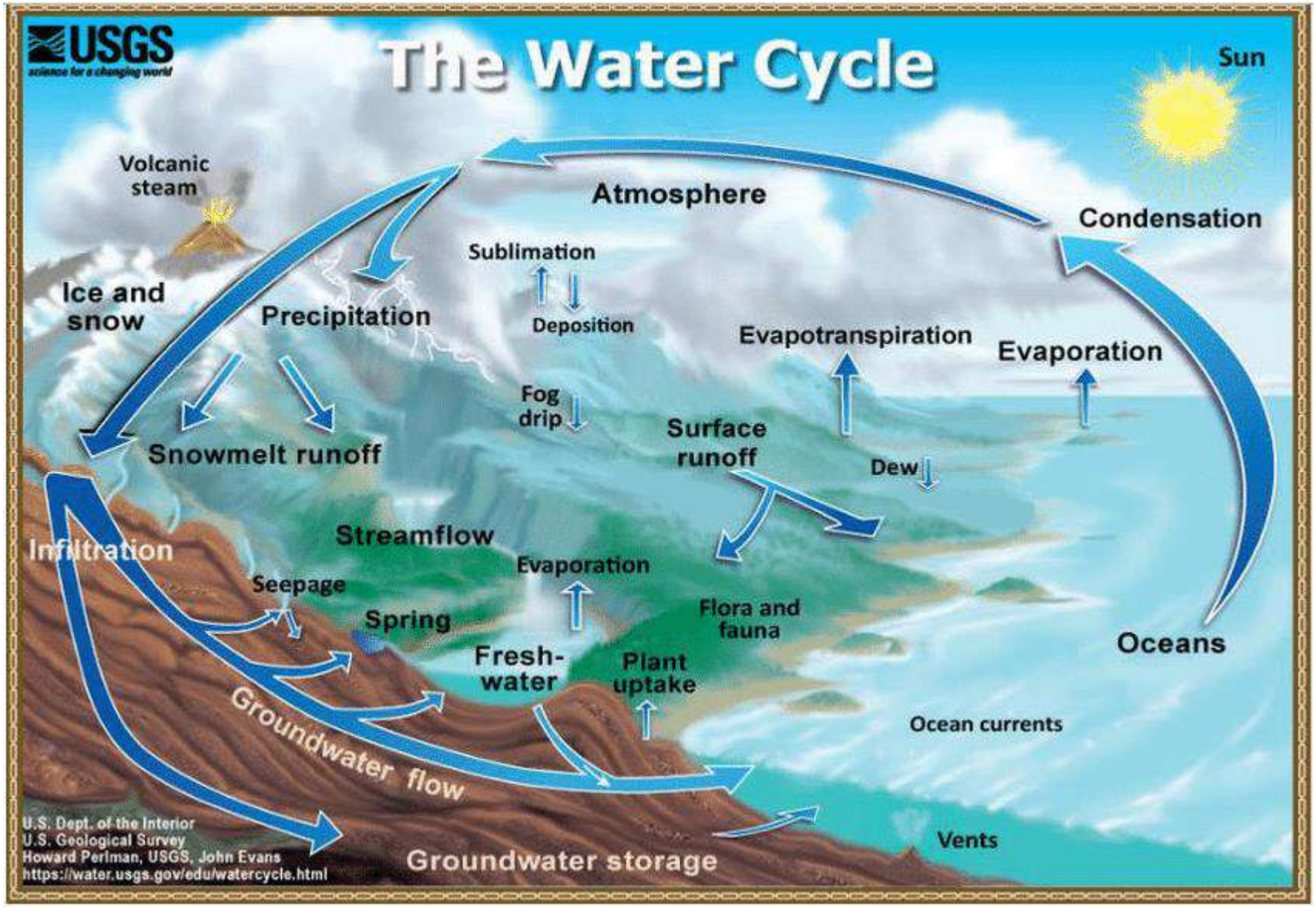
http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclefrench.html

Temps de renouvellement (ou temps de séjour moyen ou temps de résidence)

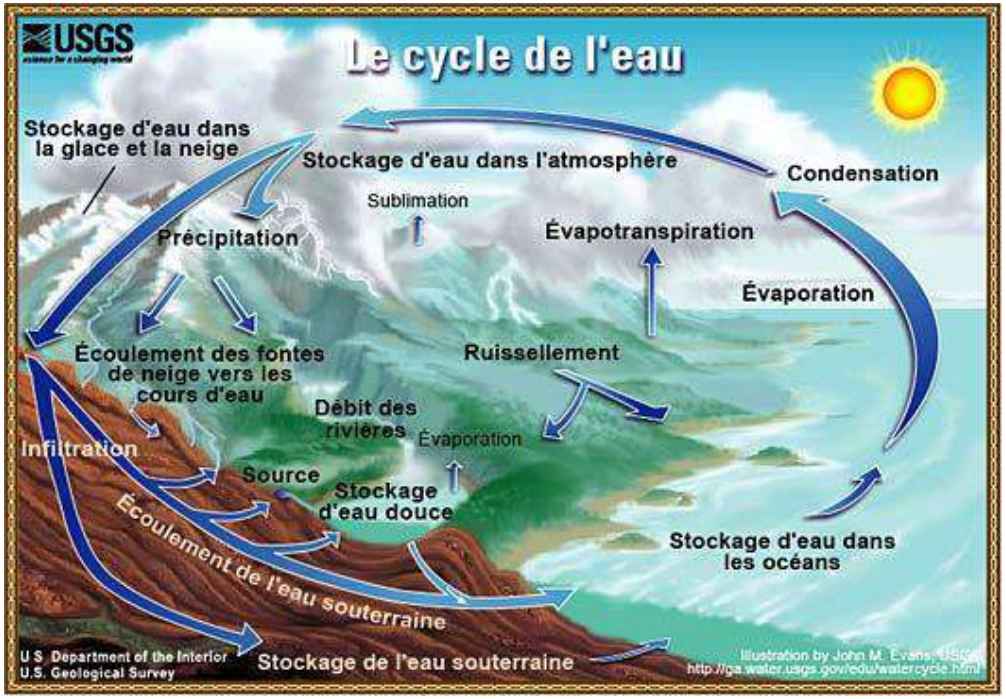
Réservoir	Temps de renouvellement (Jacques, 1996)	Temps de renouvellement (Gleick, 1993)
Océans	2500 ans	3100 ans
Calottes glaciaires	1000 – 10'000 ans	16000 ans
Eaux souterraines	1500 ans	300 ans
Eaux du sol	1 an	280 jours
Lacs	10-20 ans	1-100 ans (eaux douces) 10-1000 ans (eaux salées)
Cours d'eau	10-20 jours	12-20 jours
Eau atmosphérique	8 jours	9 jours
Biosphère	Quelques heures	-

http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre1/main.html

le cycle de l'Eau



Attention : les légendes sont en anglais!



Des flux :

- Evaporation
- Evapotranspiration
- Précipitations
- Ecoulement de l'eau souterraine
- Ecoulement de l'eau de surface

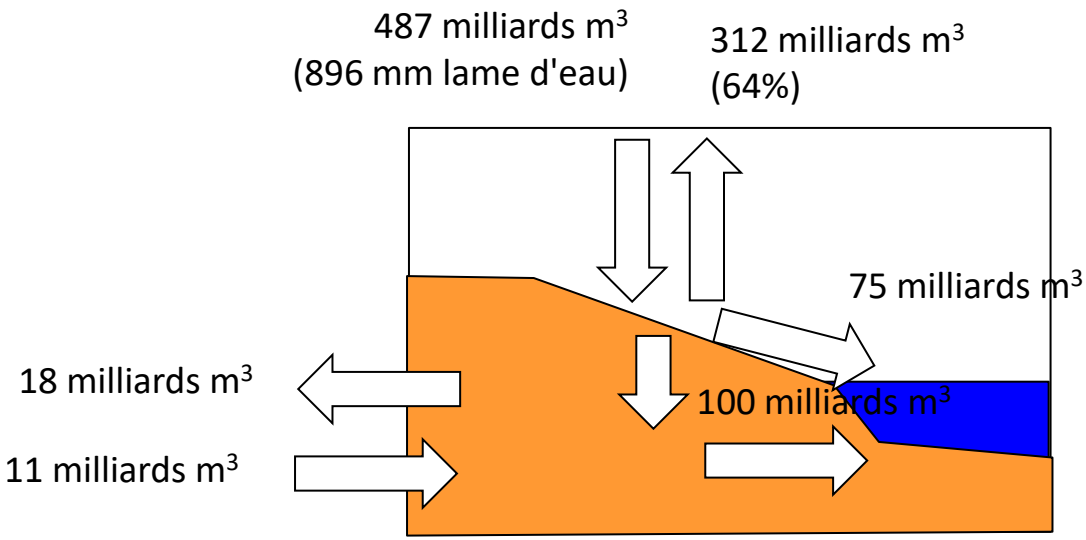
+

- Ruissellement
- Infiltration

Des stocks :

- Océan
- Glace
- Eau souterraine
- Eau de surface (lac + rivières)
- Atmosphère
- Biologie

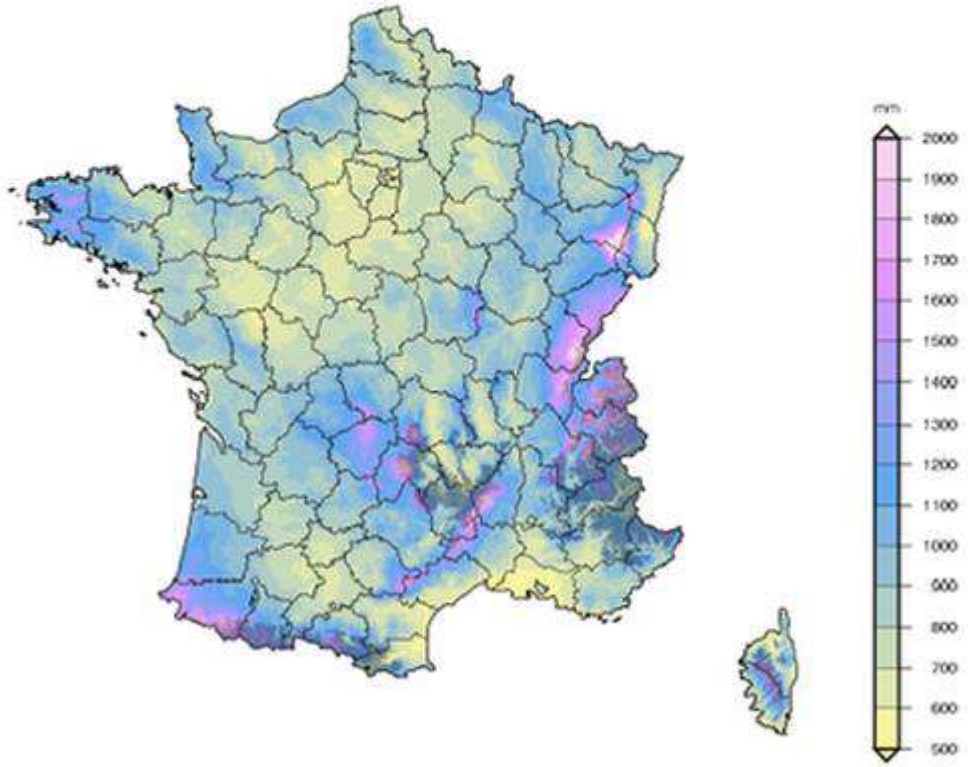
Les volumes d'eau en transit en France à l'échelle annuelle



chiffres : http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/ - consulté le 24/08/12

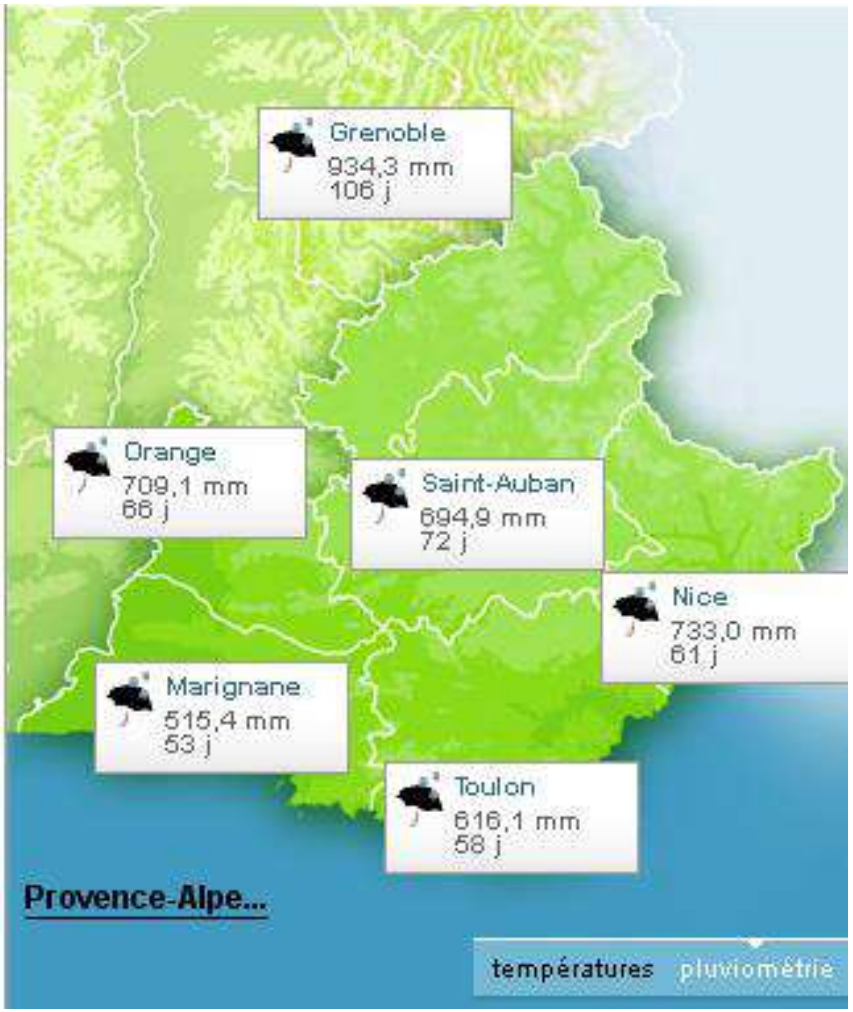
Moyenne annuelle de référence 1981−2010 des précipitations

France



http://pluiesextremes.meteo.fr/hauteurs-moyennes-annuelles-de-precipitations_r213.html

Pluie moyenne (1981-2010) – Météo France

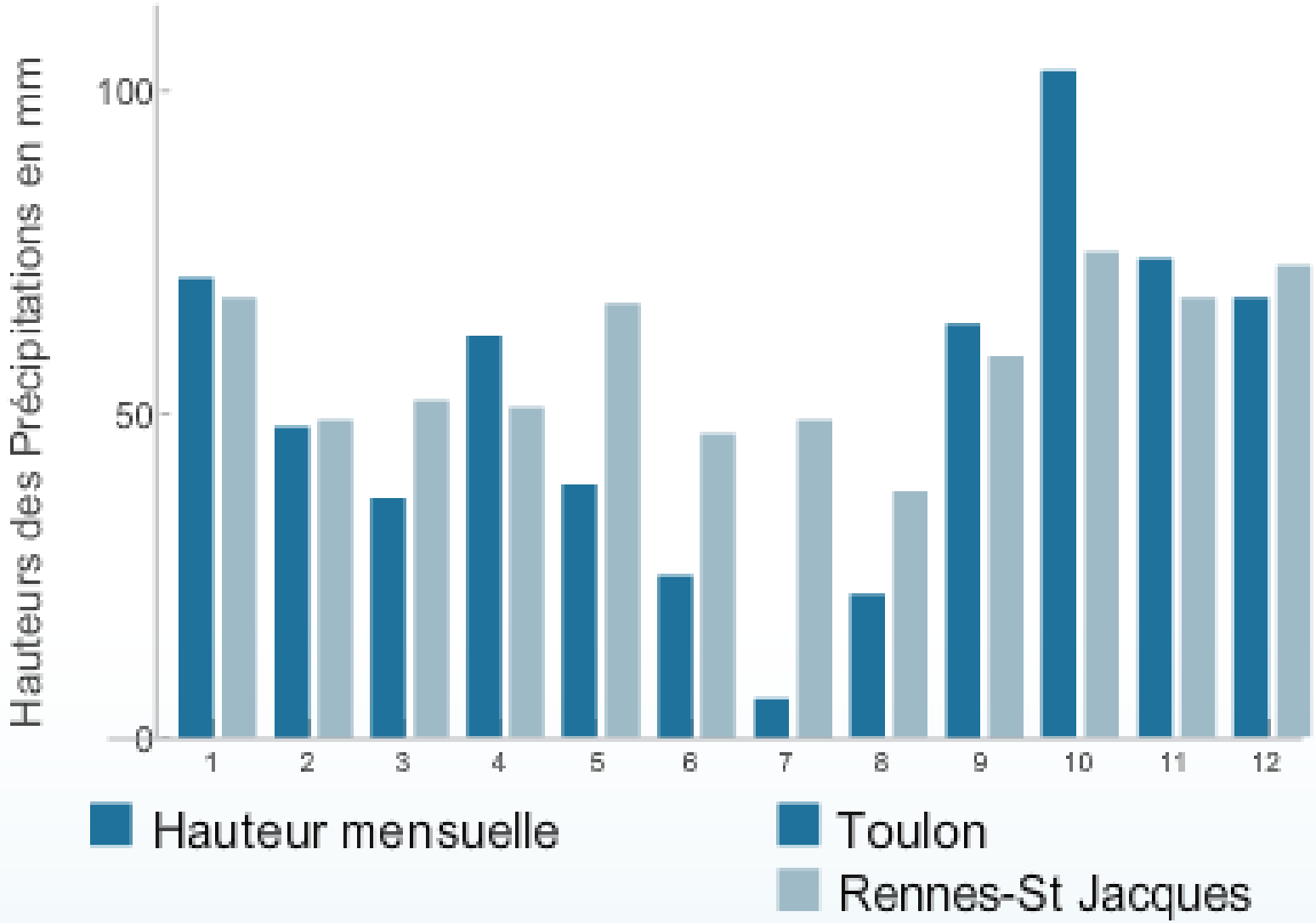


http://climat.meteofrance.com/

Pluie moyenne (1981-2010) – Météo France

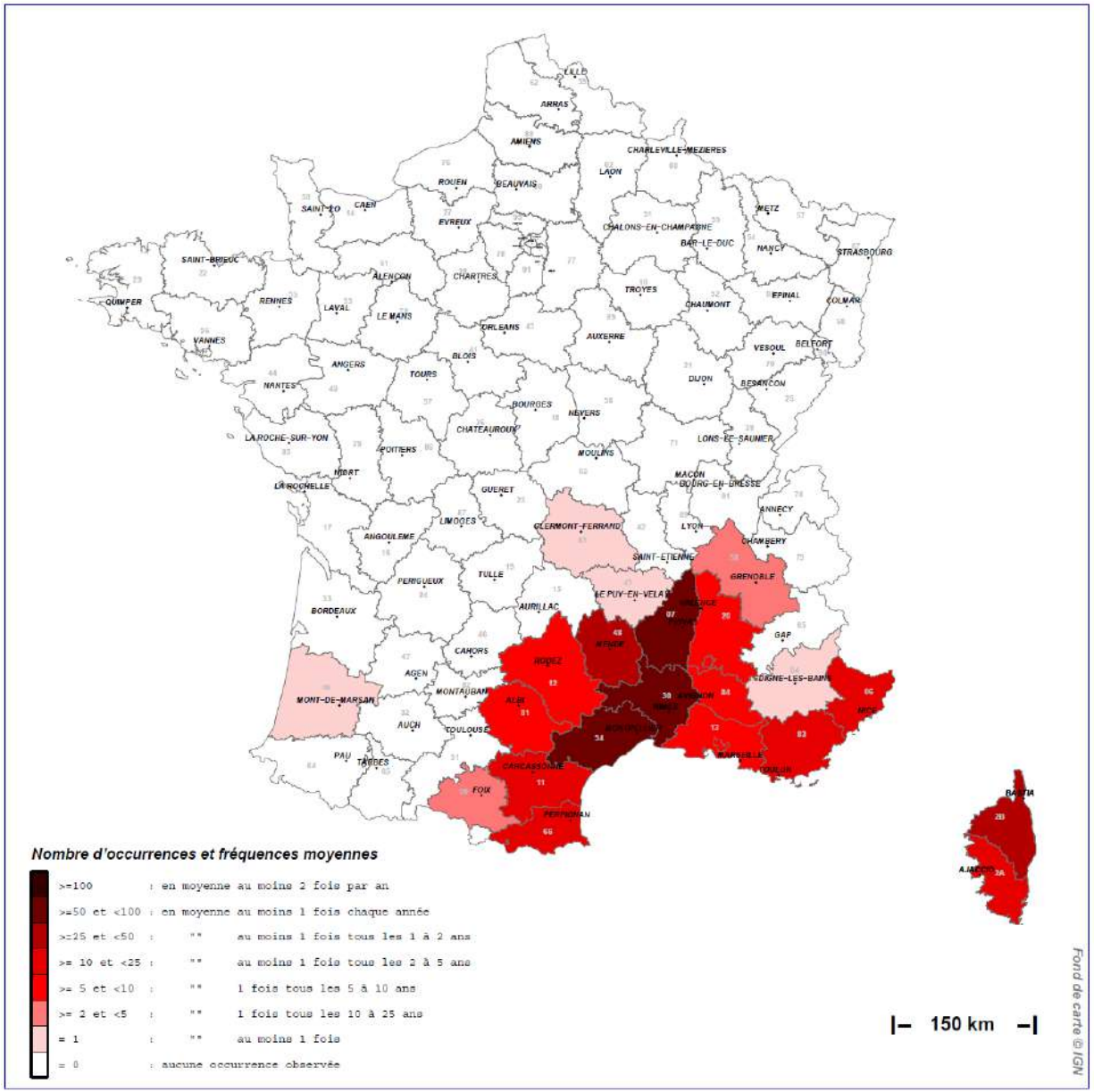
http://climat.meteofrance.com/

Normales mensuelles



Episodes avec plus de 200 mm en 1 jour – Période 1962/2011

200 mm

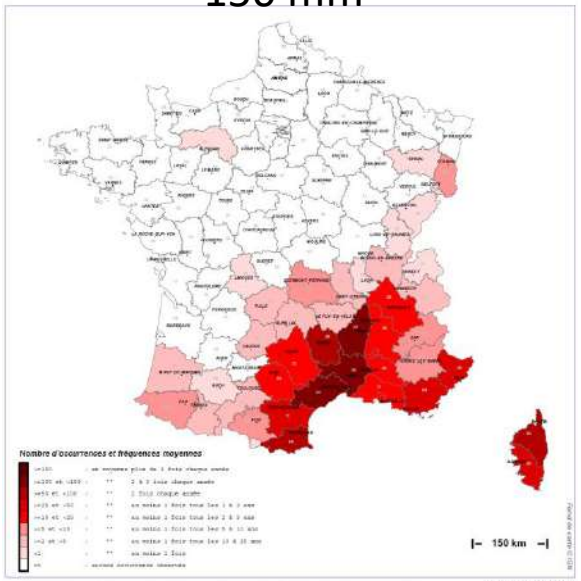


Edition du 15/02/2012

N.B.: La réutilisation non commerciale de ce produit est autorisée, à condition qu'il ne soit pas altéré, et que sa source: METEO-FRANCE ainsi que sa date d'édition soient mentionnées.

Episodes avec plus de 150 mm en 1 jour – Période 1962/2011

150 mm



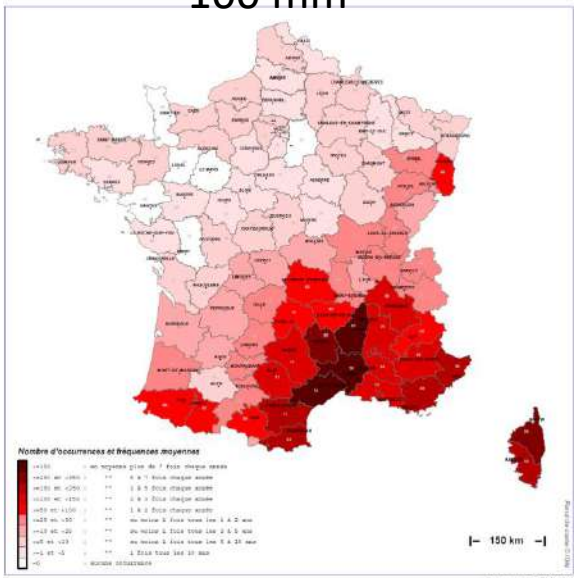
Edition du 15/02/2012

N.B.: La réutilisation non commerciale de ce produit est autorisée, à condition qu'il ne soit pas altéré, et que sa source: METEO-FRANCE ainsi que sa date d'édition soient mentionnées.

http://pluiesextremes.meteo.fr/statistiques_r6.html

Episodes avec plus de 100 mm en 1 jour – Période 1962/2011

100 mm



Edition du 15/02/2012

N.B.: La réutilisation non commerciale de ce produit est autorisée, à condition qu'il ne soit pas altéré, et que sa source: METEO-FRANCE ainsi que sa date d'édition soient mentionnées.

Episode méditerranéen
(ou Cévenole)

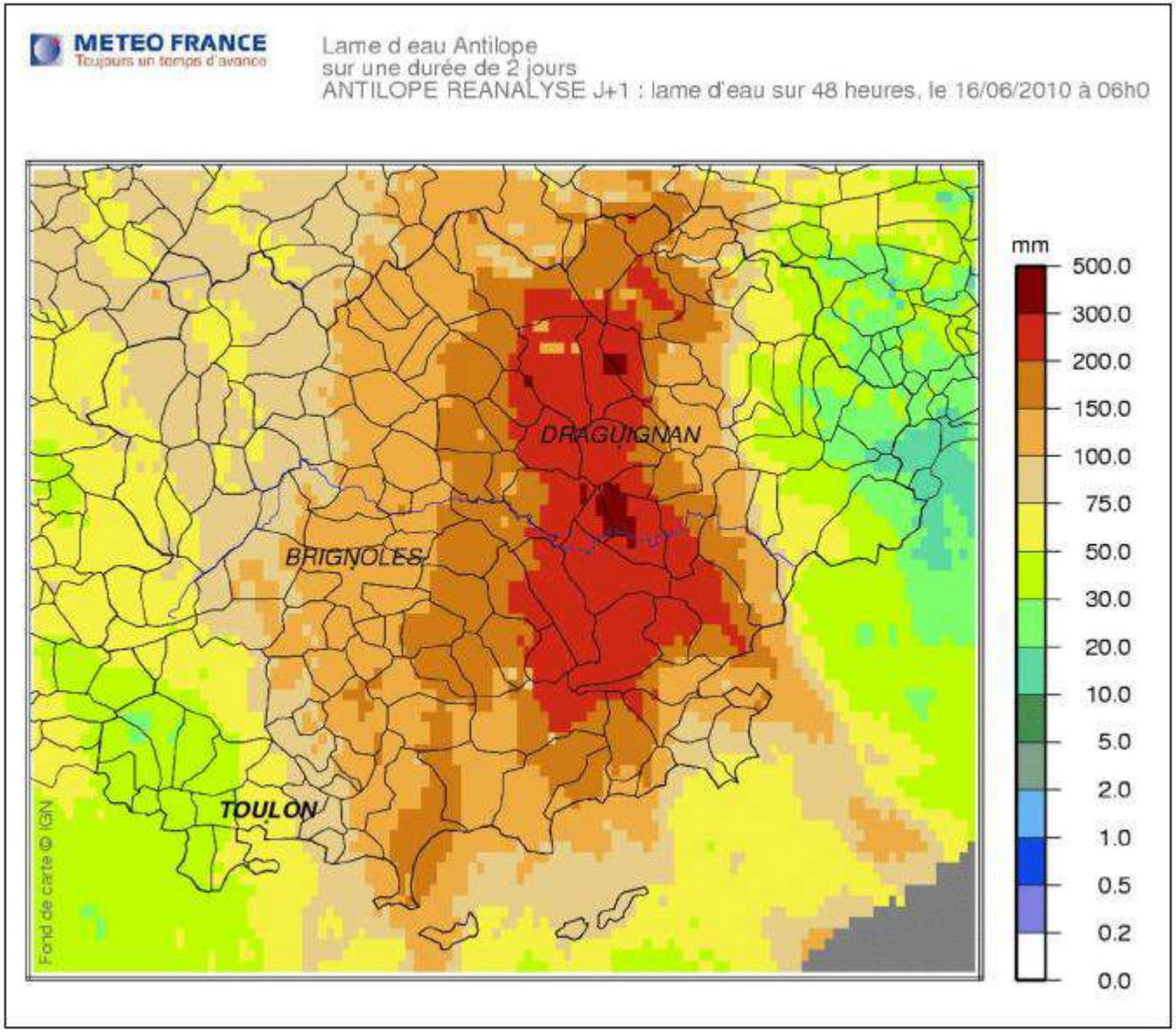
Draguignan 15 juin 2010

Les valeurs maximale ont été observées près de Draguignan: aux Arcs : 397 mm en 24 heures, et à Lorgues (station CIRAME): 460 mm, principalement tombés en seulement une douzaine d'heures.

De telles quantités ayant frappé une grande partie du département entraînent un volume d'eau précipité gigantesque.

Des inondations catastrophiques ont été provoquées par ruissellement et par débordement de la Nartuby et de l'Argens.

http://pluiesextremes.meteo.fr/toto-juin-2010---photos-aeriennes-de-l-evenement-de-draguignan_r190.html



Evaluation de l'incidence de la pluie du Var sur le bassin de l'Arc - 2010 - SABA - GINGER

www.saba-arc.fr/IMG/pdf/Evaluation_de_l_incidence_de_la_pluie_du_Var_sur_le_bassin_de_l_Arc_-_2010_-_SABA_-_GINGER.pdf

La catastrophe de La Vésubie (06) : événement méditerranéen couplé à la tempête Alex
3 octobre 2020

➔ 500 mm de pluie à Saint-Martin-Vésubie en 24 heures,
•380 mm à Andon,
•343 mm à Tende,
•336 mm à Coursegoules,
•319 mm au Mas,
•271 mm à Breil-sur-Roya,
•199 mm à Sospel,
•178 mm à Caussols,

https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers-0/tempete-alex-des-intemperies-exceptionnelles

https://www.franceculture.fr/emissions/la-question-du-jour/vallees-de-larriere-pays-nicois-comment-expliquer-les-crues-exceptionnelles

Evaporation et évapotranspiration

Evaporation ≠ Evapotranspiration

- Radiation solaire
- Température de l'air
- Humidité relative

(+ pluie)

- Vitesse du vent

- Type de végétation
- Stade de développement de la végétation (+ effet combiné de la protection du sol par la végétation, ce qui limite l'évaporation)

Evaporation et évapotranspiration

Evaporation ≠ Evapotranspiration

- Radiation solaire
- Température de l'air
- Humidité relative

(+ pluie)

- Vitesse du vent

- Type de végétation
- Stade de développement de la végétation (+ effet combiné de la protection du sol par la végétation, ce qui limite l'évaporation)

ETRéelle ≠ ETP

ETP : Penman-Monteith (heure ou jour), Thornthwaite (mois)

Evaporation et évapotranspiration

Evaporation ≠ Evapotranspiration

- Radiation solaire
- Température de l'air
- Humidité relative

(+ pluie)

- Vitesse du vent

- Type de végétation
- Stade de développement de la végétation (+ effet combiné de la protection du sol par la végétation, ce qui limite l'évaporation)

ETRéelle ≠ ETP

ETP : Penman-Monteith (heure ou jour), Thornthwaite (mois)

Déficit d'écoulement annuel : formule de Turc

$$\boldsymbol{DE = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}}$$

avec L= 300 + 25 T + 0,05 T^3

où T est la température moyenne annuelle (°C) et P est la précipitation moyenne annuelle (mm/an).

Variation du ruissellement de surface (théorique) au cours d'une averse d'intensité constante

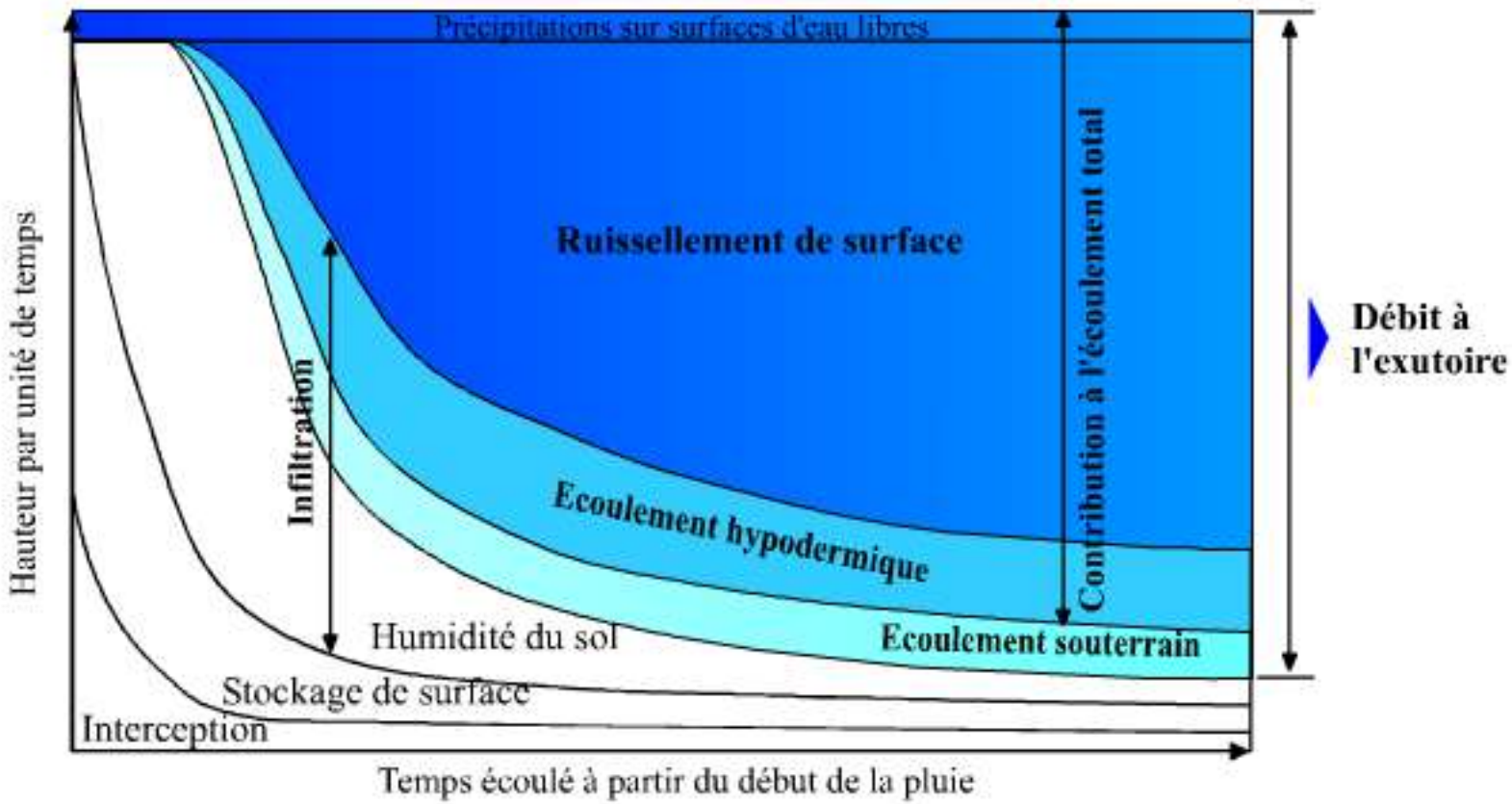
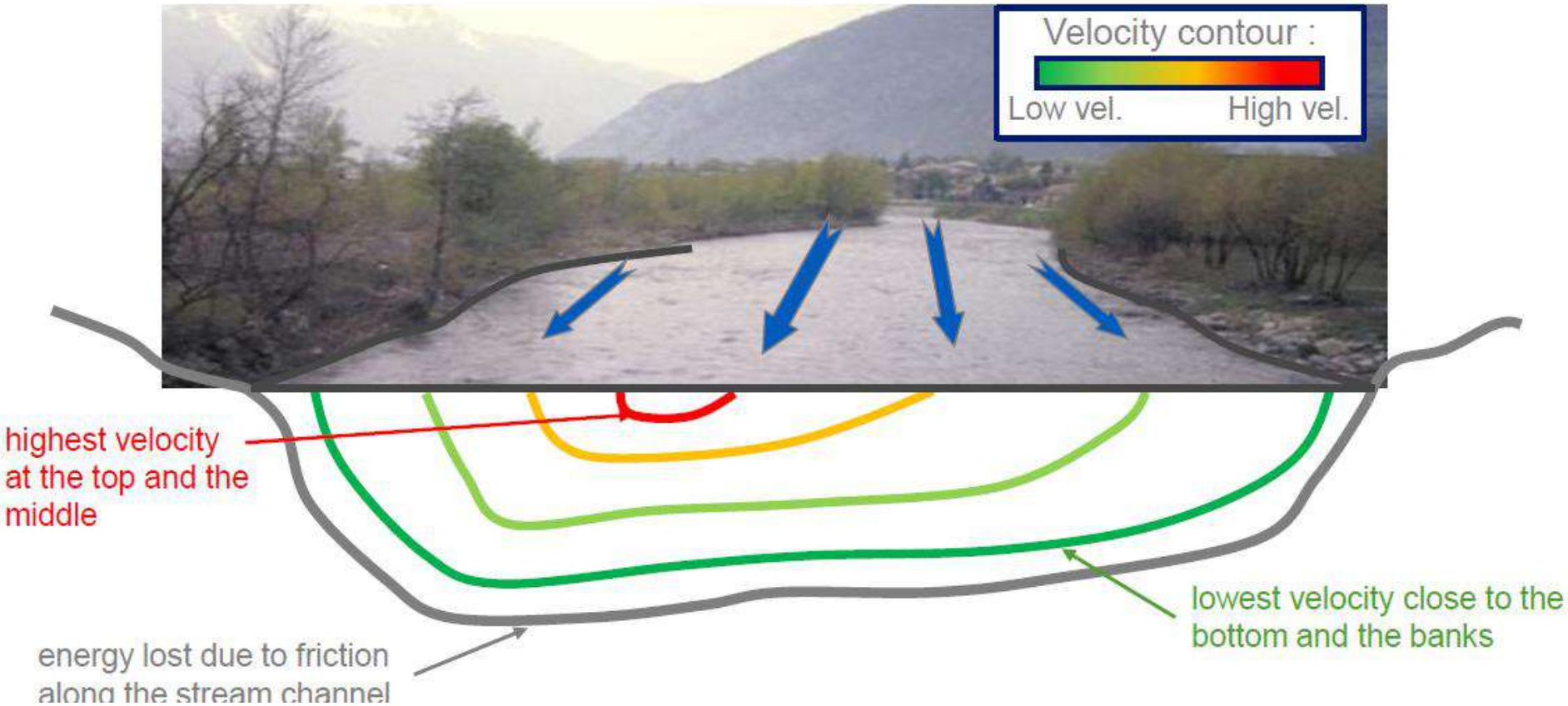


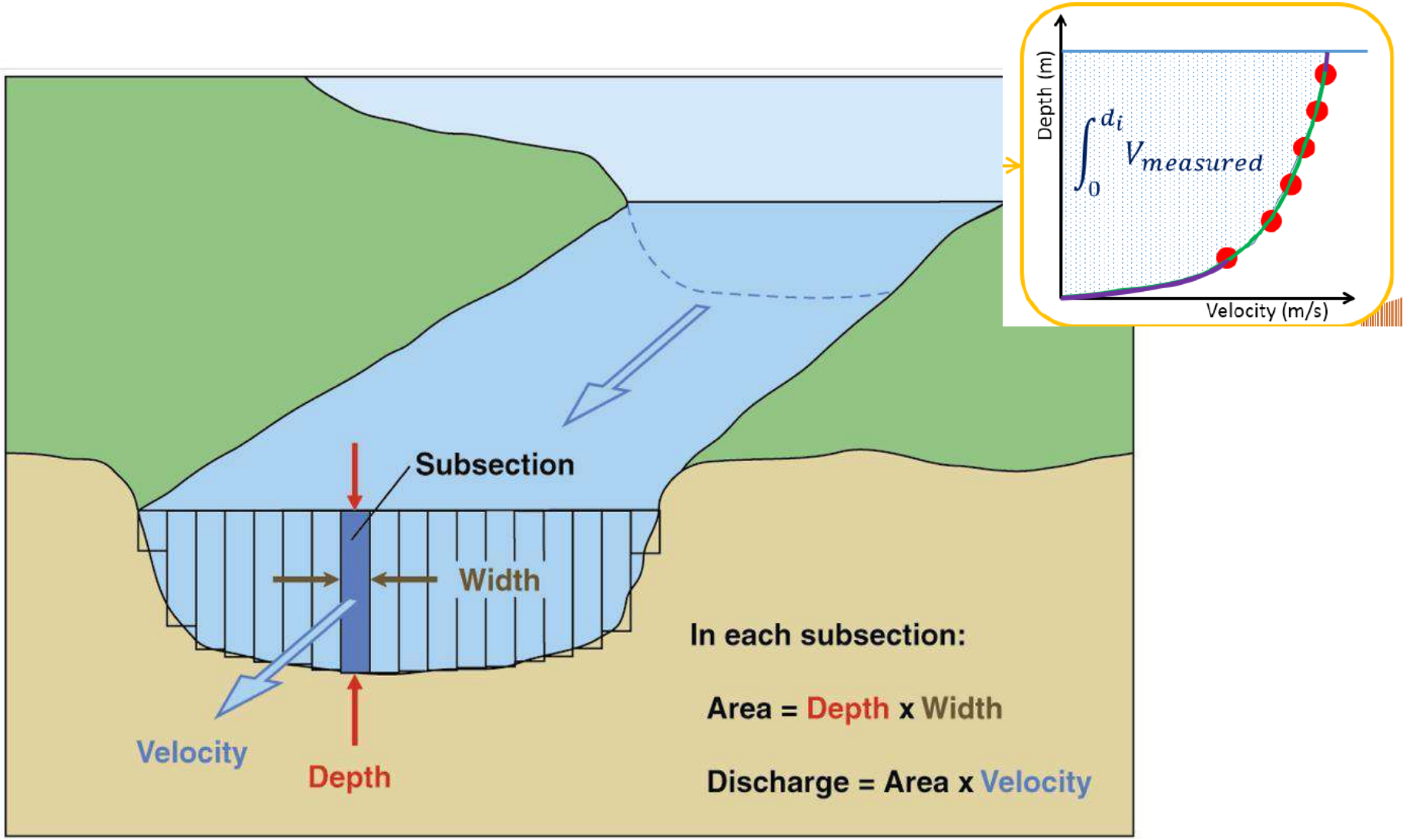
Fig. 5. 9 - Répartition de la hauteur de précipitations au cours d'une averse d'intensité constante (d'après Réméniéras, 1976).

https://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre5/main.html



https://riverflow2018.inrae.fr/wp-content/uploads/2018/09/04_Stream-gauging-techniques_alex.pdf

Mesure du débit d'un cours d'eau



https://www.usgs.gov/media/images/diagram-channel-cross-section-subsections

L'eau souterraine : l'eau qu'on ne voit pas facilement

Source

Où accéder à l'eau souterraine?

Forage ou puits

(piézomètre)

Grottes

Définitions

AQUIFERE

Un ***aquifère*** est un corps (couche, massif) de roches _____ comportant une zone _____ suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre :
- l'_____ significatif d'une nappe souterraine et
- le _____ de quantité d'eau appréciable.

Un aquifère peut comporter une zone ___ _____.

AQUITARD

Un *aquitard* est une formation peu perméable (ou _____ _____), dans laquelle l'eau souterraine circule à _____ vitesse. Ces formations peuvent assurer la _____ _____ __ _____ superposés par le phénomène de **drainance**.

AQUICLUDE

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

NAPPE

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

BASSINS VERSANTS

Le ***bassin versant*** représente l'____ _____ sur laquelle se base l'analyse du _____ _____ et de ses effets.

Le bassin versant hydrologique est défini comme la totalité de la _____ _____ 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 ____ _____. 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 _____ qui est drainée au niveau d'un captage ou d'une source.

Le **niveau piézométrique** est _____ de la surface de l'eau d'une nappe d'eau souterraine lorsque celle-ci est en _____ avec la pression atmosphérique. Le niveau piézométrique __ _____ 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).

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.

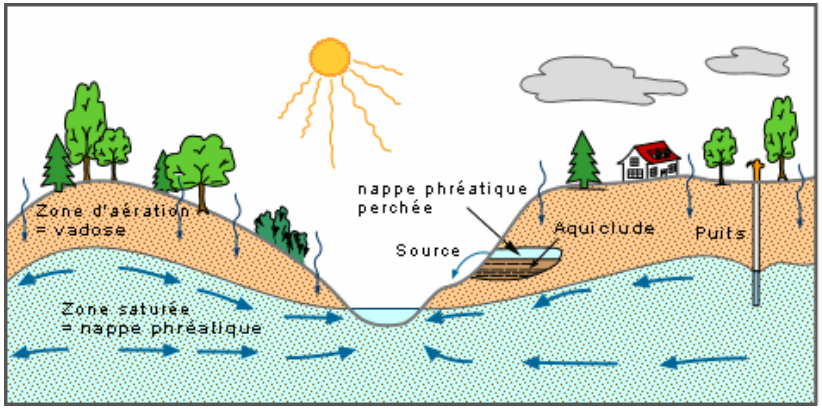
Le **niveau piézométrique** est l'altitude de la surface de l'eau d'une nappe d'eau souterraine lorsque celle-ci est en équilibre avec la pression atmosphérique. Le niveau piézométrique se mesure dans des puits, forages ou piézomètres, ainsi que sur les zones d'affleurement de l'eau souterraine (sources,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

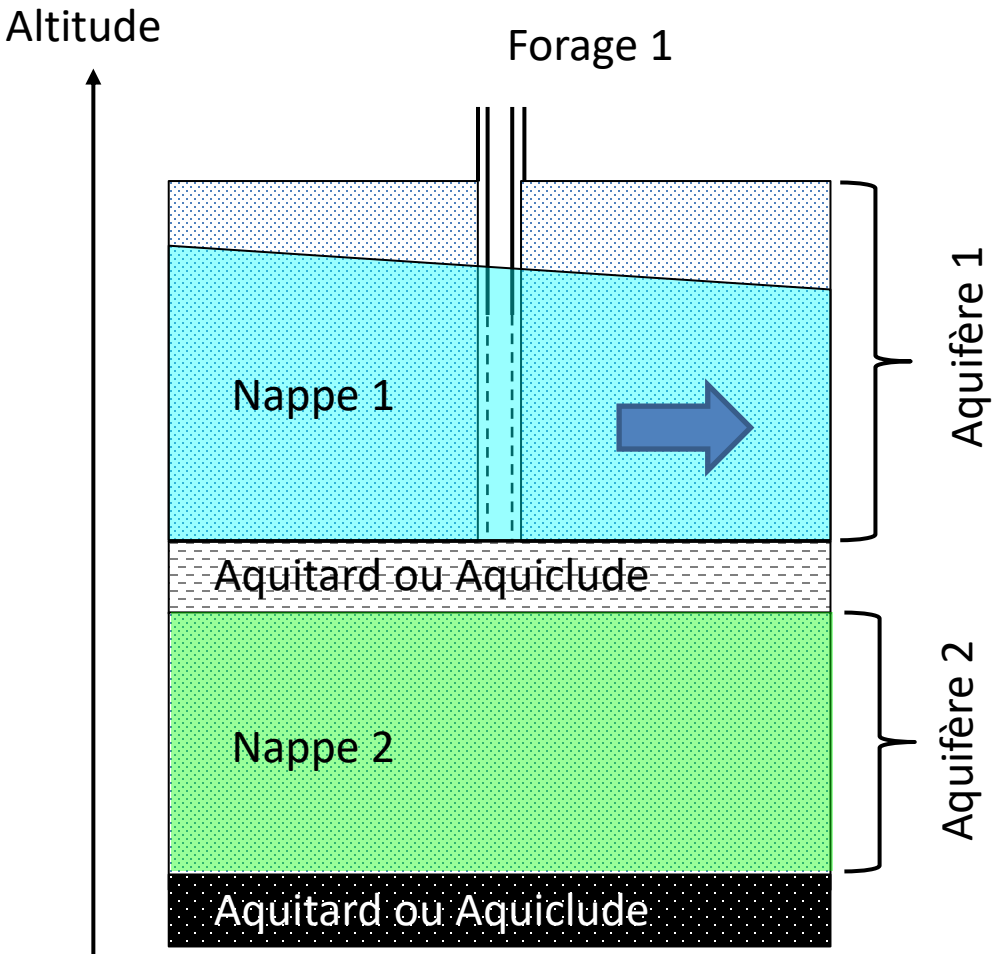
Niveau piézométrique

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.

L'eau circule toujours du niveau piézométrique le plus haut vers le niveau piézométrique le plus bas

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).



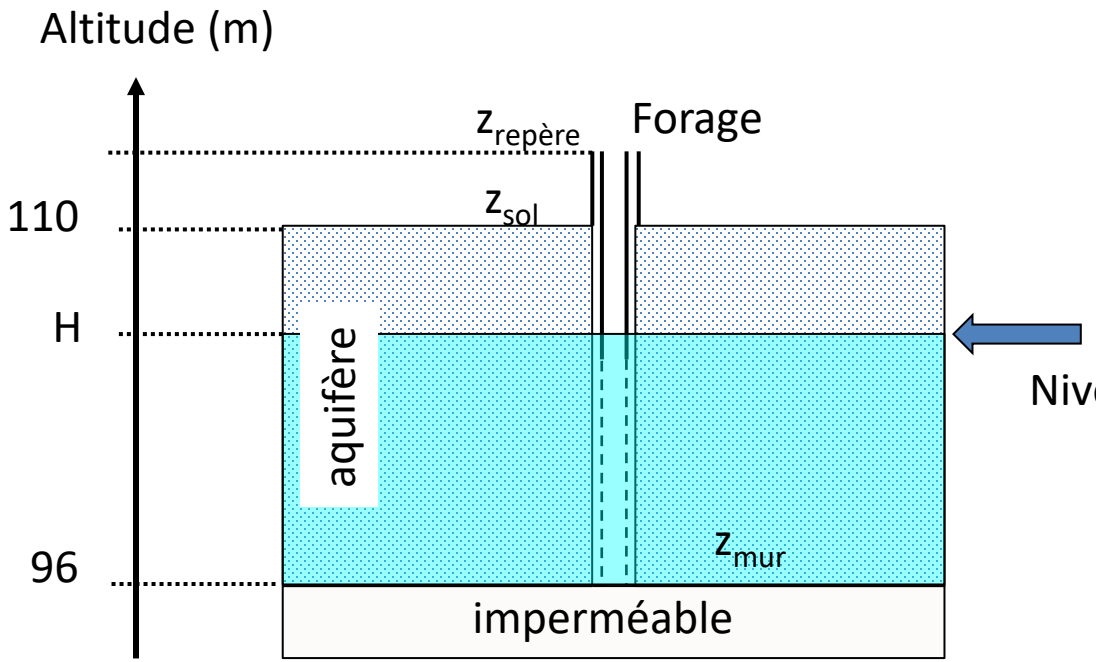


Coupe schématique

Exemple niveau piézométrique

Mesure avec une sonde piézométrique manuelle

Coupe schématique



Niveau piézométrique

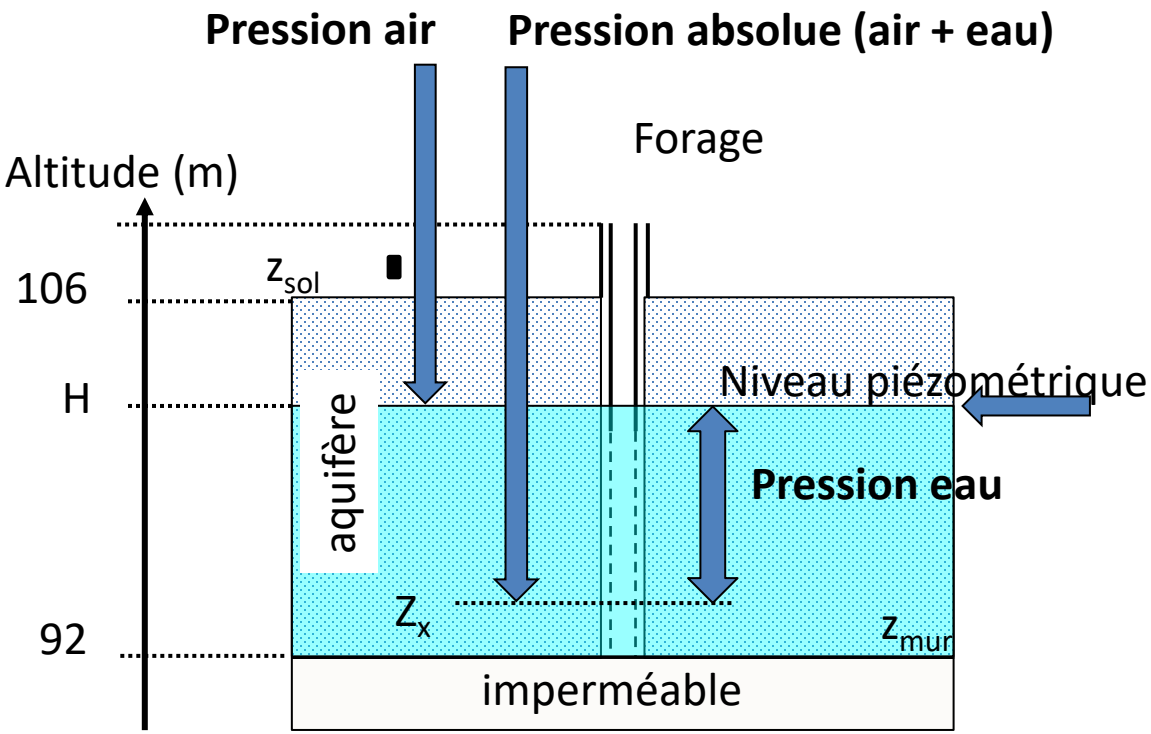
Profondeur de l'eau / repère : 5,85 m
Hauteur du repère /sol : 0,30 m

Calculez le niveau piézométrique H,
la puissance de l'aquifère (au forage),
l'épaisseur de la zone saturée,
l'épaisseur de la zone non saturée.

Exemple niveau piézométrique

Les pressions

Coupe schématique



Pression eau = Pression absolue – Pression air

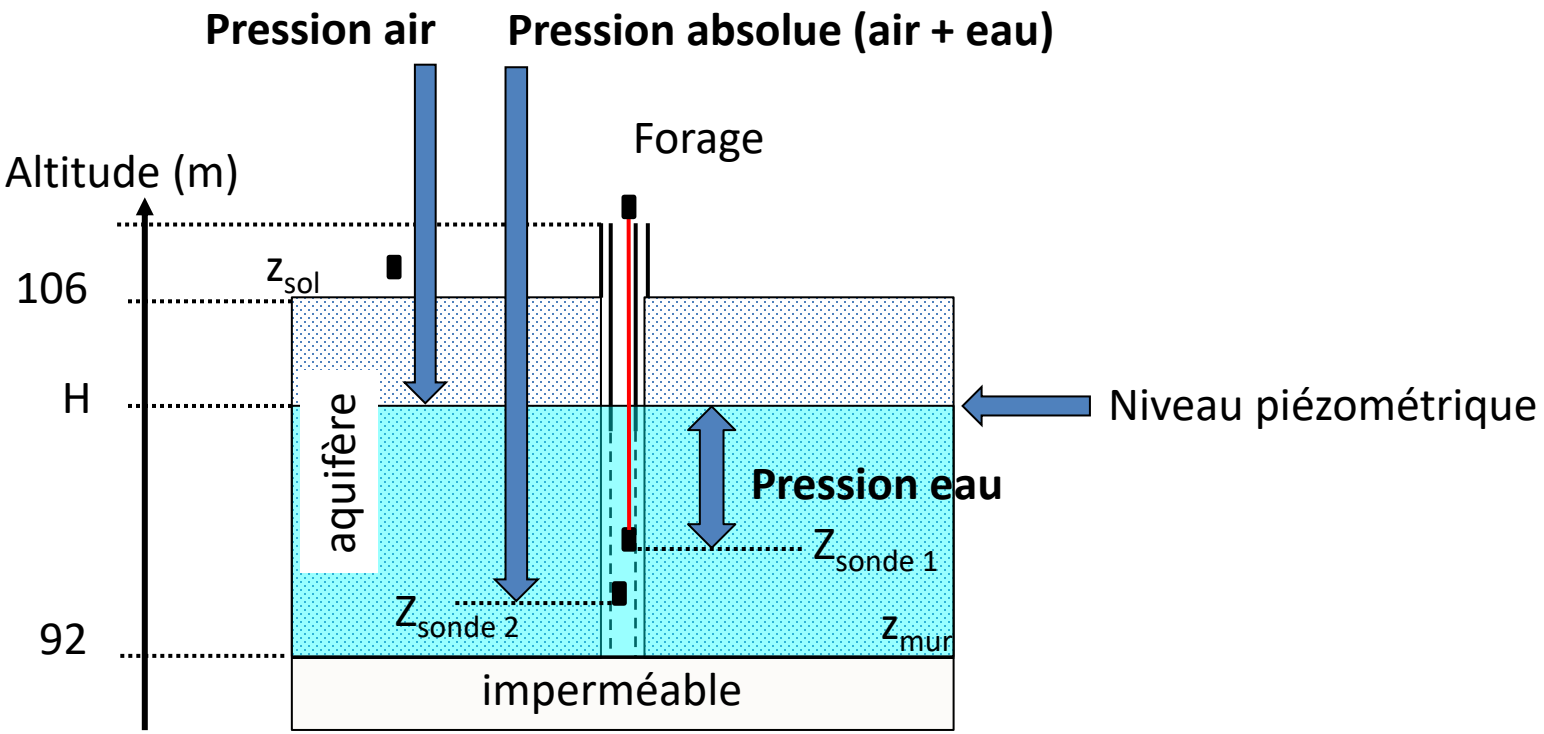
≠

Niveau piézométrique

Exemple niveau piézométrique

Mesure avec une sonde de pression

Coupe schématique



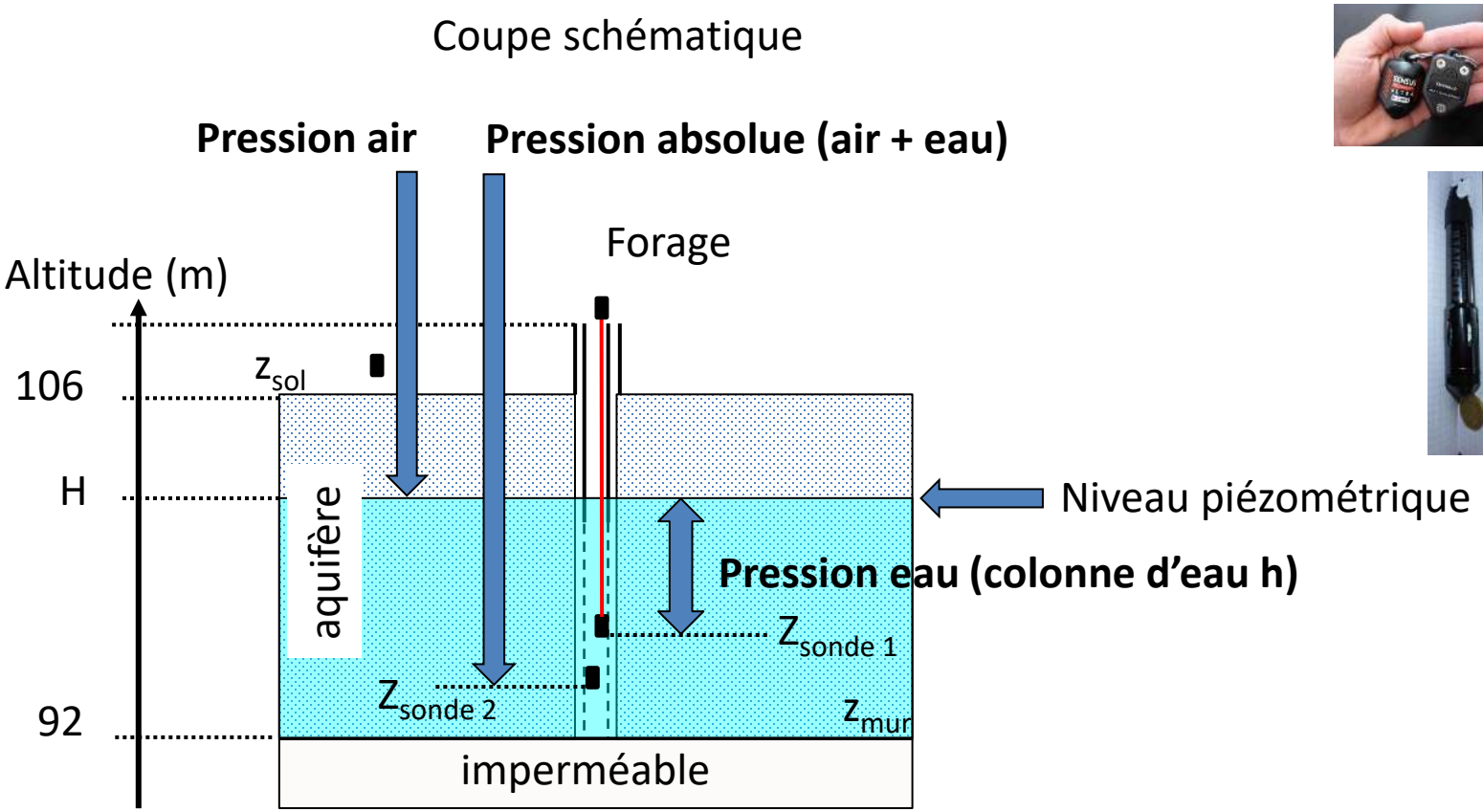
sonde de mesure
de la pression de l'eau, avec
un capillaire pour l'équilibre
avec la pression de l'air

▮ : sonde de mesure

Sonde de pression relative
ou
sonde de pression absolue

Exemple niveau piézométrique

Mesure avec une sonde de pression



▮ : sonde de mesure

$$\text{Pression} = \rho \cdot g \cdot h$$

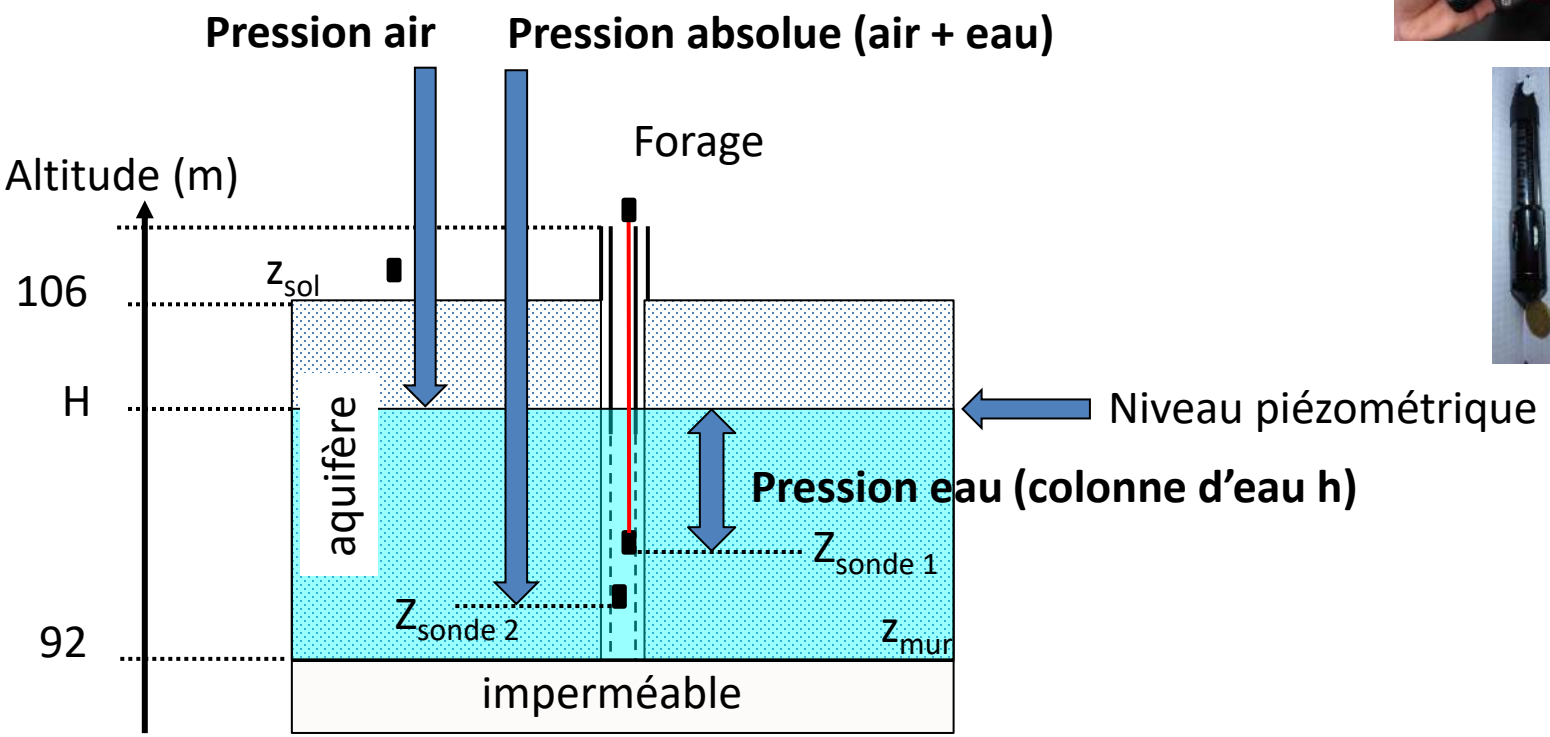
$$H = Z_0 + P / (\rho \cdot g)$$

H le niveau piézométrique en mètre (référence par rapport au niveau de la mer),
Z la position de la sonde en mètre (référence par rapport au niveau de la mer),
P la pression en Pascal,
ρ la masse volumique de l'eau (en $kg.m^{-3}$),
g l'accélération de la pesanteur ($m.s^{-2}$),
h la hauteur de la colonne d'eau au-dessus de la sonde de mesure immergée (en mètre)

Exemple niveau piézométrique

Mesure avec une sonde de pression

Coupe schématique



▮ : sonde de mesure

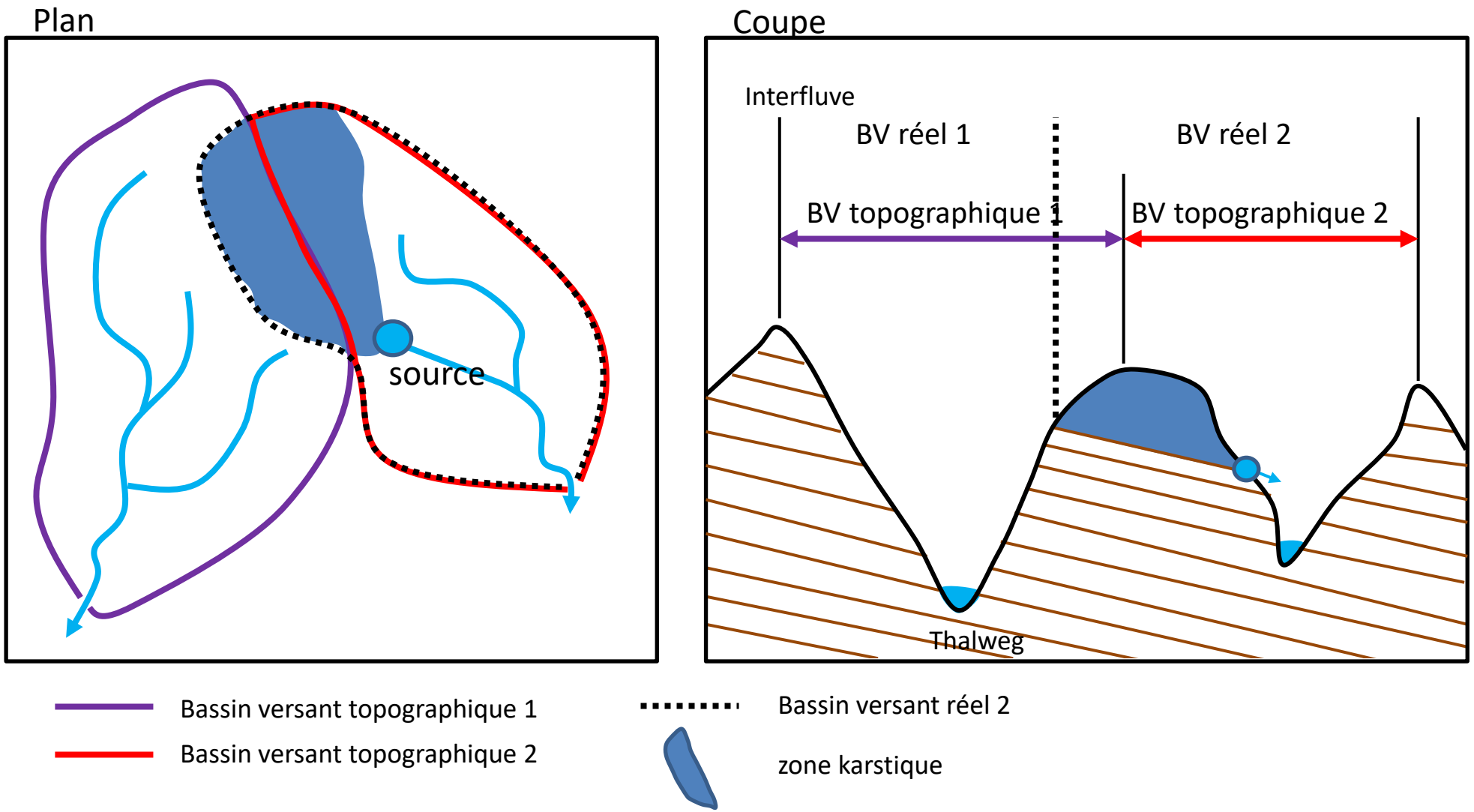
Pression = ρ . g . h

$H = Z_O + P / (\rho . g)$

Ecrivez l'expression du niveau piézométrique :

- **En utilisant la sonde de mesure n°1 (pression relative)**
- **En utilisant la sonde de mesure n°2 (pression absolue)**

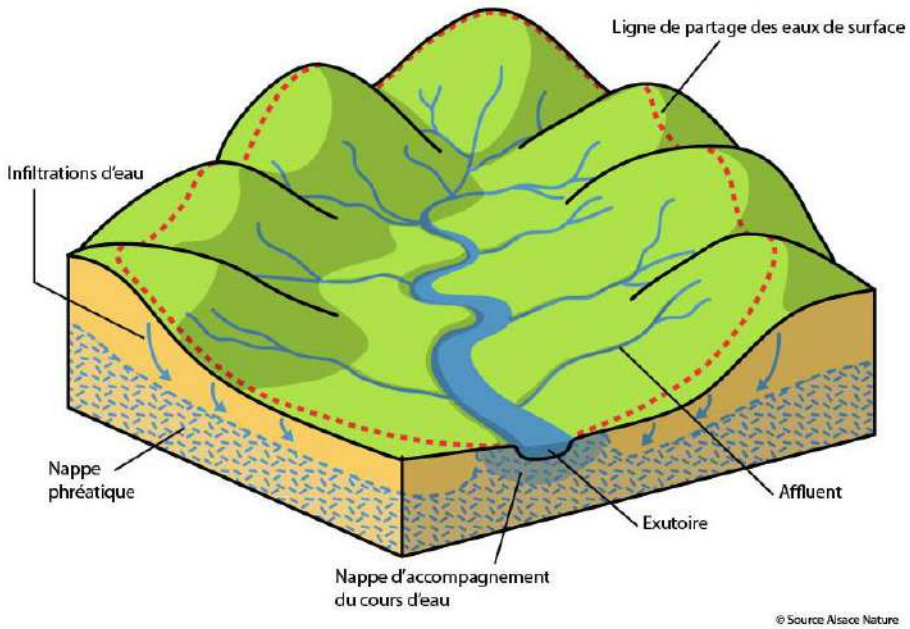
Bassins versants topographiques (ou hydrologique) / bassins versants réels (hydrogéologiques)



Bilan hydrologique

Domaine d'étude : bassin versant, infrastructure (parking…), compartiment du cycle de l'eau…

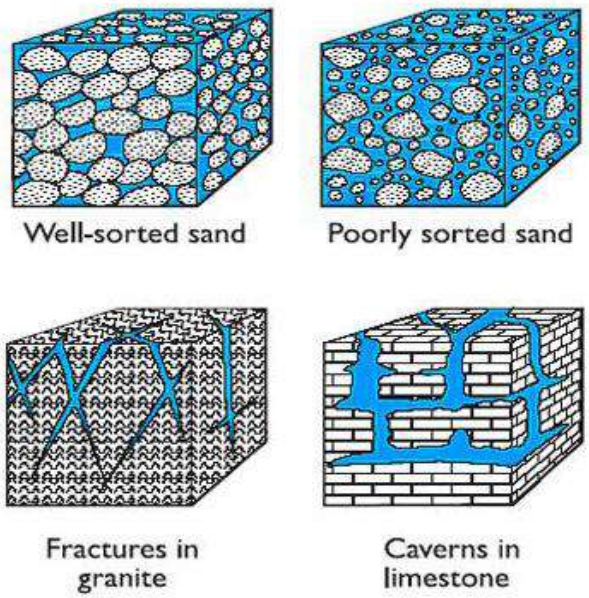
Entrées = Sorties +/- Variations de stock



http://www.syribt.fr/notre-territoire/definition/

http://lithotheque.ac-aix-marseille.fr/Affleurements_PACA/04_terrasses_bleone/04_terrasses_alluv_anc.htm

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



arène granitique (poreux)

Karst

Pourquoi les vides karstiques existent-ils?

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

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 \quad (1)$$

$$H_2CO_3 \leftrightarrow HCO_3^- + H^+ \quad (2)$$

$$CaCO_3 \leftrightarrow Ca^{2+} + CO_3^{2-} \quad (3)$$

$$CO_3^{2-} + H^+ \leftrightarrow HCO_3^- \quad (4)$$

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:

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \leftrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^- \quad (5)$$

Dissolution : $CaCO_3 + H_2O + CO_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2\ HCO_3^-$

Précipitation : $CaCO_3 + H_2O + CO_2 \leftarrow Ca^{2+} + 2\ HCO_3^-$

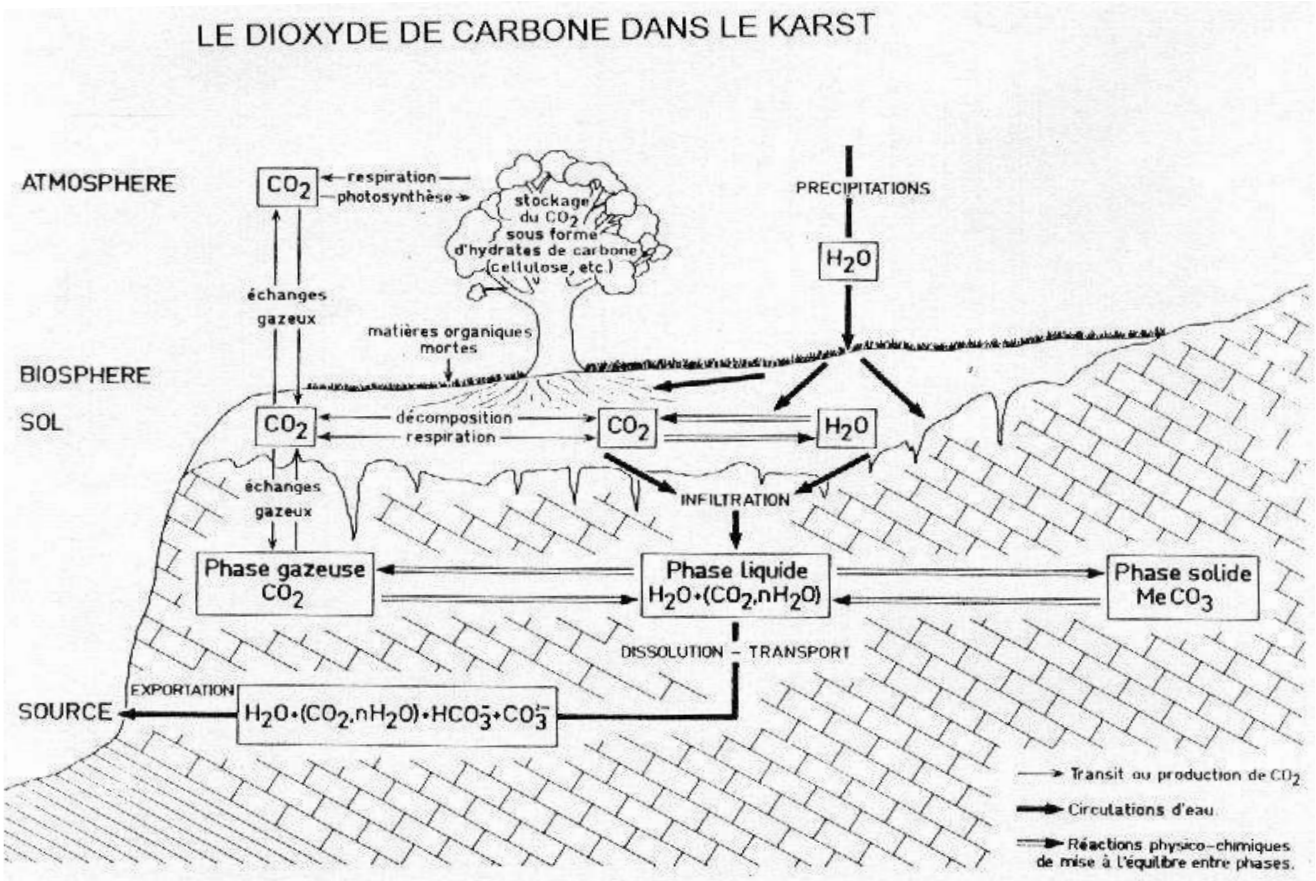
➔ Karstification = dissolution du carbonate de calcium par une eau acide
Nécessite du CO_2 et un écoulement

Pourquoi les vides karstiques existent-ils? Dissolution / Précipitation

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

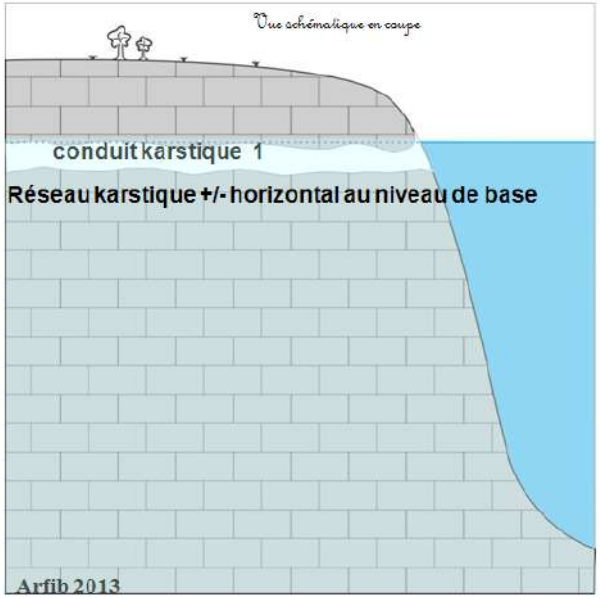
- Une pression partielle en CO_2 x100 dans le sol
- Déplacement du CO_2 dans l'eau (forme dissoute) et sous forme gazeuse (écoulement diphasique)

4 à 8% CO_2 gaz dans le sol

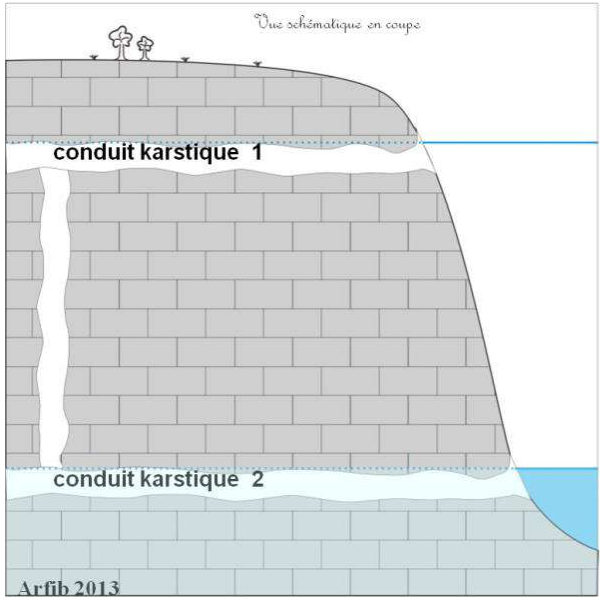


Autre origine : H_2S ou CO_2 profond

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



niveau 1

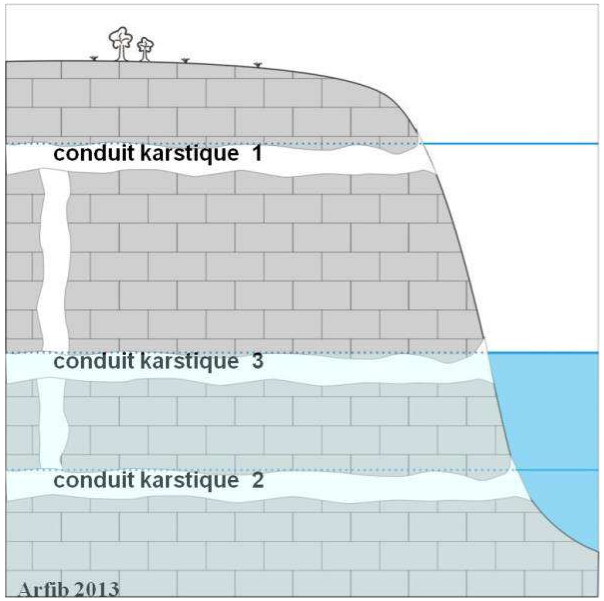


niveau 1

chute du niveau de base

niveau 2

OU

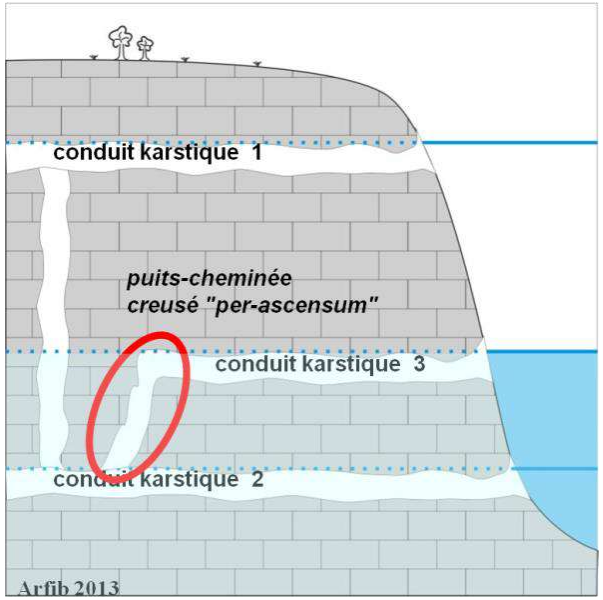


niveau 1

niveau 3

montée du niveau de base

niveau 2



niveau 1

niveau 3

montée du niveau de base

niveau 2

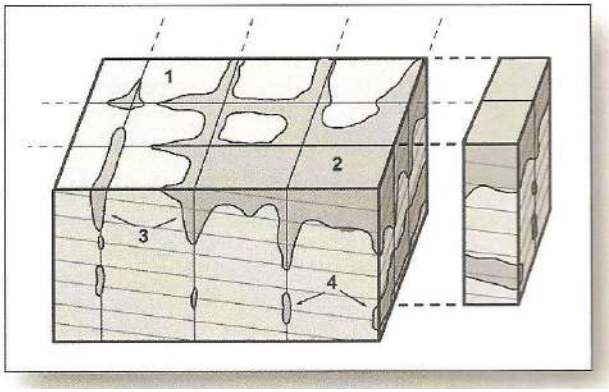
Pourquoi les vides karstiques existent-ils?

Un nouveau processus : **la fantômisation**

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

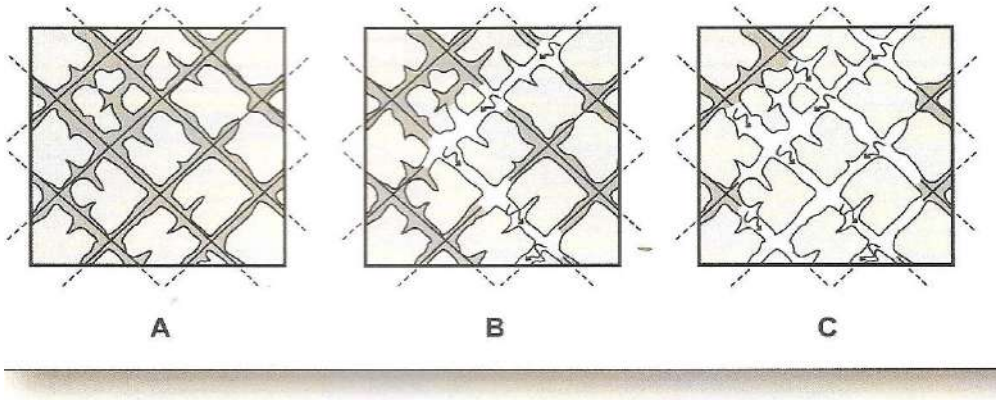
➔ Formation d'un réseau karstique anastomosé, de type labyrinthe

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'évidemment 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.

extrait de Bruxelles et Quinif, 2010, La fantômisation : processus et développement du karst. Ouvrage Karst et Grottes de France, ed. dir. P. Audra

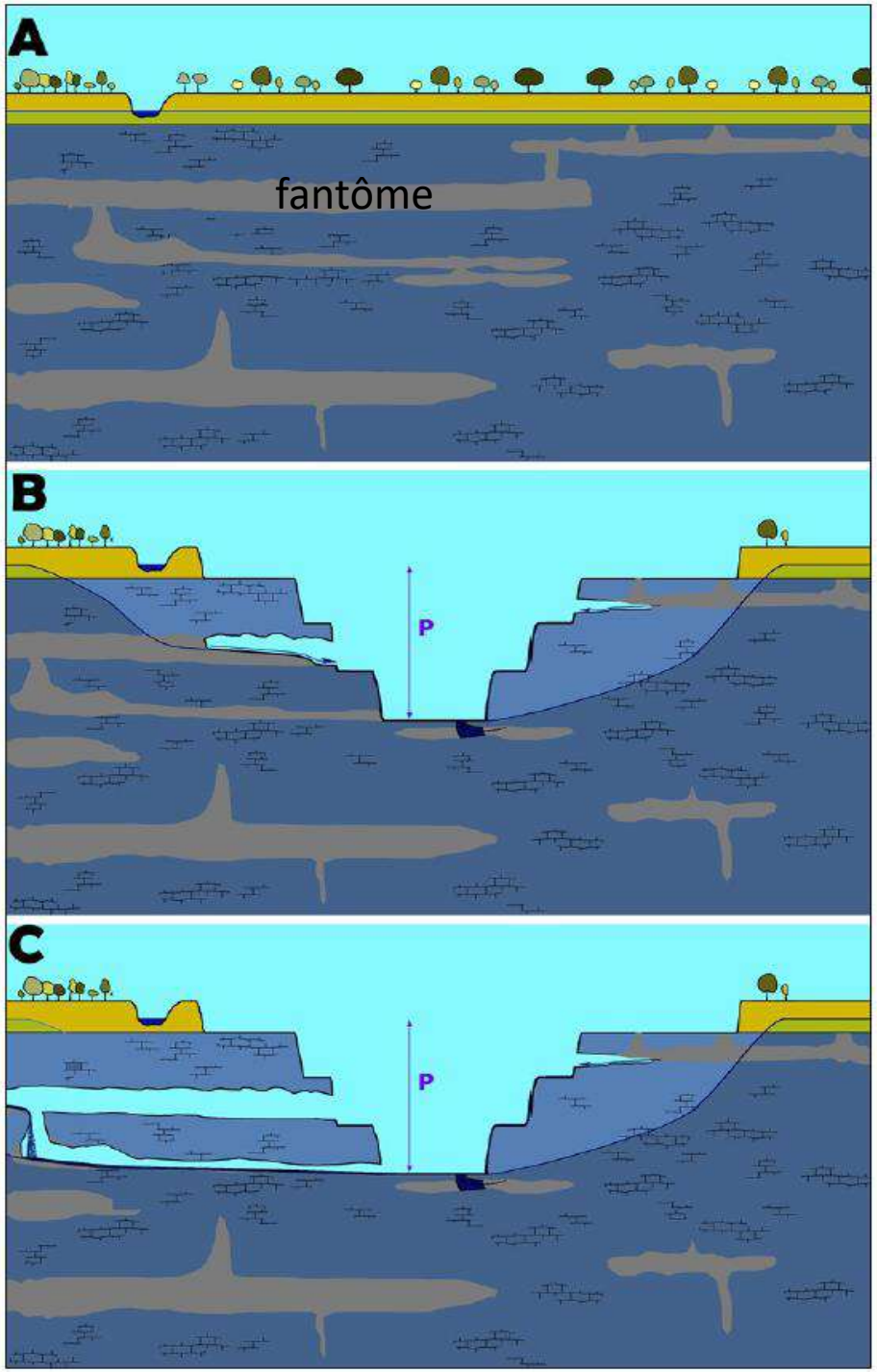
Fantômisation

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)



Quinif Y., Baele J.M., Dubois C., Havron C., Kaufmann O., Vergari A. (2014) Fantômisation : un nouveau paradigme entre la théorie des deux phases de Davis et la théorie de la biorhexistasie d'Erhart. Geologica Belgica, 17/1 :66-74

VER Volume Elémentaire 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.

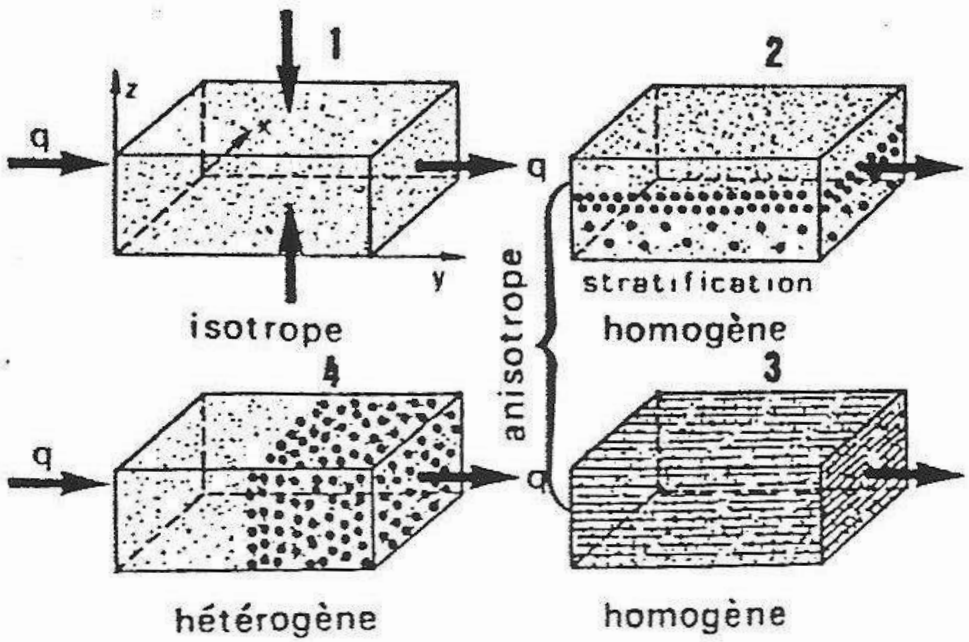
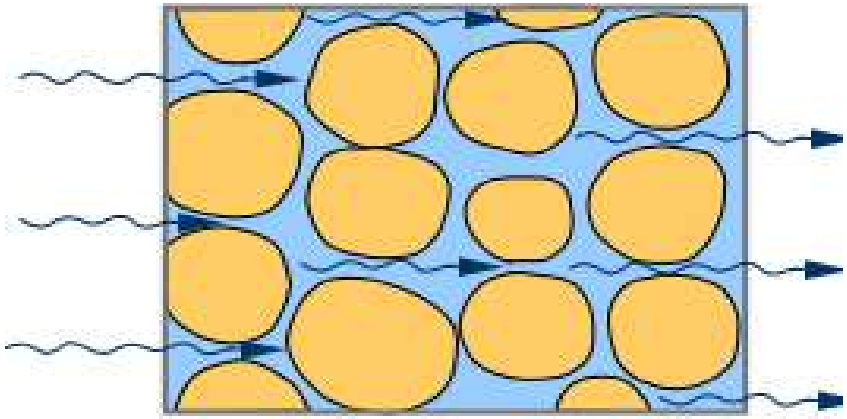
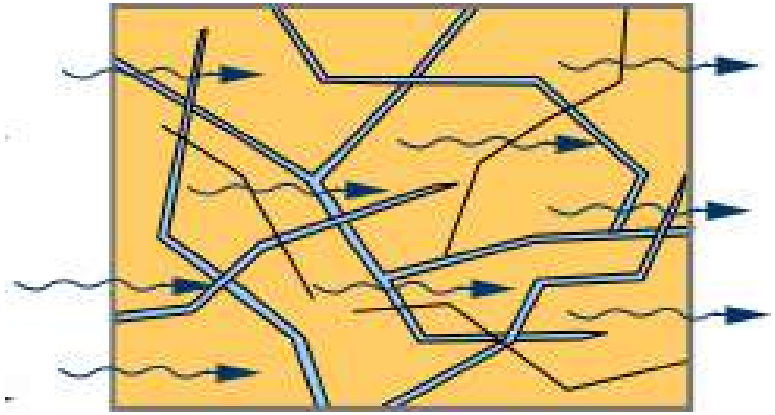


Figure 37 - Isotropie (1) et anisotropie (2, 3, 4). Homogénéité (2 et 3) et hétérogénéité (4).

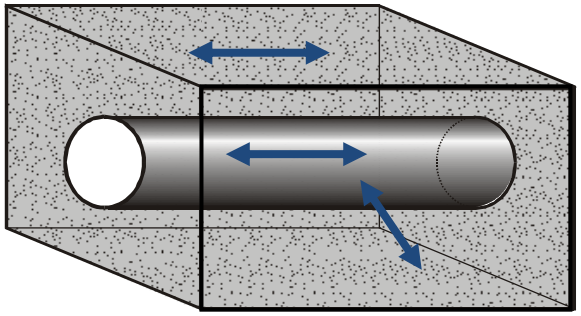
Les grands types d'aquifères



Milieu poreux

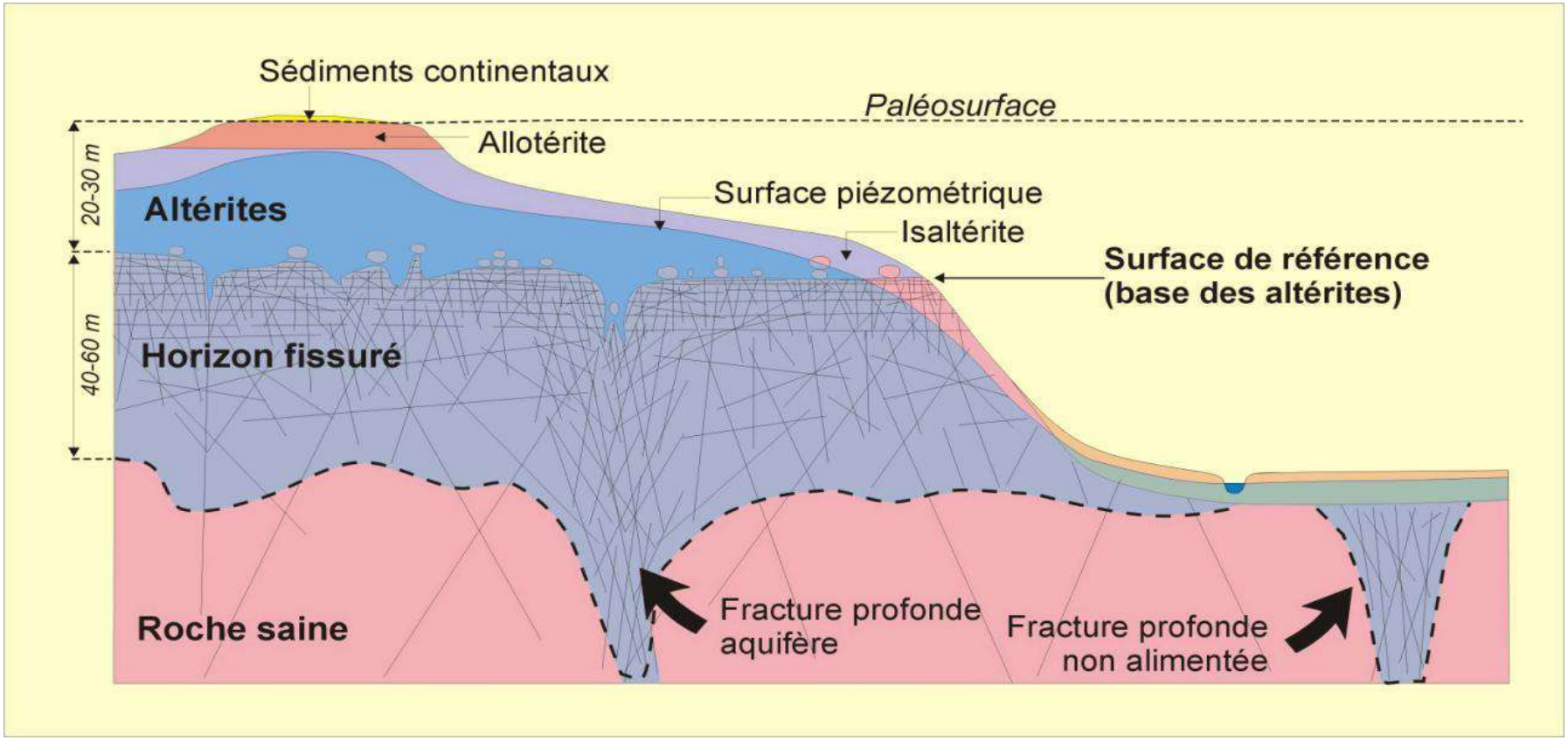


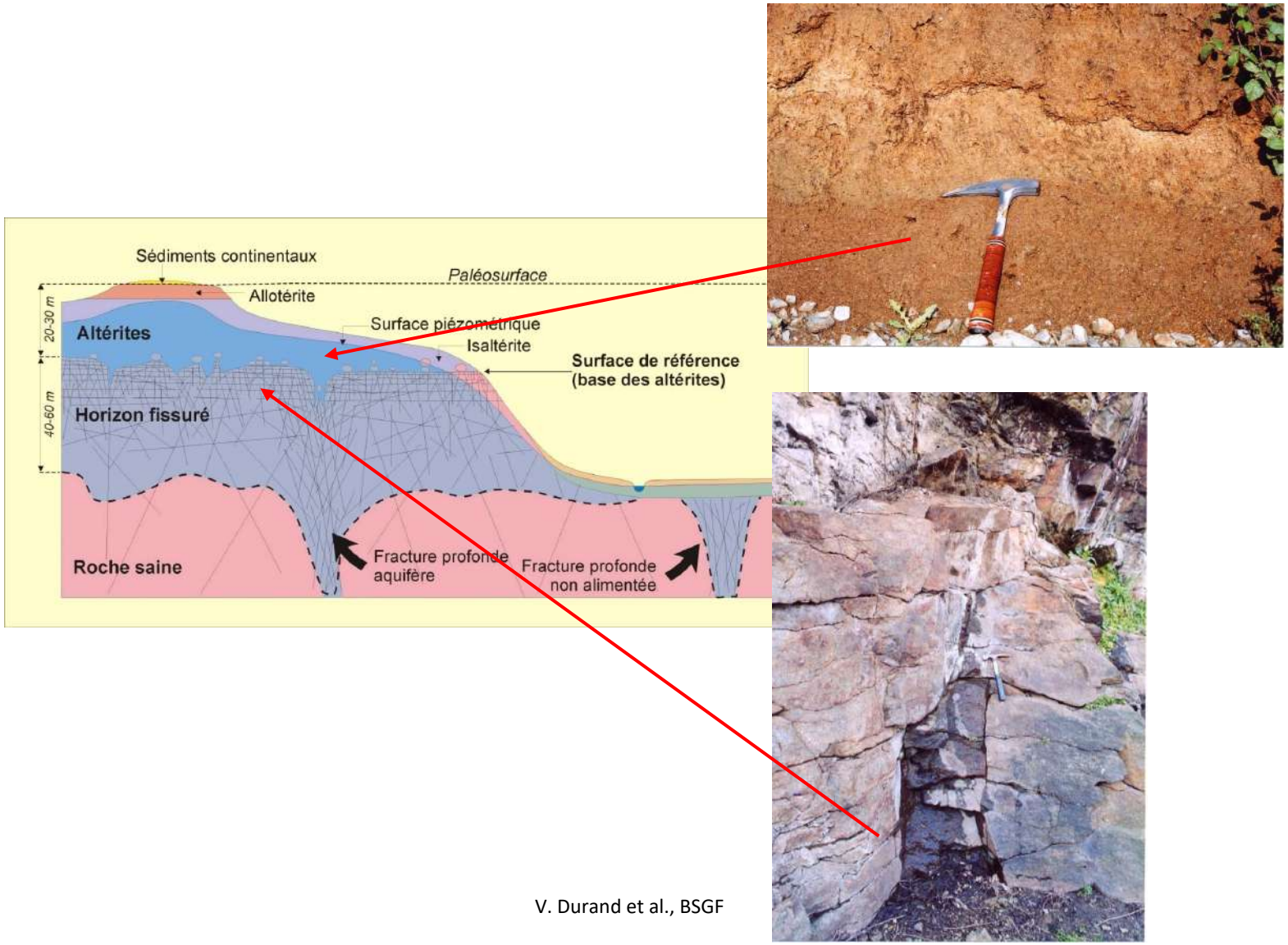
Milieu fracturé



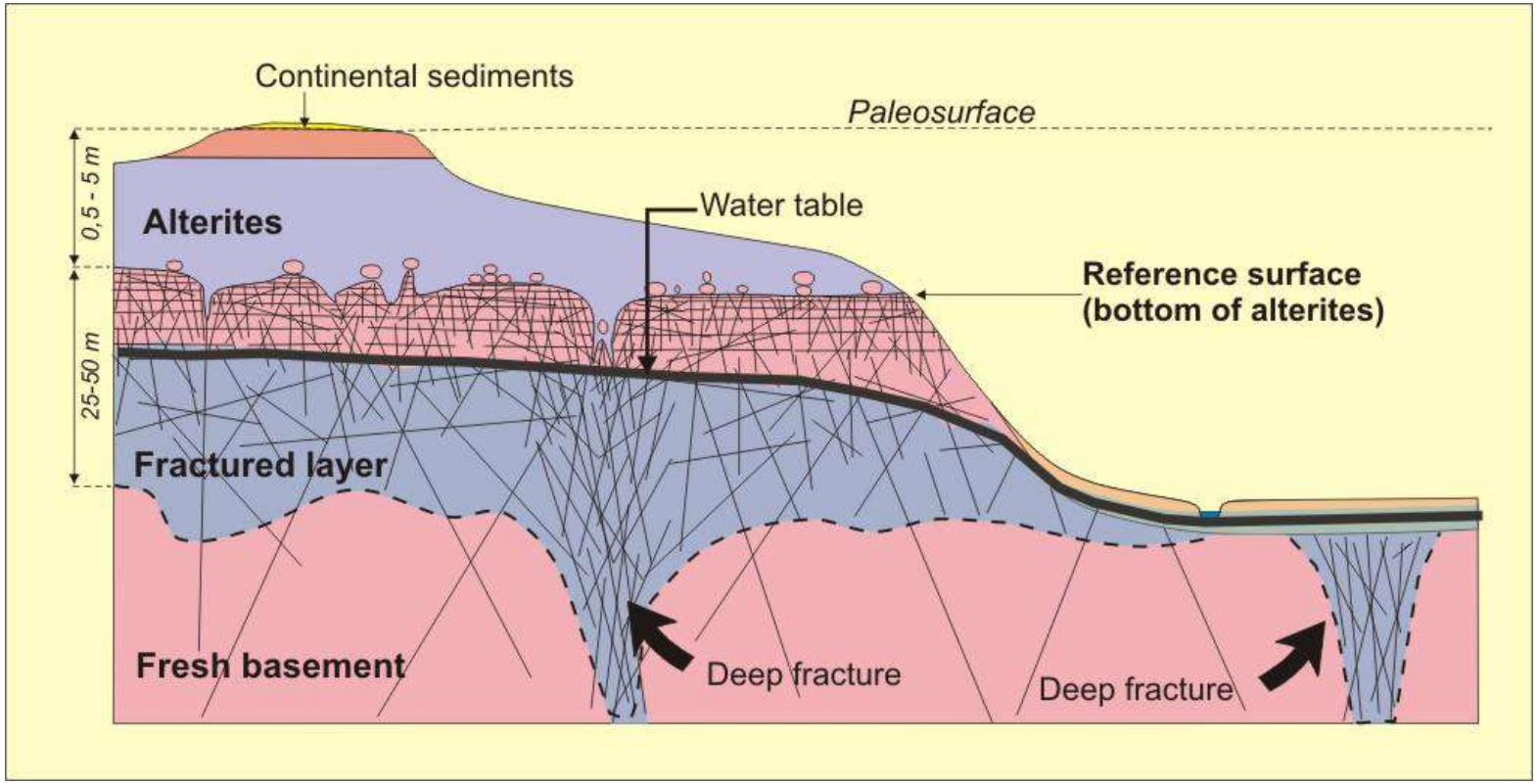
Milieu karstique

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



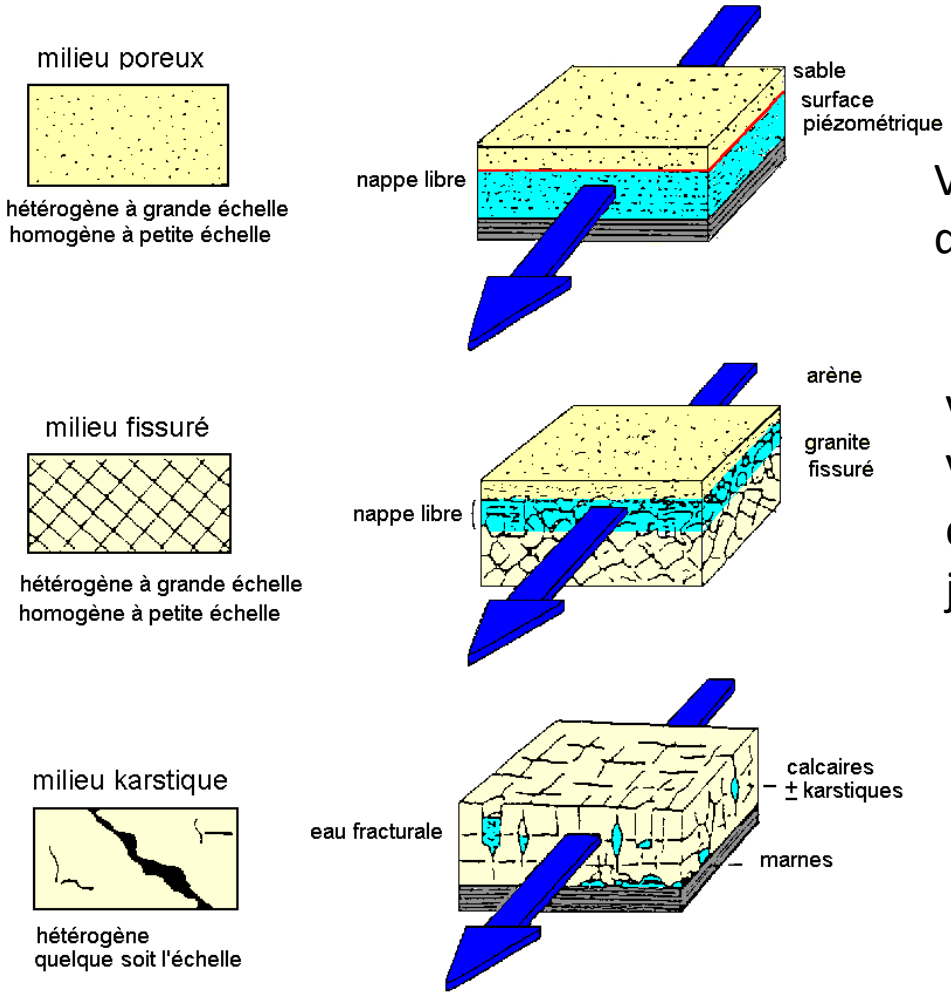


V. Durand et al., BSGF



http://jcmarechal.unblog.fr/category/vertical-anisotropy-of-permeability/

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



V = quelques centaines de mètres par an

Vmatrice = poreux
Vfissures = quelques dizaines de mètres par jour

Vmatrice = poreux
Vkarst = jusqu'à plusieurs kilomètres par jour

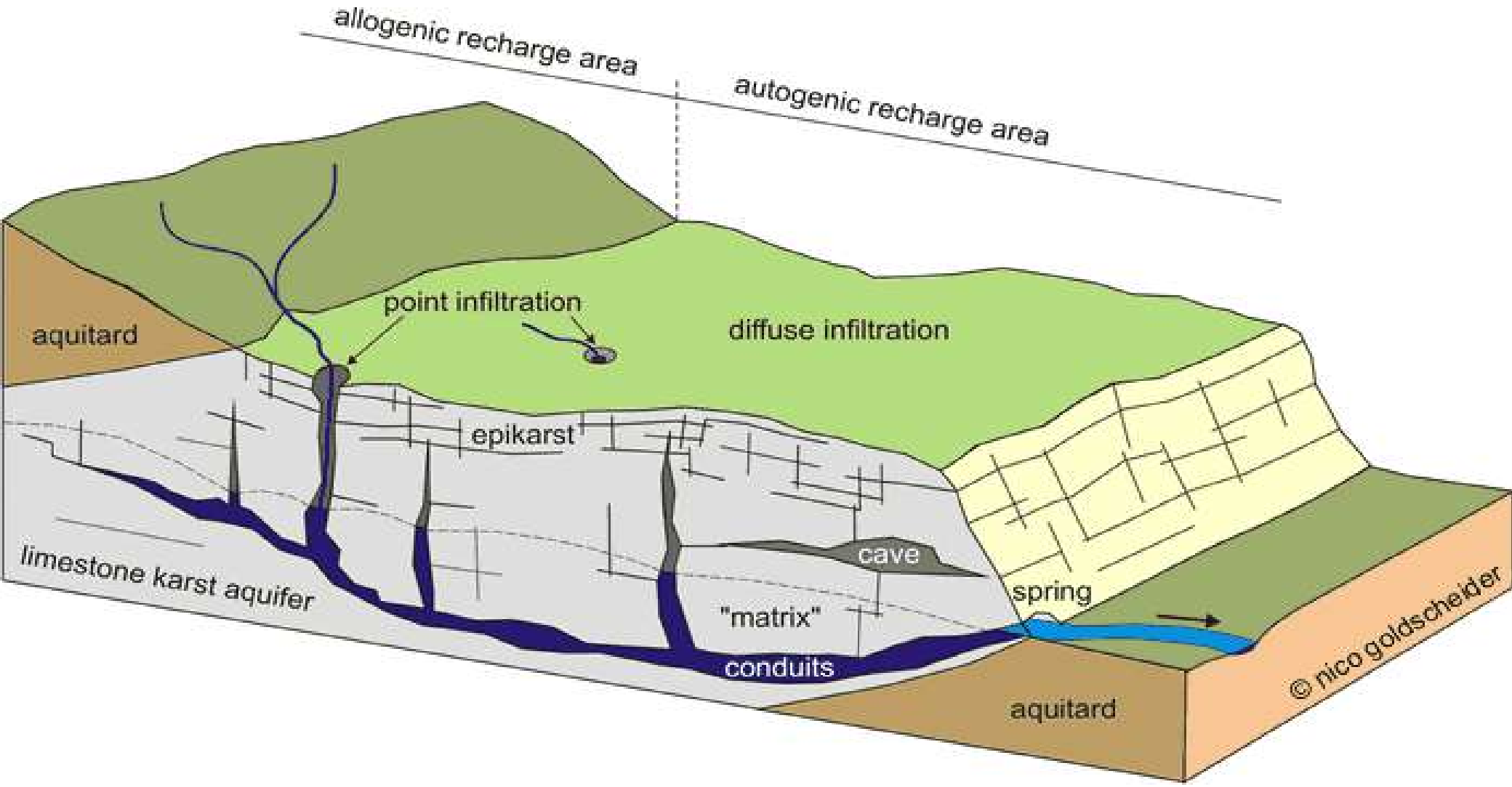
Figure 7-16A: Hétérogénéité des aquifères et vitesse d'écoulement (adapté de DROGUE in GUILLEMIN et ROUX).

modifié d'après http://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours.qge/du-7.htm

L'aquifère karstique

Recharge allochtone

Recharge autochtone



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

photo P. Maurel et T. Lamarque

Le lien matrice-conduit en aquifère karstique

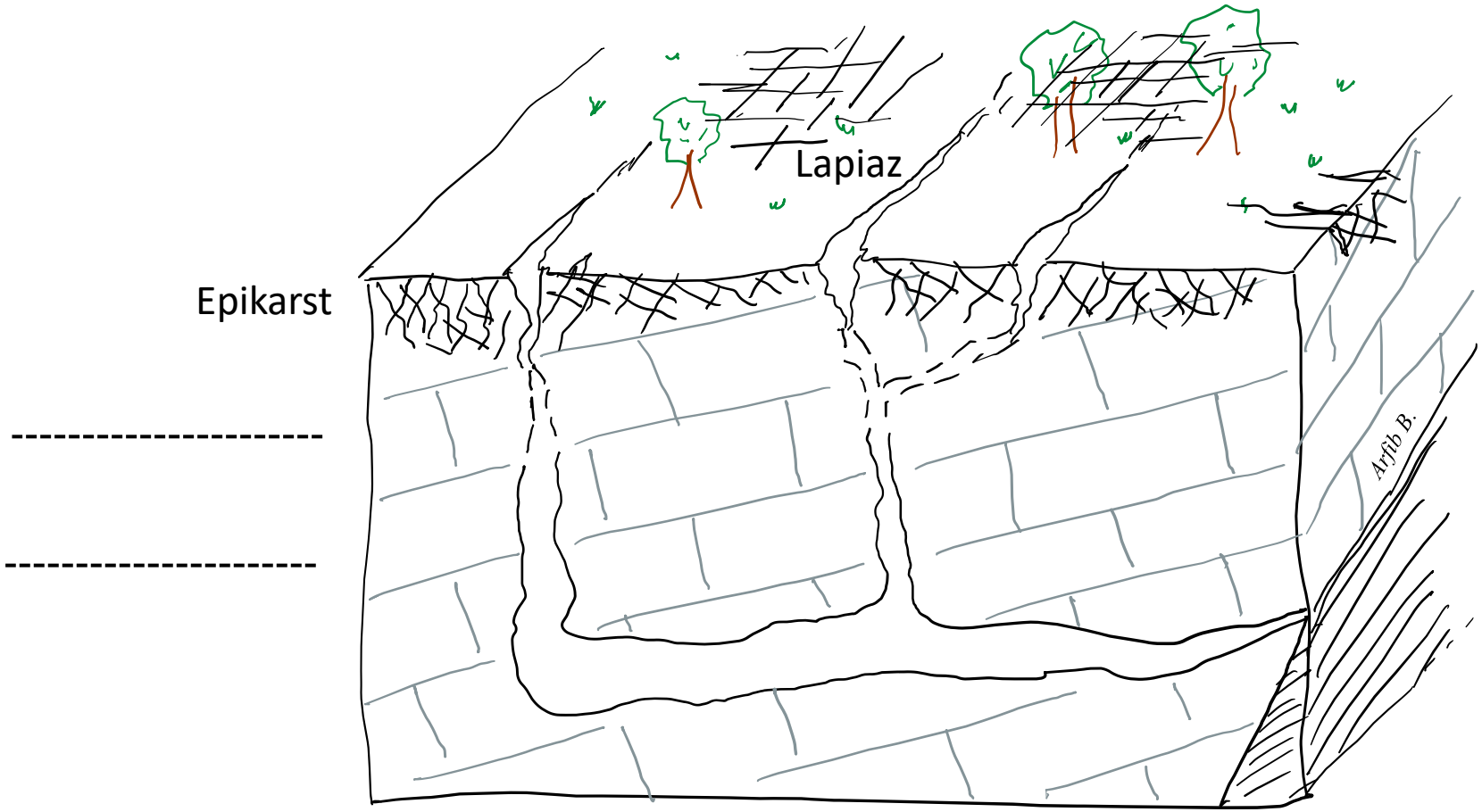
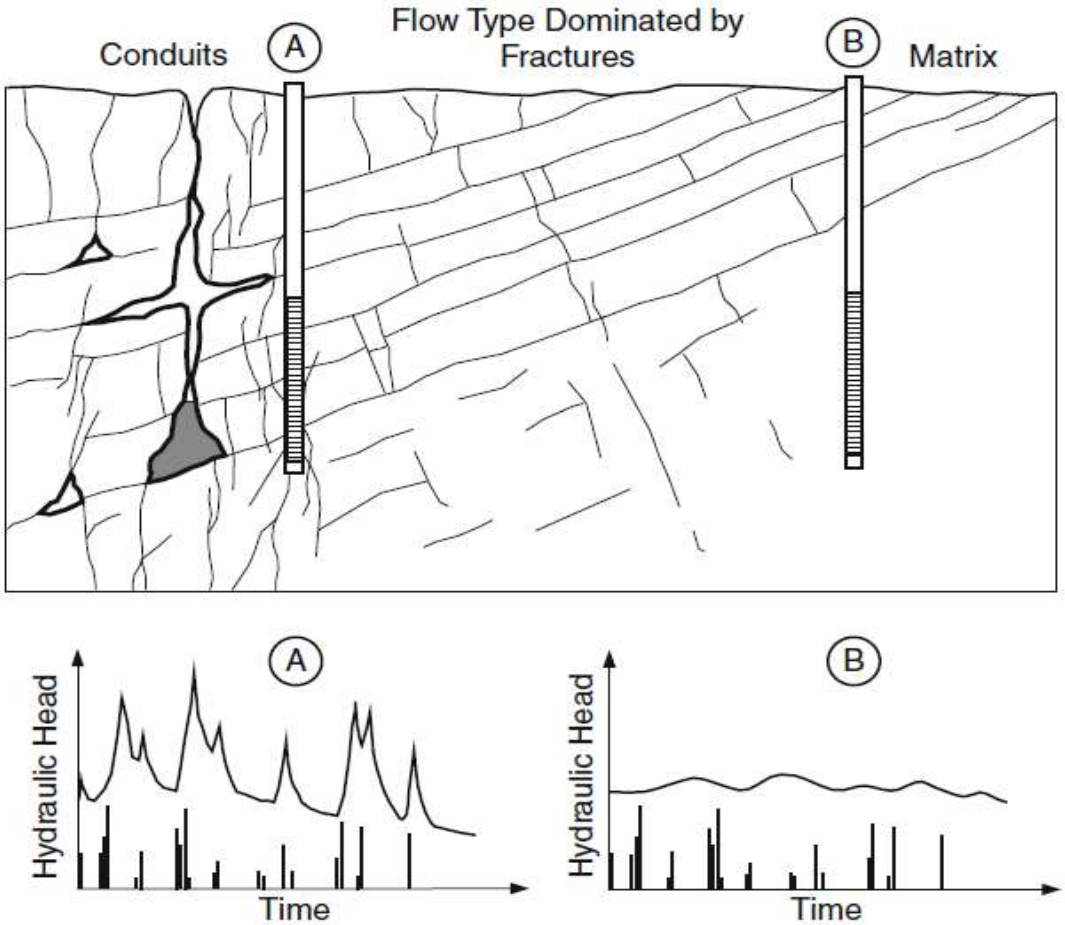


Table 5.11 Principal differences between single-, double- and triple-porosity aquifers. Most karst aquifers have triple-porosity characteristics Reproduced from Worthington, S. R. H., and Ford, D. C., Chemical hydrogeology of the carbonate bedrock at Smithville. Smithville Phase IV Bedrock Remediation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

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

Extrait de Ford and William, Karst Hydrogeology and Geomorphology, 2007

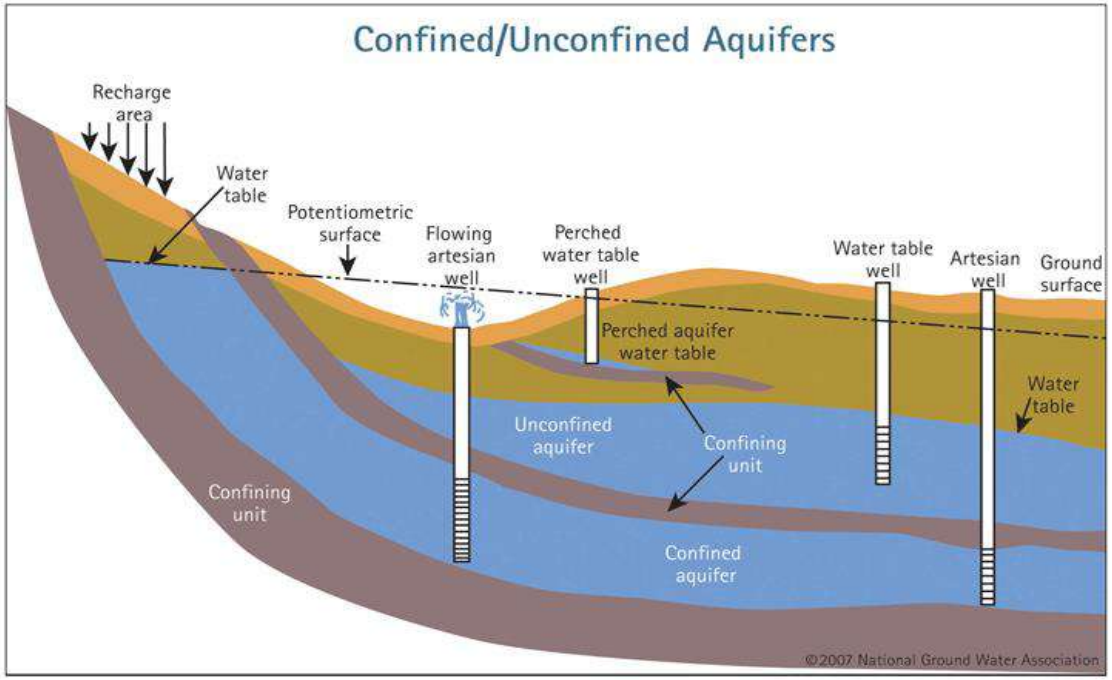
Variations de niveaux d'eau en fonction des connexions sur des zones très transmissives



Extrait de Kresic et Stevanovic, Groundwater hydrology of springs, 2010

FIGURE 5–48 Dependence of the hydraulic head measured in monitoring wells on different types of effective porosity (specific yield) in karst aquifers: A, rapid rise of the hydraulic head after major recharge events in portions of the aquifer with large conduits and no significant storage in the matrix; B, delayed and dampened response of aquifer matrix. Flow dominated by fractures may include any combination of these two extremes. (From Kresic, 2007a; copyright Francis & Taylor, reprinted with permission.)

	Milieu		
	Poreux	Fissuré	Karstique
Représentation schématique			
Origine de la porosité et de la perméabilité			
Perméabilité			
Structure			
Moyens d’étude			
Particularités			



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.

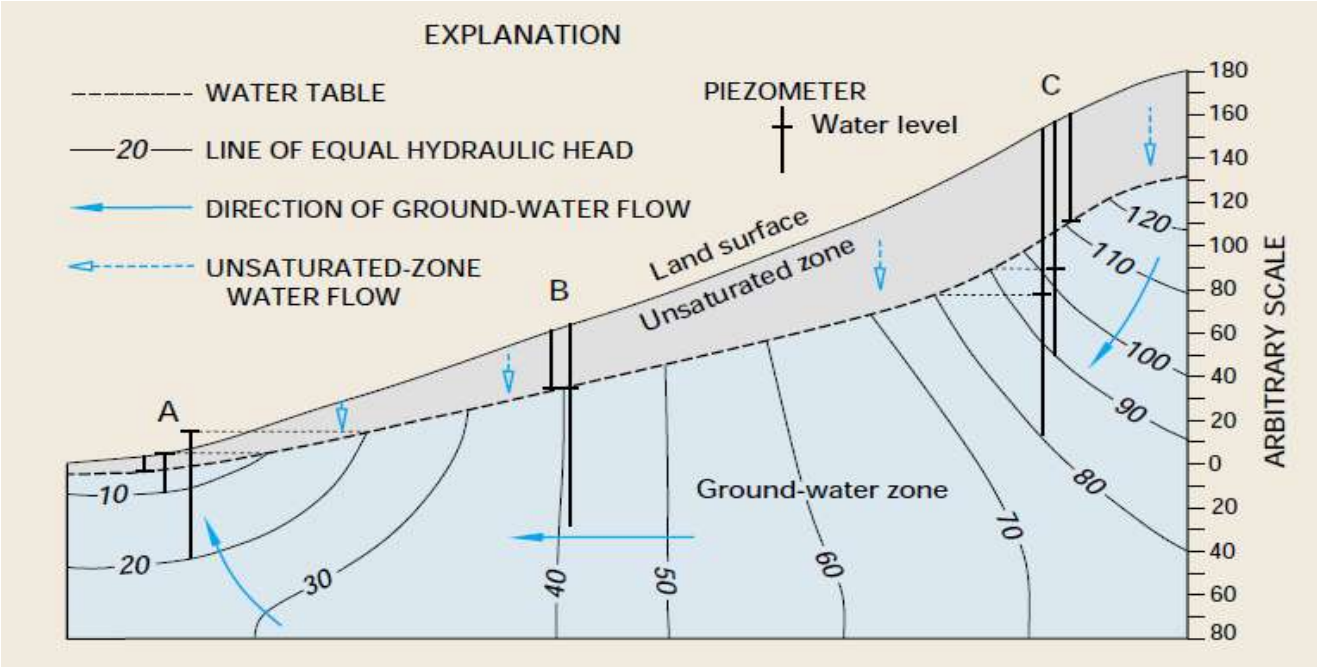
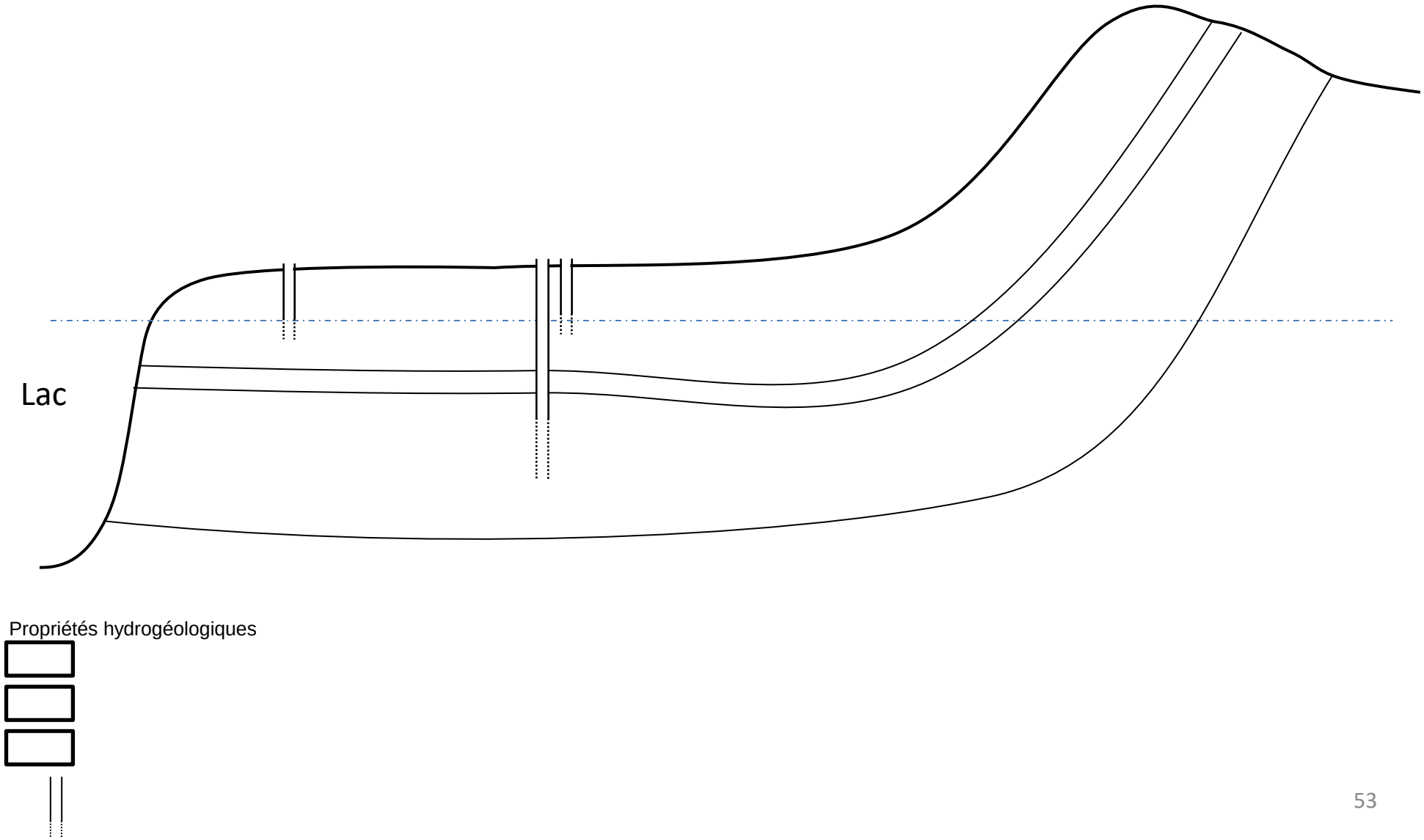
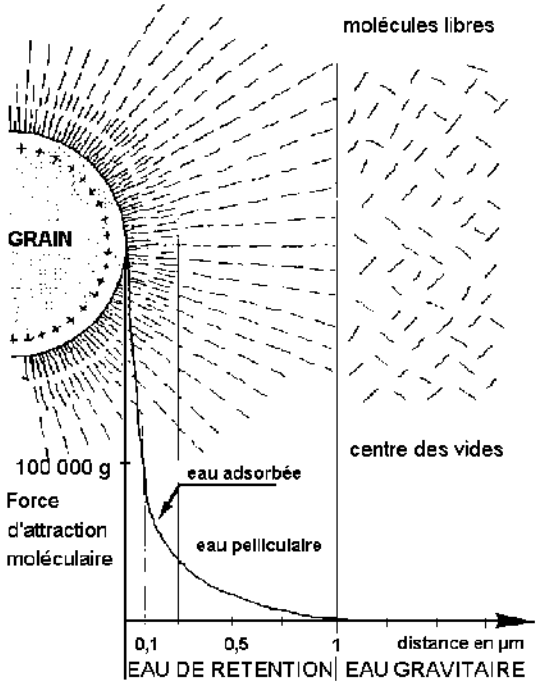
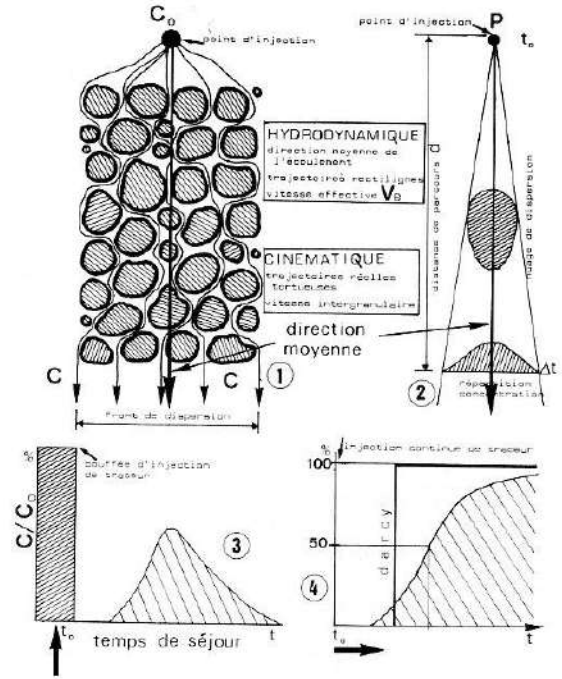


Figure A–3. If the distribution of hydraulic head in vertical section is known from nested piezometer data, zones of downward, lateral, and upward components of ground-water flow can be determined.

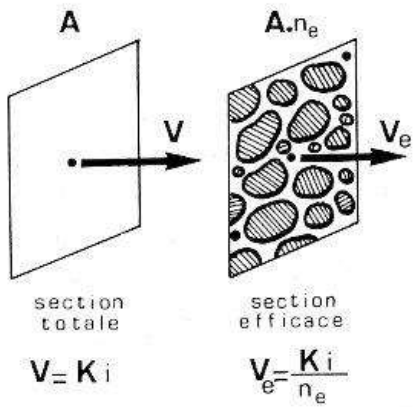
Coupe schématique de synthèse des différents types de nappes à l'échelle d'un bassin versant, et les particularités hydrogéologiques associées




molécules libres
GRAIN
centre des vides
100 000 g
Force
d'attraction
moléculaire
eau adsorbée
eau pelliculaire
0,1
0,5
1
distance en µm
EAU DE RETENTION
EAU GRAVITAIRE


C0
point d'injection
P
HYDRODYNAMIQUE
direction moyenne de l'écoulement
trajectoires rectilignes
vitesse effective VB
CINEMATIQUE
trajectoires réelles tortueuses
vitesse intergranulaire
direction moyenne
C
C
1
2
Δt
C/C0
3
temps de séjour
t
100
50
4
t

Castany


A
A.ne
V
Ve
section totale
section efficace
V= K i
Ve= K i / ne

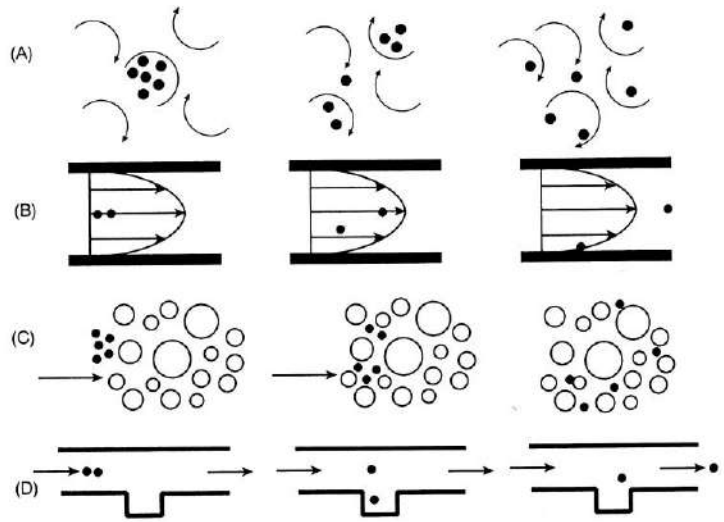
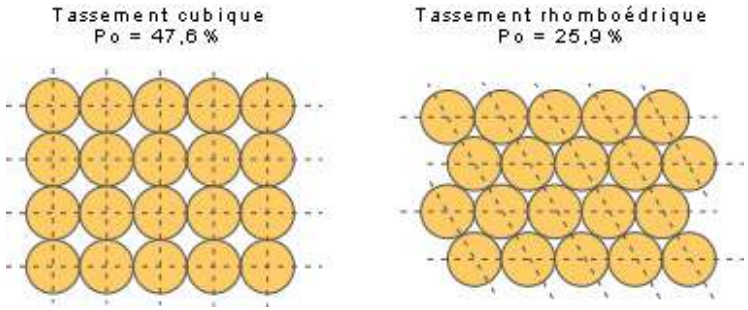

(A)
(B)
(C)
(D)

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



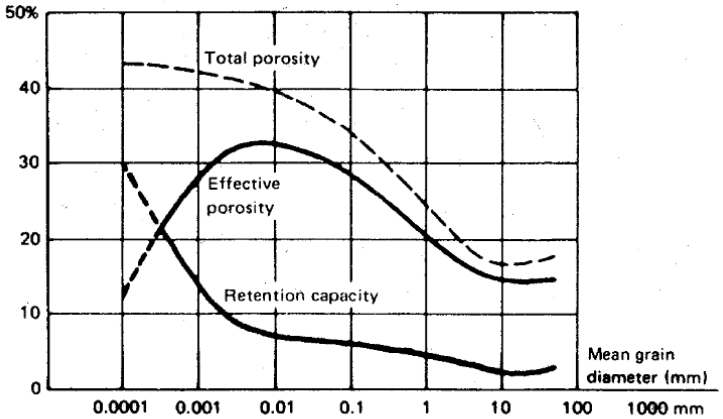


Figure 1.16 Composantes de la porosité en fonction de la granulométrie (de Marsily, 1986)

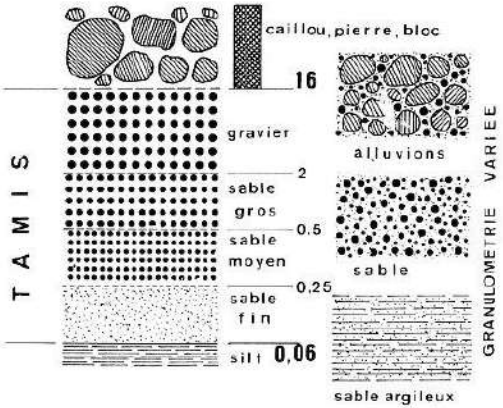


Figure 34 - Classification granulométrique.

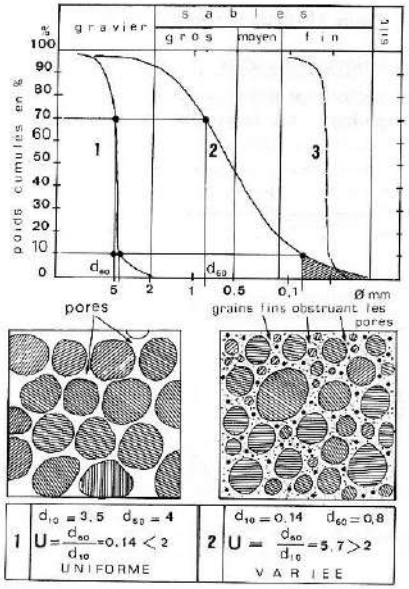
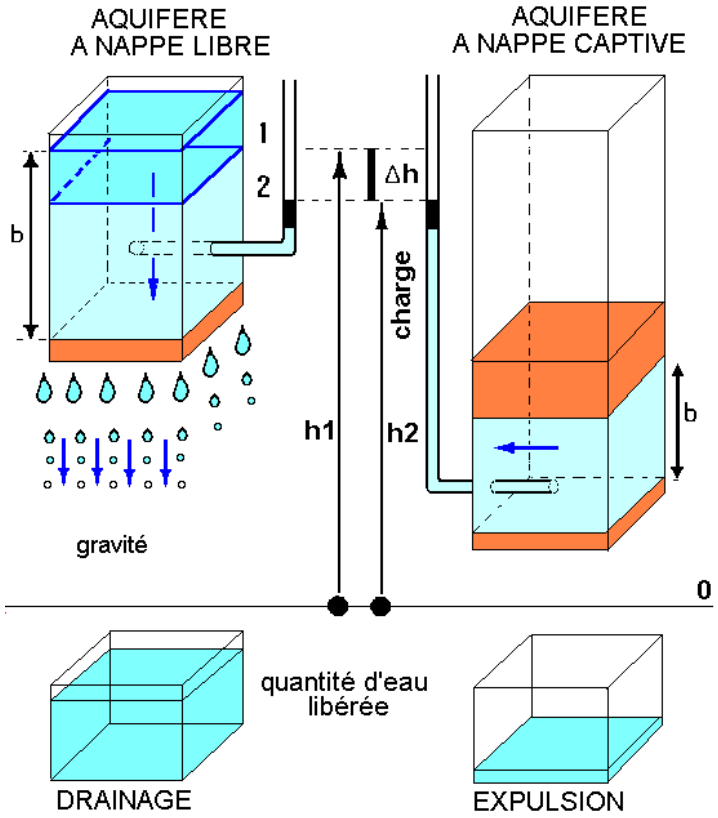


Figure 36 - Qualification d'un matériau meuble par sa granulométrie. Position et pente de la courbe granulométrique. Granulométrie uniforme et variée. Signification du diamètre efficace d_{10}.
1, gravier à granulométrie uniforme ; 2, gravier sableux à granulométrie variée ; 3, sable fin à granulométrie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

Coefficient d'emmagasinement et porosité de drainage



Coefficient de perméabilité ou conductivité hydraulique

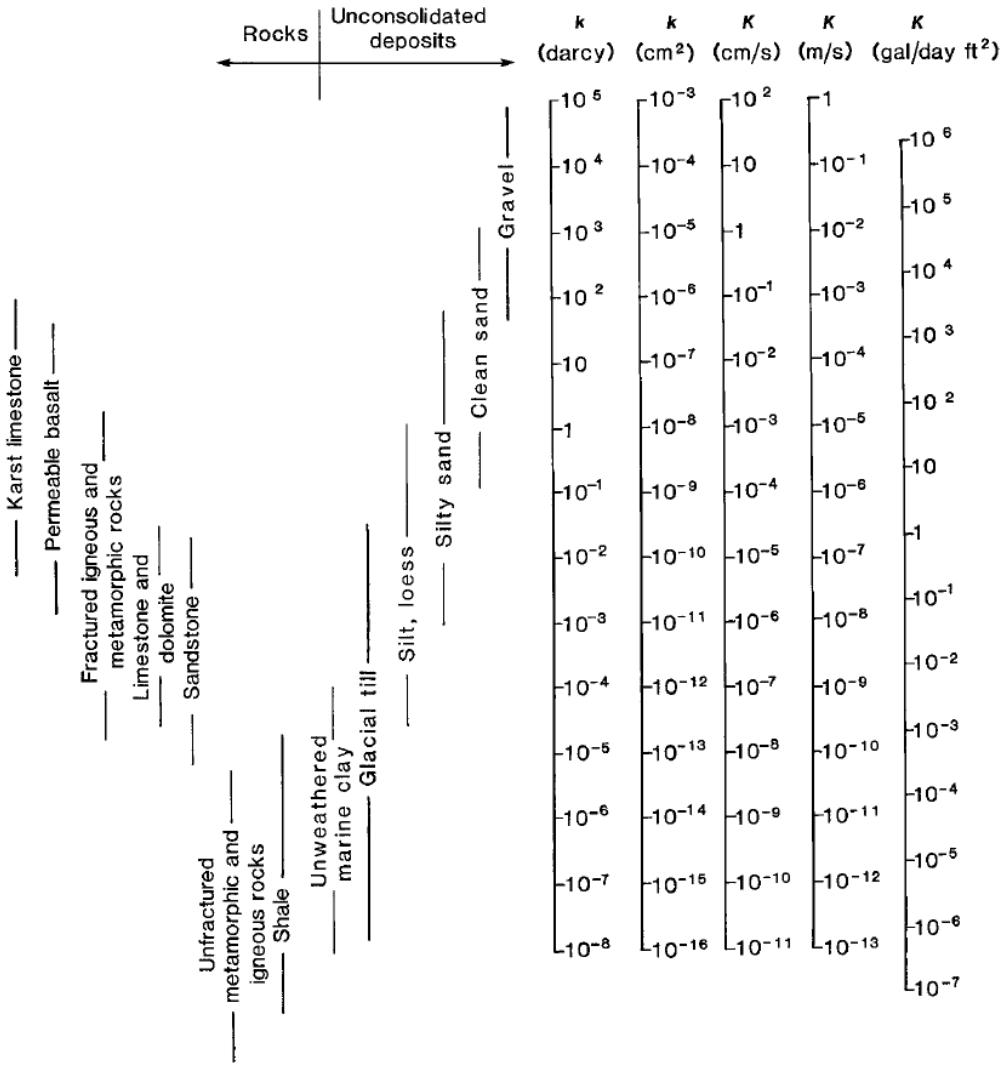


Figure 5.8 Range of values of hydraulic conductivity and permeability. Reproduced from Freeze, R.A. and J.A. Cherry, Groundwater, p. 604 © 1979 Prentice Hall.

https://www.u-picardie.fr/~beaucham/cours.qge/du-7.htm
modifié d'après Castany

Extrait de Ford and William, Karst Hydrogeology and Geomorphology, 2007

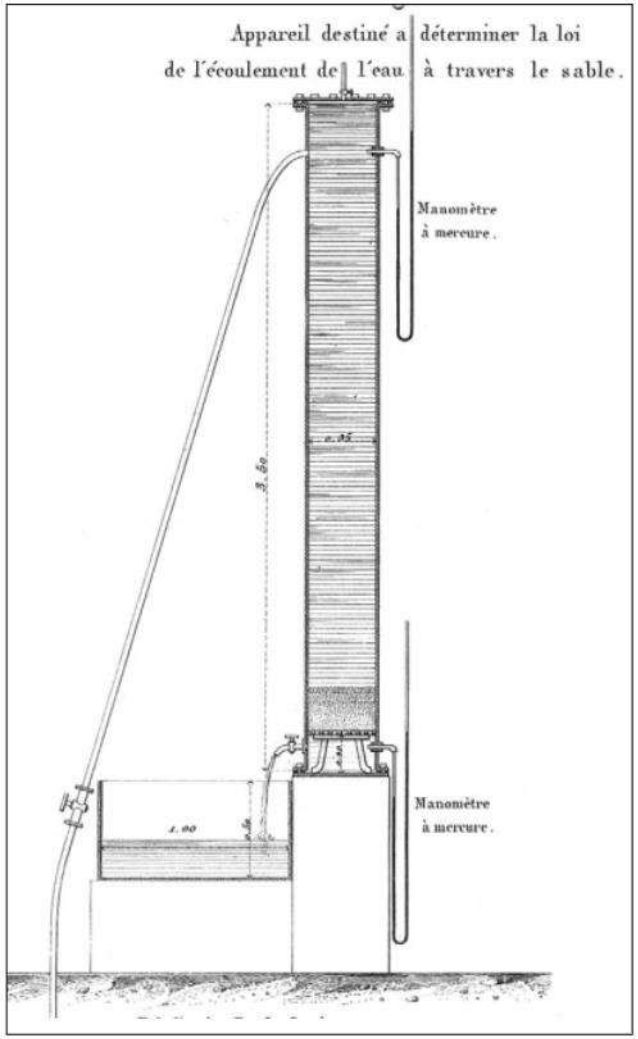
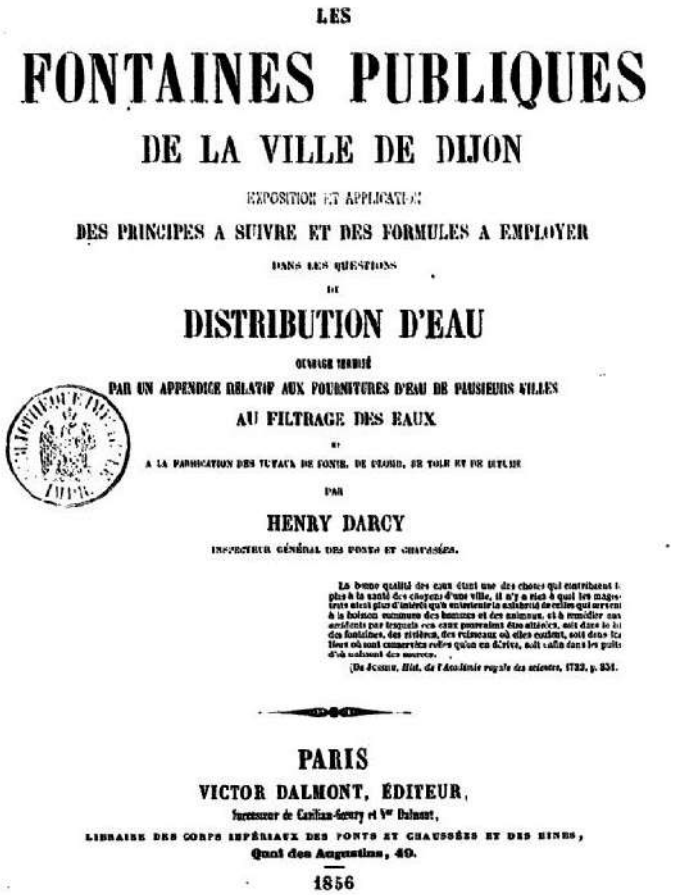


Figure 4. Darcy's original sand column apparatus (Darcy 1856, Plate 24, Figure 3).

Henry Darcy (1803-1858)



LES

FONTAINES PUBLIQUES

DE LA VILLE DE DIJON

EXPOSITION ET APPLICATION

DES PRINCIPES A SUIVRE ET DES FORMULES A EMPLOYER

DANS LES QUESTIONS

DE

DISTRIBUTION D'EAU

OUVRAGE TERMINÉ

PAR UN APPENDICE RELATIF AUX FOURNITURES D'EAU DE PLUSIEURS VILLES

AU FILTRAGE DES EAUX

ET

A LA FABRICATION DES TUYAUX DE FONTE, DE PLOMB, DE TOLE ET DE BITUME

PAR

HENRY DARCY

INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES.

La bonne qualité des eaux étant une des choses qui contribuent le plus à la santé des citoyens d'une ville, il n'y a rien à quoi les magistrats aient plus d'intérêt qu'à entretenir la salubrité de celles qui servent à la boisson, aux usages des hommes et des animaux, et à remédier aux accidents par lesquels ces eaux pouvaient être altérées, soit dans les lieux des fontaines, des réservoirs, des ruisseaux où elles coulent, soit dans les lieux où elles sont conservées, soit enfin dans les puits d'où on tire des sources.

(De Jussieu, Hist. de l'Académie royale des sciences, 1722, p. 351.

PARIS

VICTOR DALMONT, ÉDITEUR,

Successeur de Carilian-Goeury et Vve Dalmont,

LIBRAIRE DES CORPS IMPÉRIAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES,

Quai des Augustins, 49.

1856

https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k624312/f655.item#

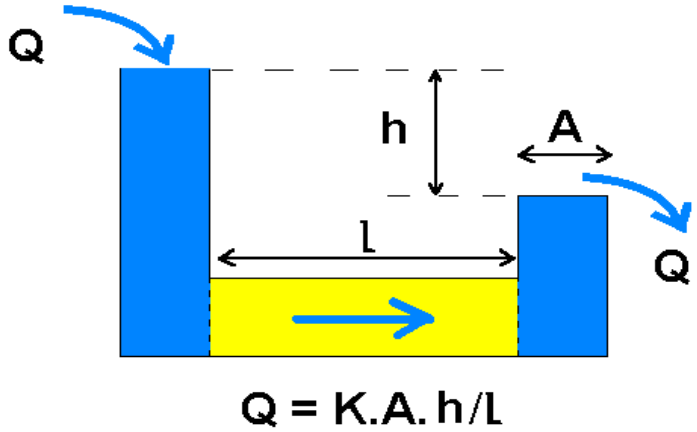
Ecoulement dans un aquifère : modèle simple

Loi de Darcy $$Q = K \,.\, A \,.\, \frac{\Delta h}{L}$$

K : coefficient de perméabilité (m/s)
T : transmissivité (m²/s)
e : épaisseur mouillée
T = K . e

* Expérience de Darcy à charge constante

* Similitude avec le milieu naturel



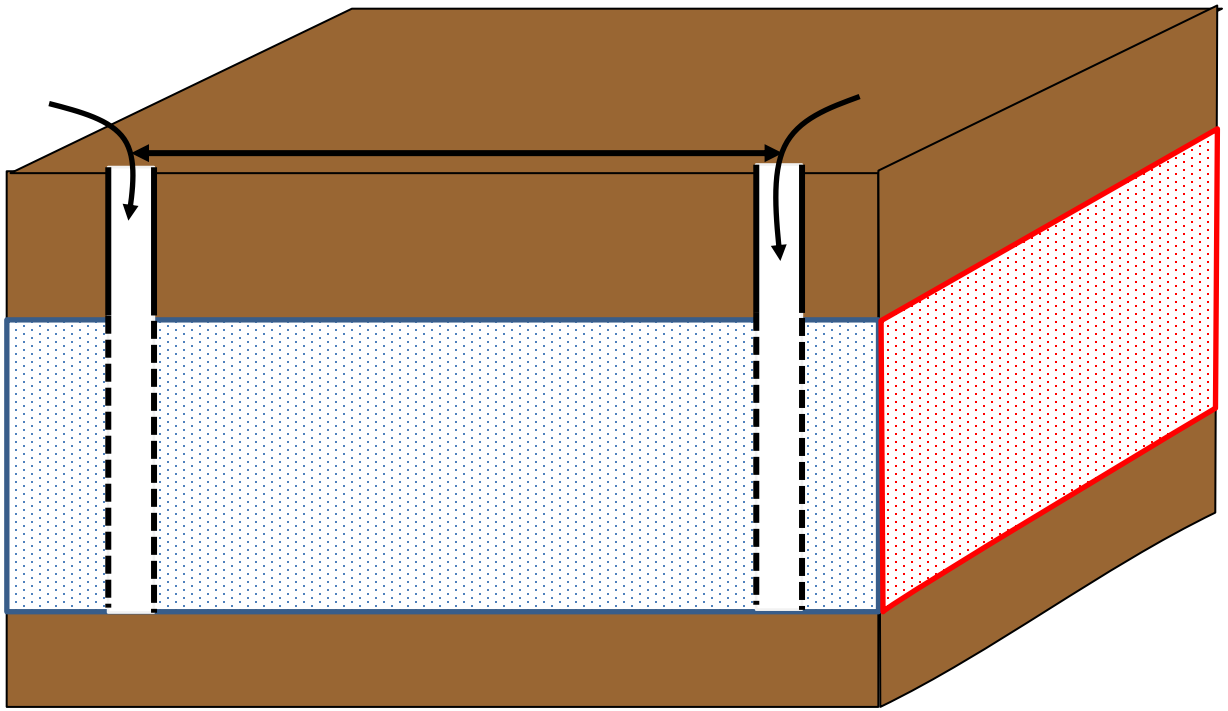
https://www.u-picardie.fr/~beaucham/cours.qge/du-7.htm

5.4.2- La Loi de Darcy en milieu naturel

Écoulement dans un aquifère : modèle simple pour un aquifère homogène isotrope

Loi de Darcy $$Q = K \,.A.\, \frac{\Delta h}{L}$$

K : coefficient de perméabilité (m/s)
A : section perpendiculaire à l'écoulement (sur une ligne de courant)
i = $\frac{\Delta h}{L}$: gradient de charge hydraulique



Dessiner le schéma

Equation de la diffusivité

➔ équation de l'écoulement d'une nappe d'eau souterraine en <u>nappe libre</u>

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

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 :

$$\nabla^2 h=\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}=\frac{\omega_d}{T}\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{Q}{T} \qquad (5.1.4)$$

extrait de G. de Marsily, 1989

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 <u>nappe captive</u>

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

extrait de G. de Marsily, 1989

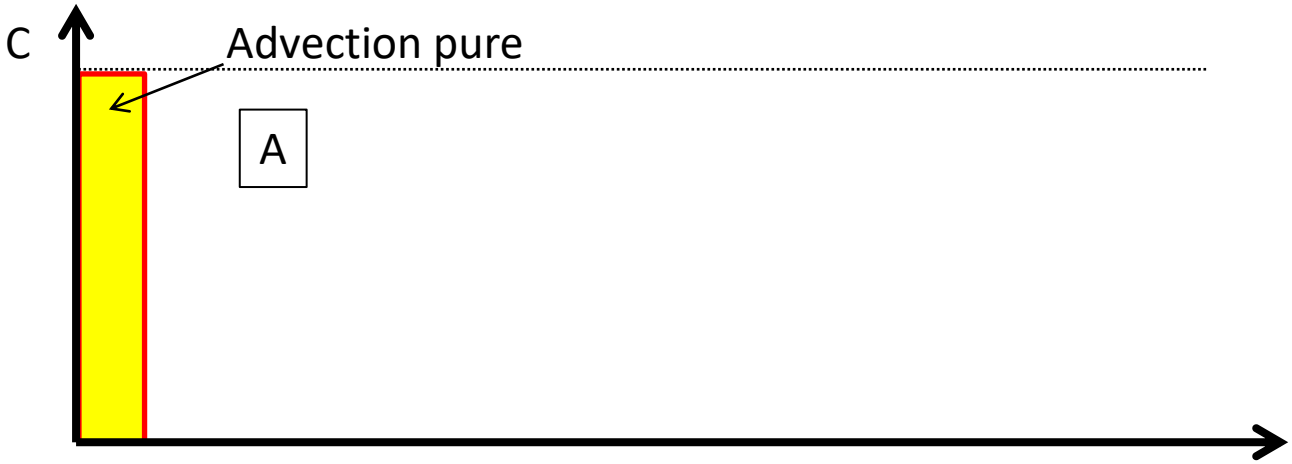
x, y, z : directions de l'espace
K : Tenseur du Coefficient de perméabilité
div : divergent (notation mathématique représentant la variation dans les différentes directions de l'espace)
grad : gradient
S: coefficient d'emmagasinement (-)
Ss: coefficient d'emmagasinement spécifique (Ss = S / e)
q, Q : terme source
h, t : niveau d'eau et temps (variables)

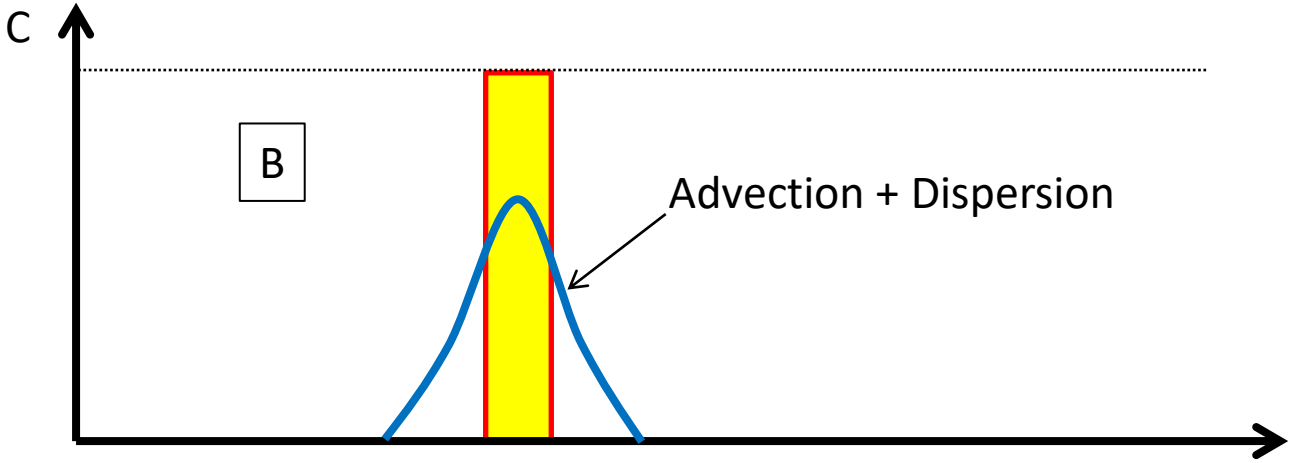
T/S = diffusivité de l'aquifère

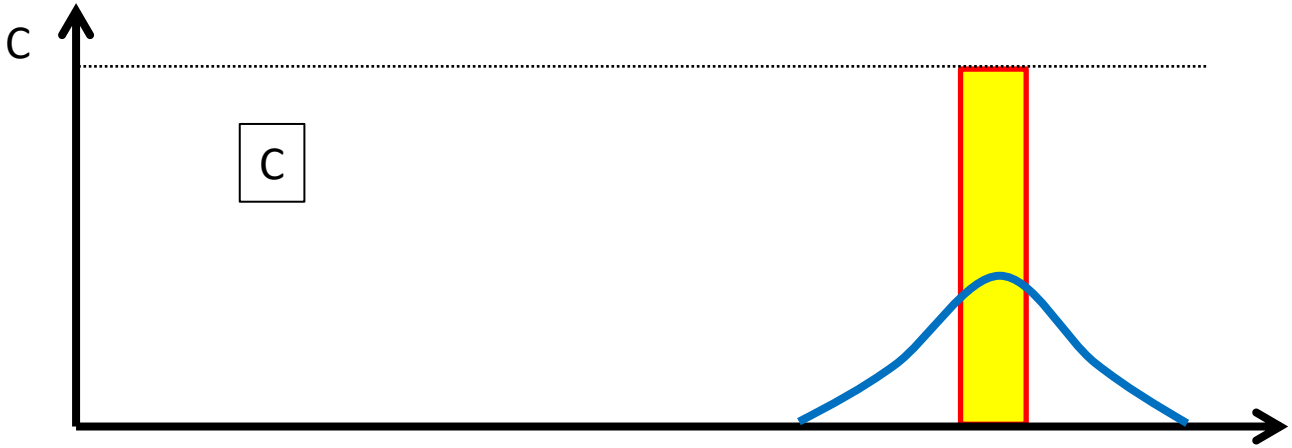
En simplifiant, pour e = constant, transmissivité (T=K.e) est constante, et une transmissivité isotrope et constante :

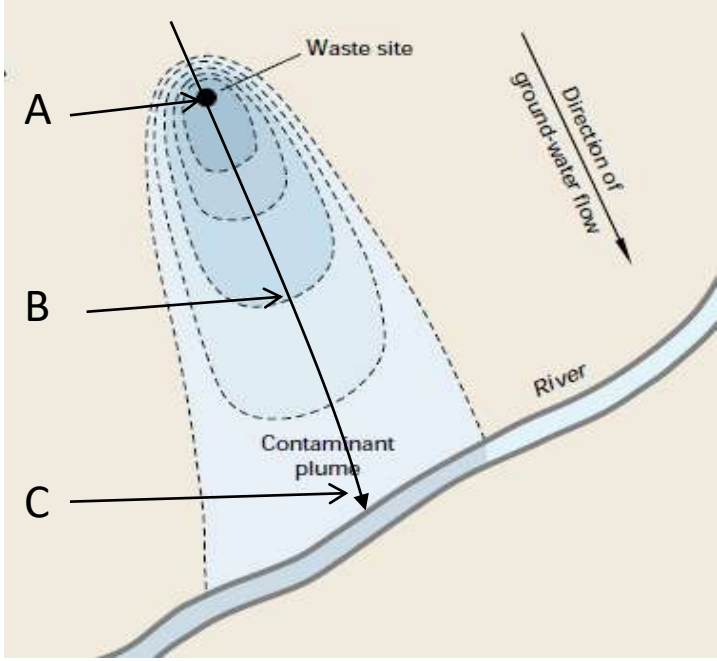
$$\boxed{\mathrm{div}\,(\overline{\overline{T}}\ \mathrm{grad}\ h) = S \frac{\partial h}{\partial t} + Q}$$

extrait de G. de Marsily, 1989









Temps depuis l'injection du soluté polluant

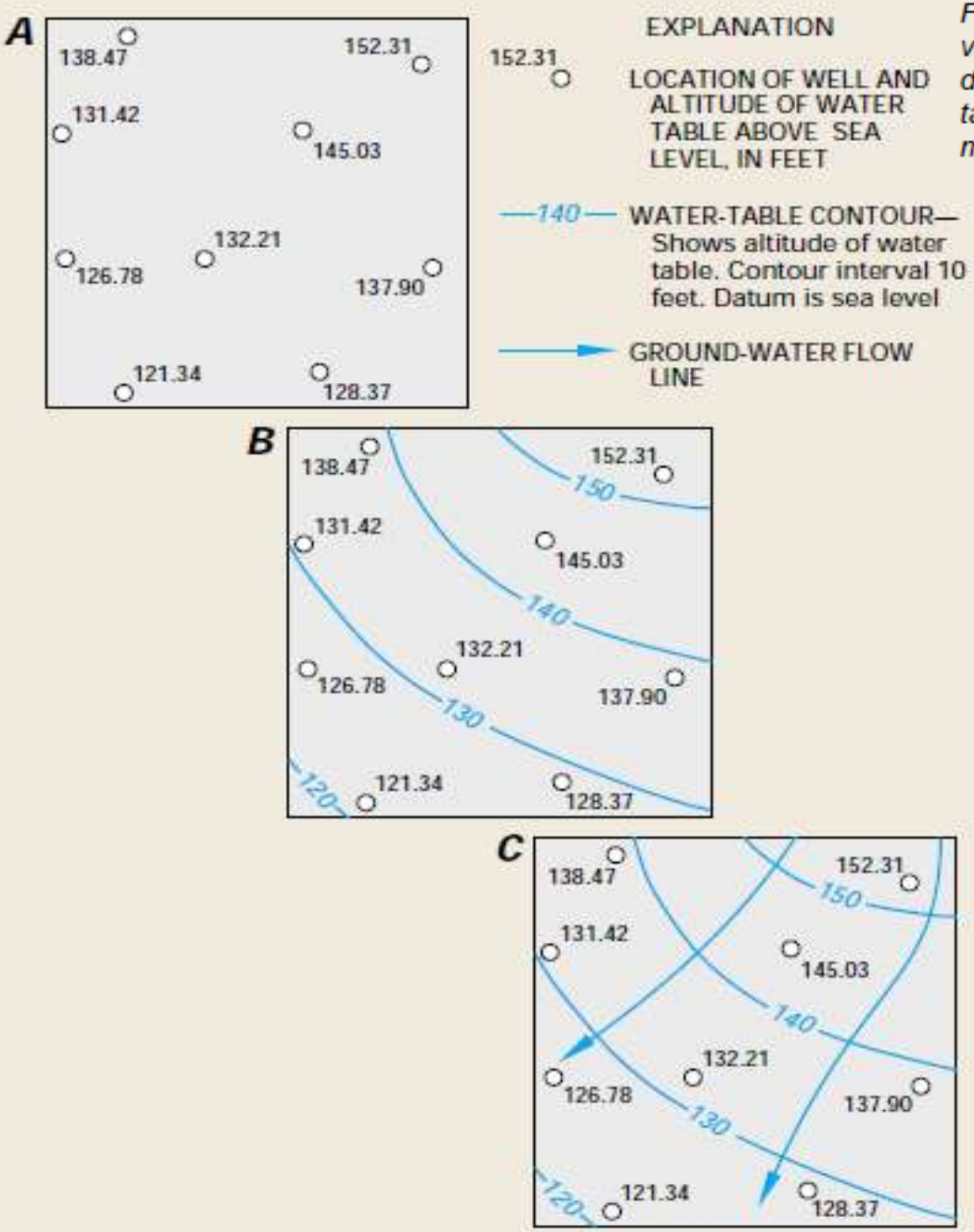
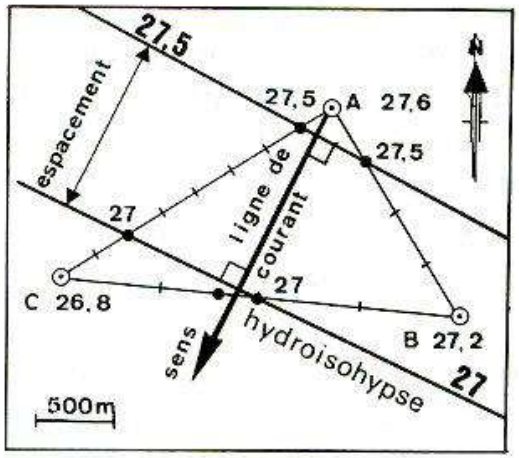


Figure A–2. Using known altitudes of the water table at individual wells (A), contour maps of the water-table surface can be drawn (B), and directions of ground-water flow along the water table can be determined (C) because flow usually is approximately perpendicular to the contours.

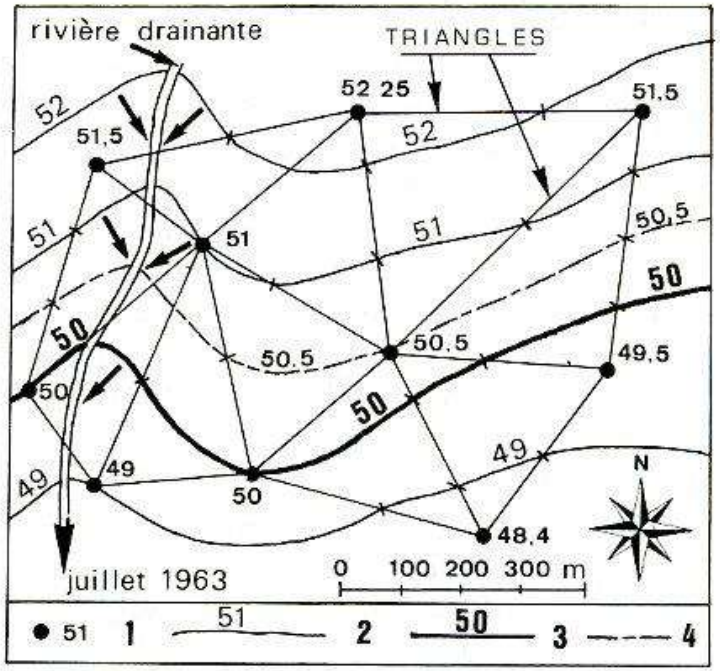
Winter T.C., Harvey J.W., Franke O.L. (1998) - Ground Water and Surface Water A Single Resource. U.S. Geological Survey Circular 1139, Denver, Colorado.

Tracé des courbes hydro-isohypses

Interpolation linéaire

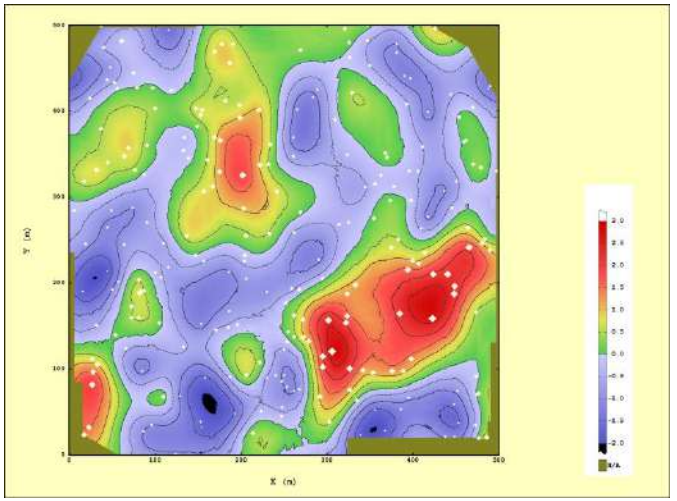


Castany



Interpolation par méthode géostatistique

Le **krigeage** est, en géostatistique, la méthode d'estimation linéaire garantissant le minimum de variance. Le krigeage 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)



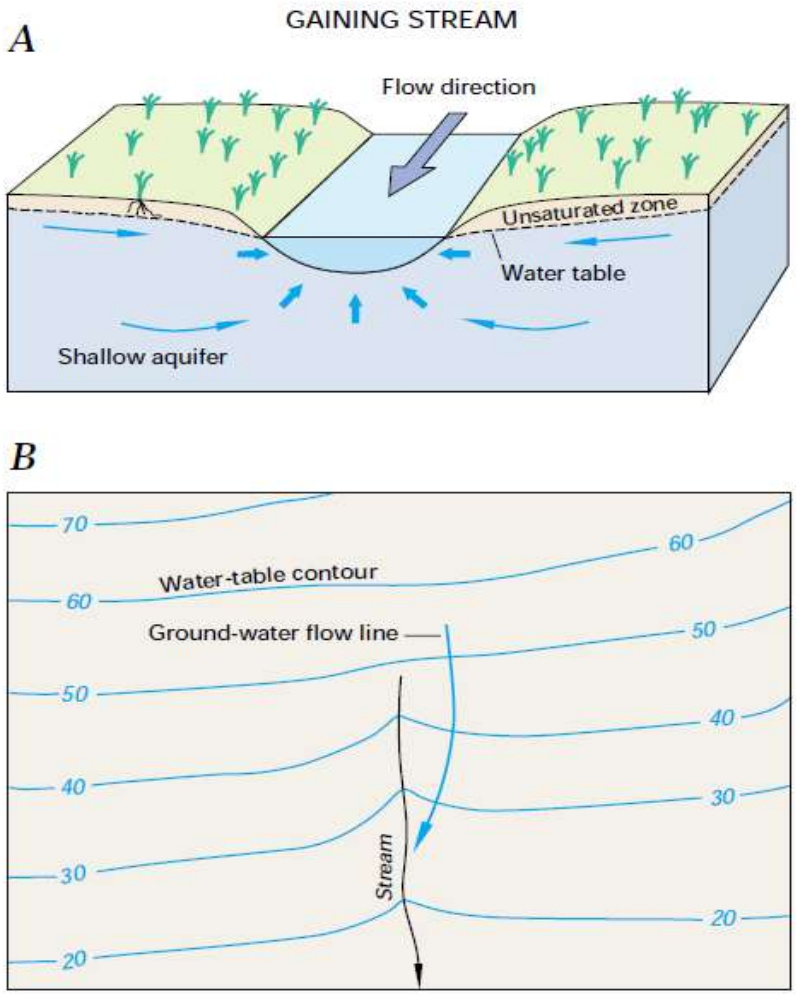


Figure 8. Gaining streams receive water from the ground-water system (A). This can be determined from water-table contour maps because the contour lines point in the upstream direction where they cross the stream (B).

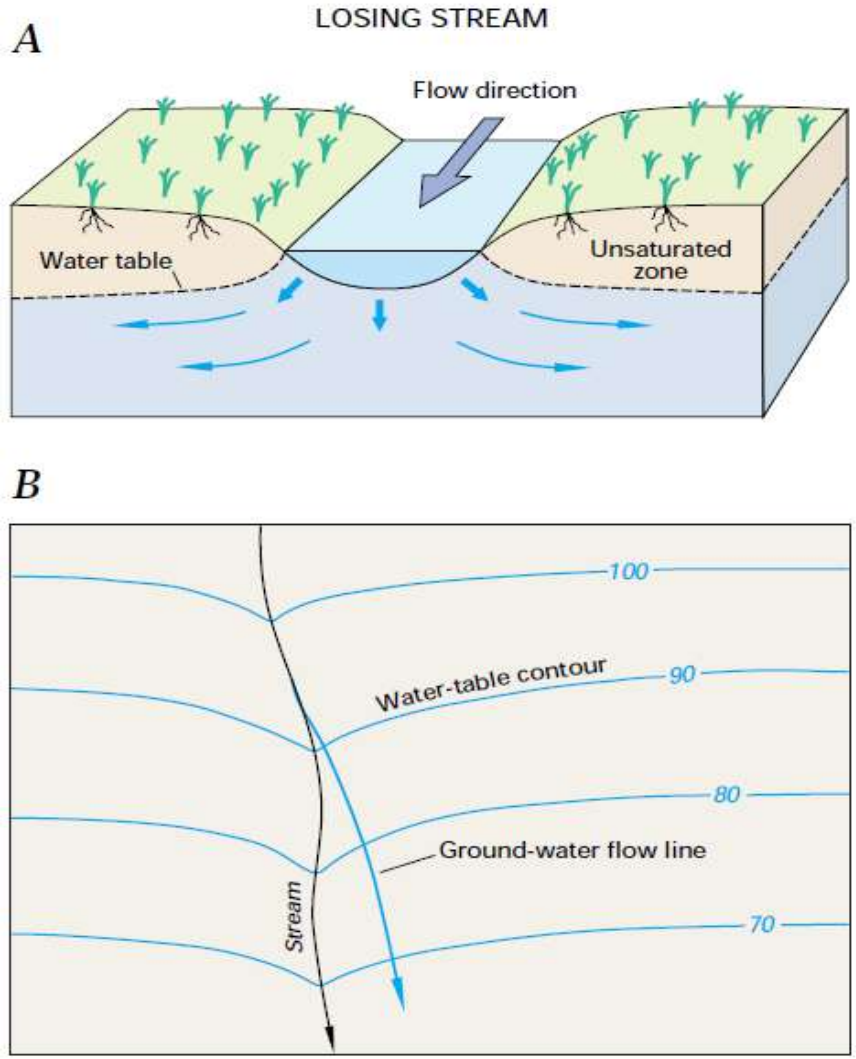
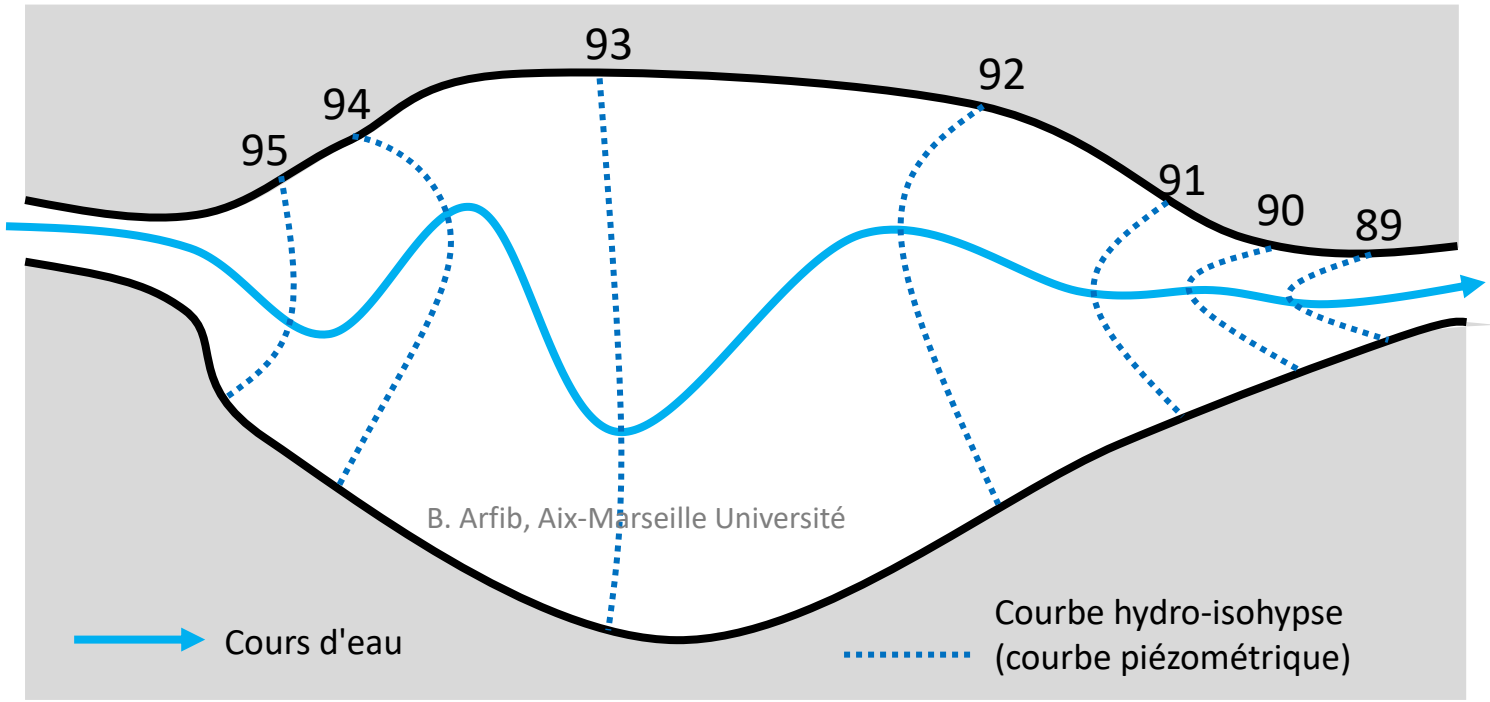


Figure 9. Losing streams lose water to the ground-water system (A). This can be determined from water-table contour maps because the contour lines point in the downstream direction where they cross the stream (B).

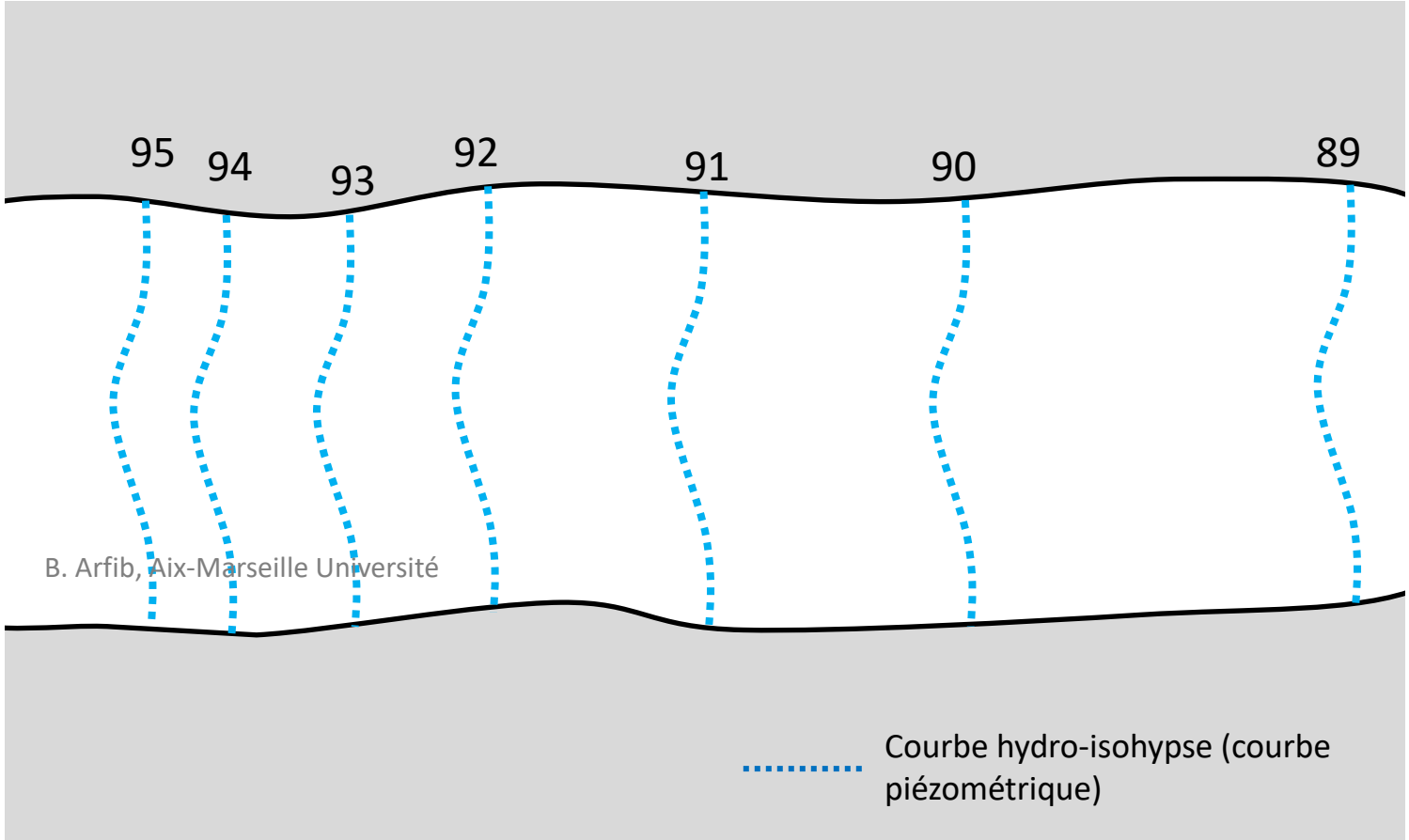
Winter T.C., Harvey J.W., Franke O.L. (1998) - Ground Water and Surface Water A Single Resource. U.S. Geological Survey Circular 1139, Denver, Colorado.

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



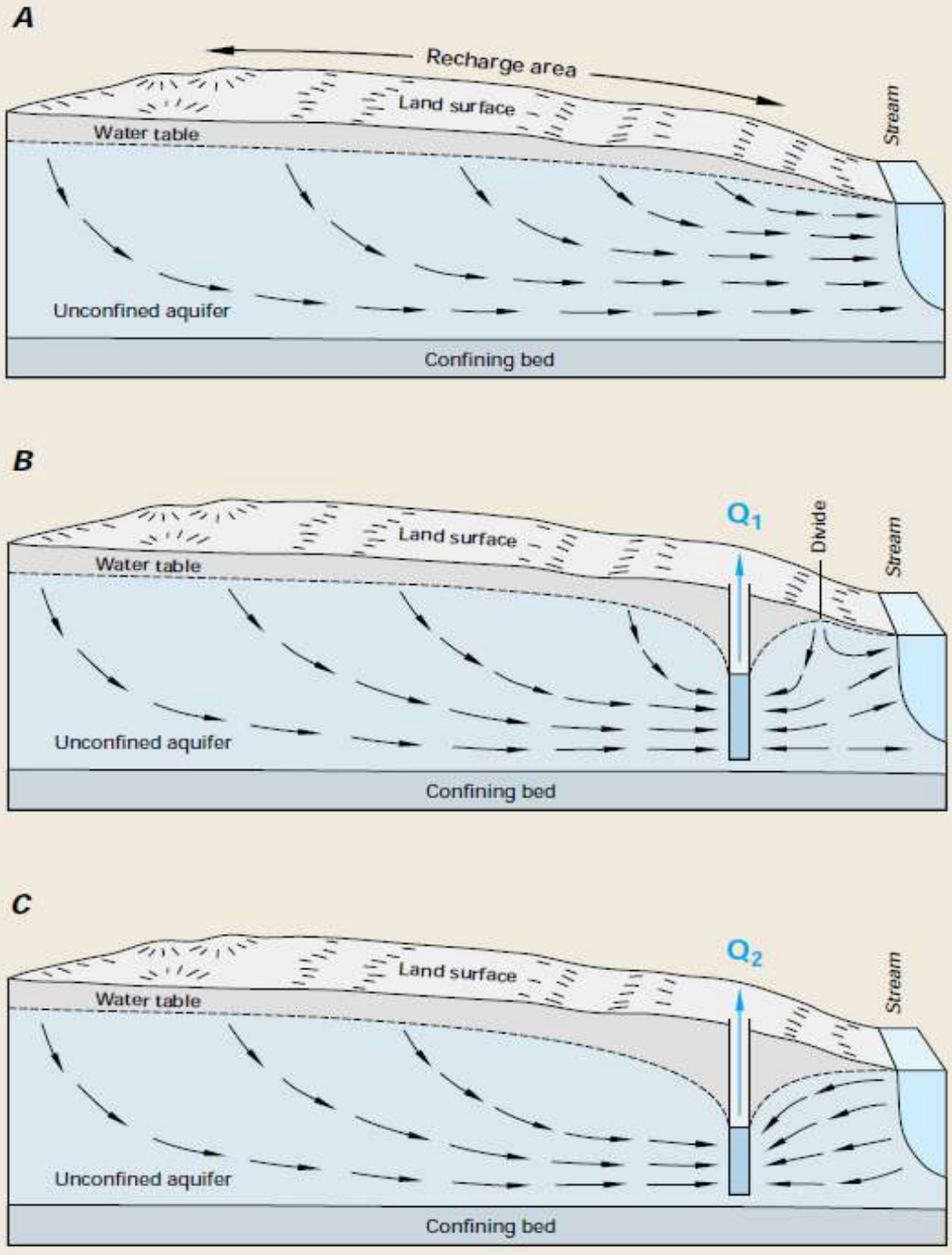
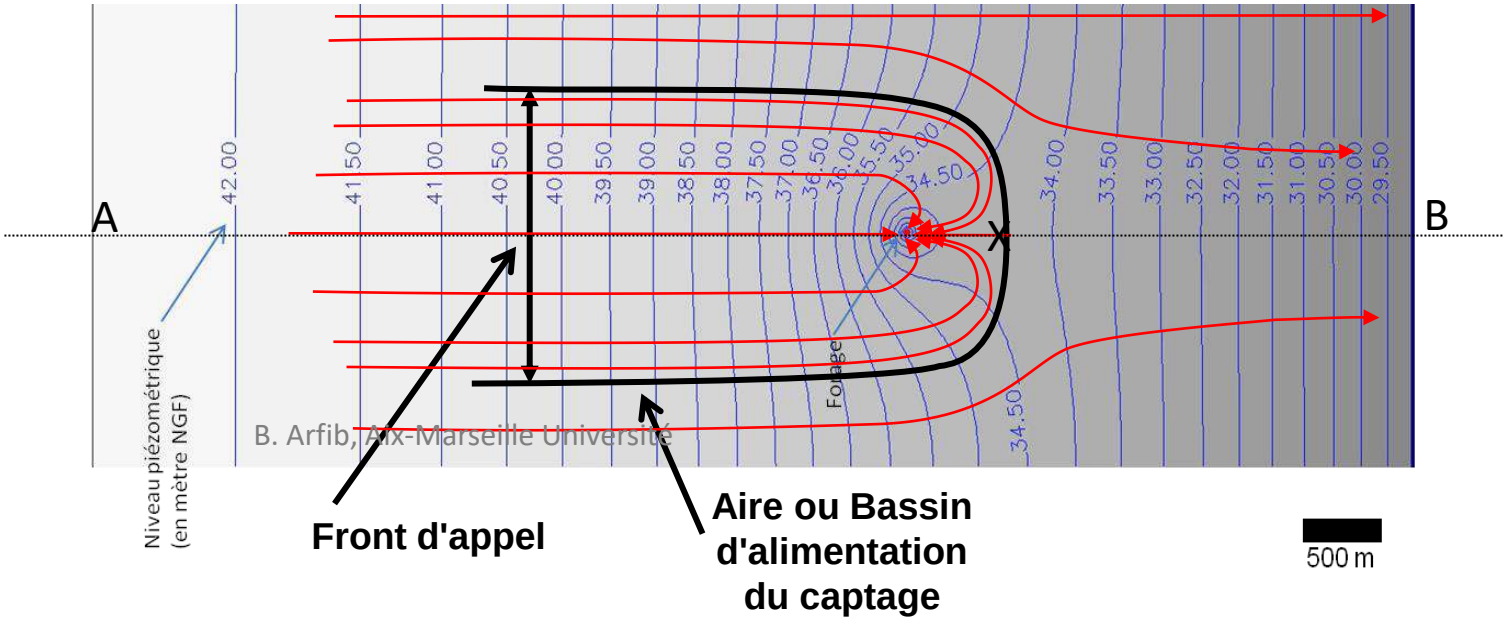


Figure C–1. In a schematic hydrologic setting where ground water discharges to a stream under natural conditions (A), placement of a well pumping at a rate (Q_1) near the stream will intercept part of the ground water that would have discharged to the stream (B). If the well is pumped at an even greater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

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.

Effet du prélèvement sur un forage



B. Arfib, Aix-Marseille Université

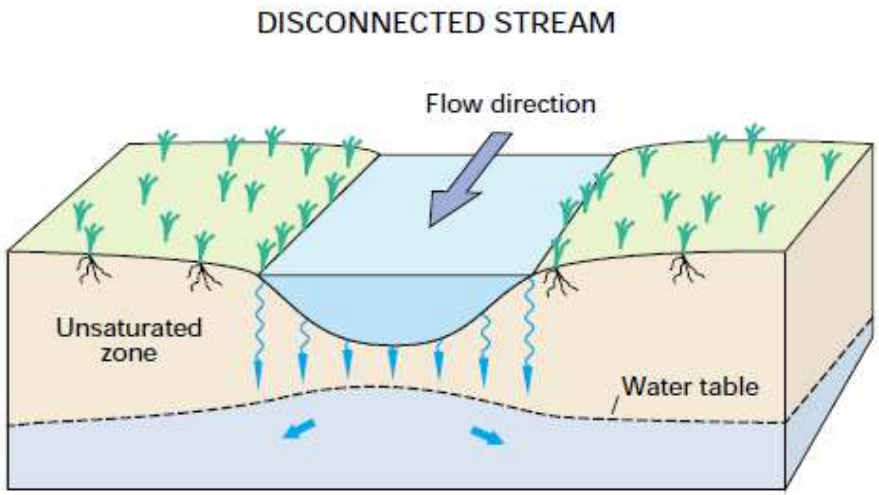


*Figure **10**. Disconnected streams are separated from the ground-water system by an unsaturated zone.*

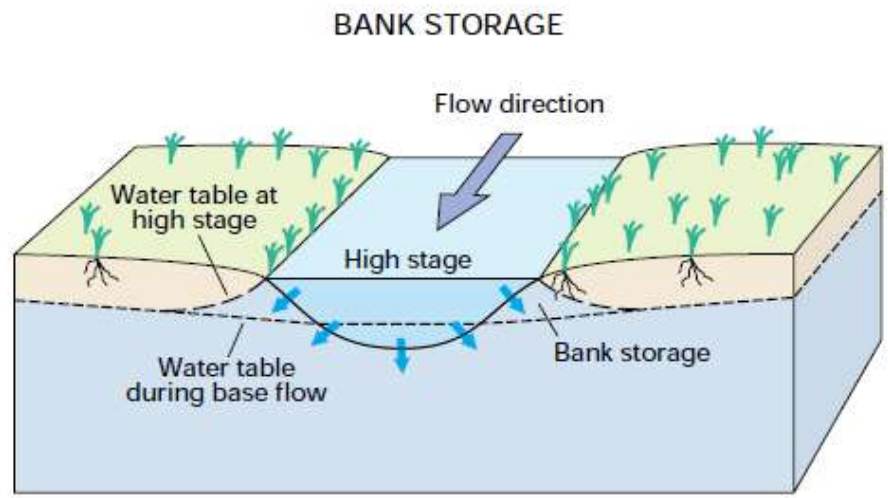


*Figure **11**. If stream levels rise higher than adjacent ground-water levels, stream water moves into the streambanks as bank storage.*

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.

8- Etablissement des périmètres de protection autour des forages AEP

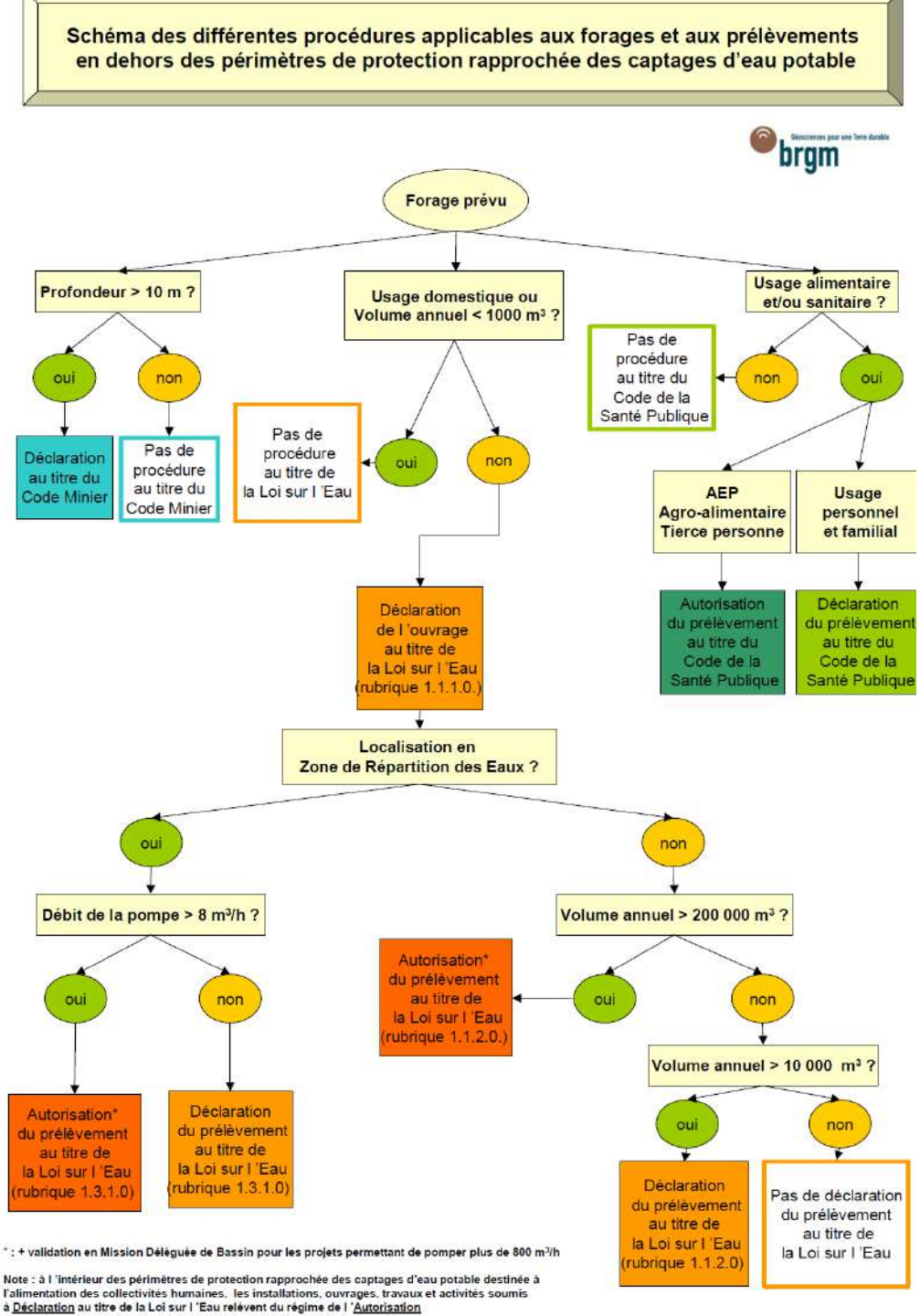
8.1. Règlementation générale : procédure AEP, Périmètres de protection, forages
8.2- Les périmètres de protection
8.3- Objectif des « études préalable » + notions de vulnérabilité des eaux souterraines
8.4. Méthode de Grubb (Wyssling)
8.5. Cas particulier du karst (suivi des sources, traçages, PAPRIKA)

Une présentation pdf complète à télécharger : www.karsteau.fr

Objectif de cette partie :

- Qu'est ce qu'une zone de répartition des eaux (ZRE), un périmètre de protection Immédiate, Rapprochée ou éloignée (PPI, PPR, PPE)?
- Qu'est ce qu'un captage à usage domestique ?
- Comment obtient-on l'autorisation de faire un forage?
- Peut-on faire un forage n'importe comment?
- Comment définit-on la vulnérabilité des eaux souterraines et d'un captage?
- Comment protège t-on un captage pour l'AEP?

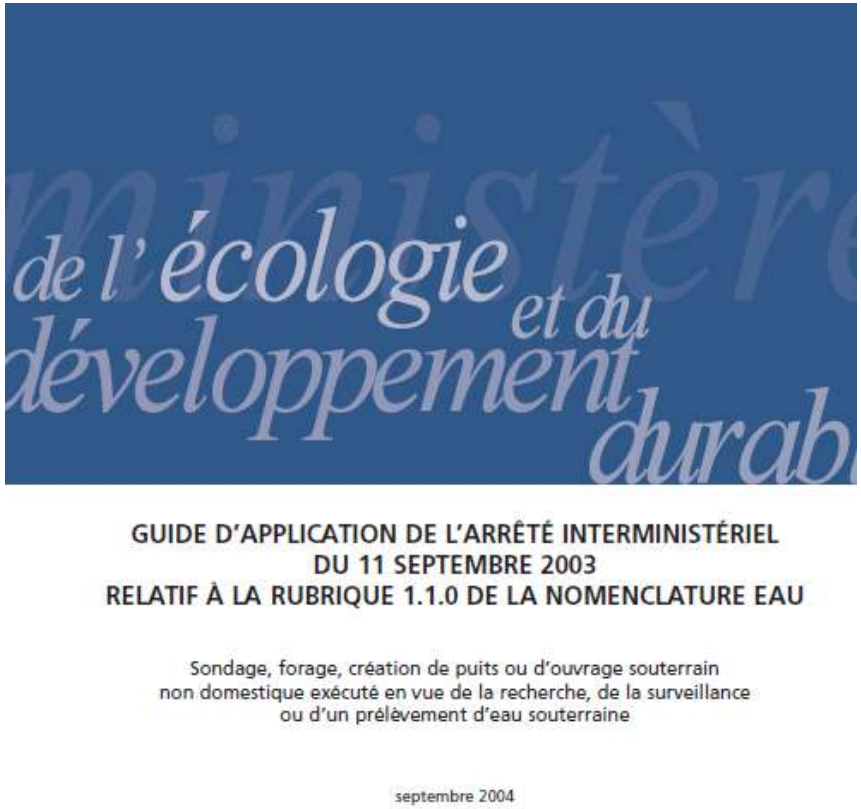
Code Minier
Code de la Santé Publique
Code de l'Environnement
(Loi sur l'Eau)



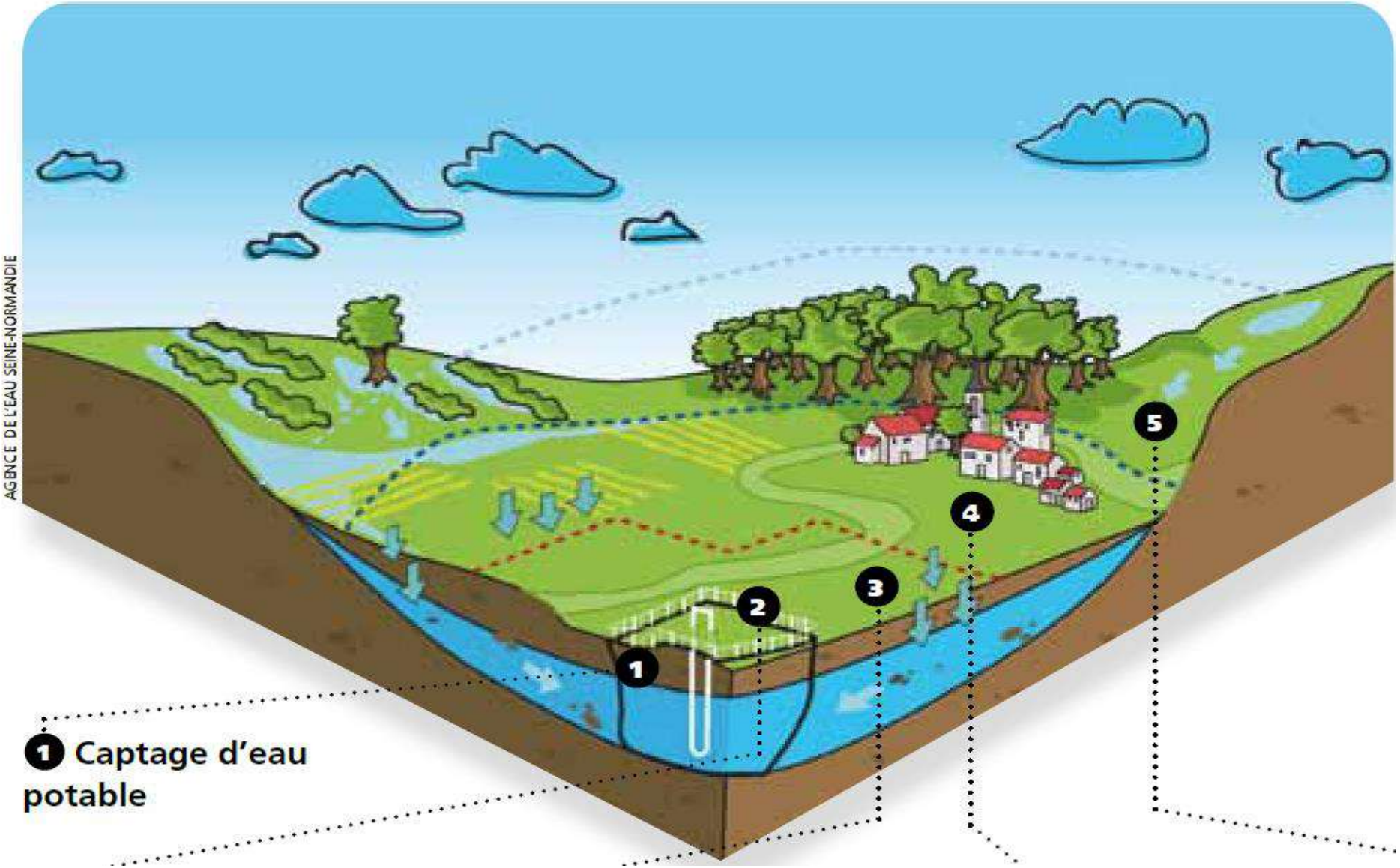
L'Arrêté Forage de 2003, Modifié par l'arrêté du 7 août 2006 paru le 24 septembre 2006

L'arrêté interministériel « forages » publié le 11 septembre 2003, contient les **règles techniques minimales permettant d'exécuter un ouvrage soumis à déclaration ou autorisation au titre de l'article L. 214-3 du code de l'environnement dans le respect de la protection des eaux souterraines**

Un guide existe pour une lecture plus aisée

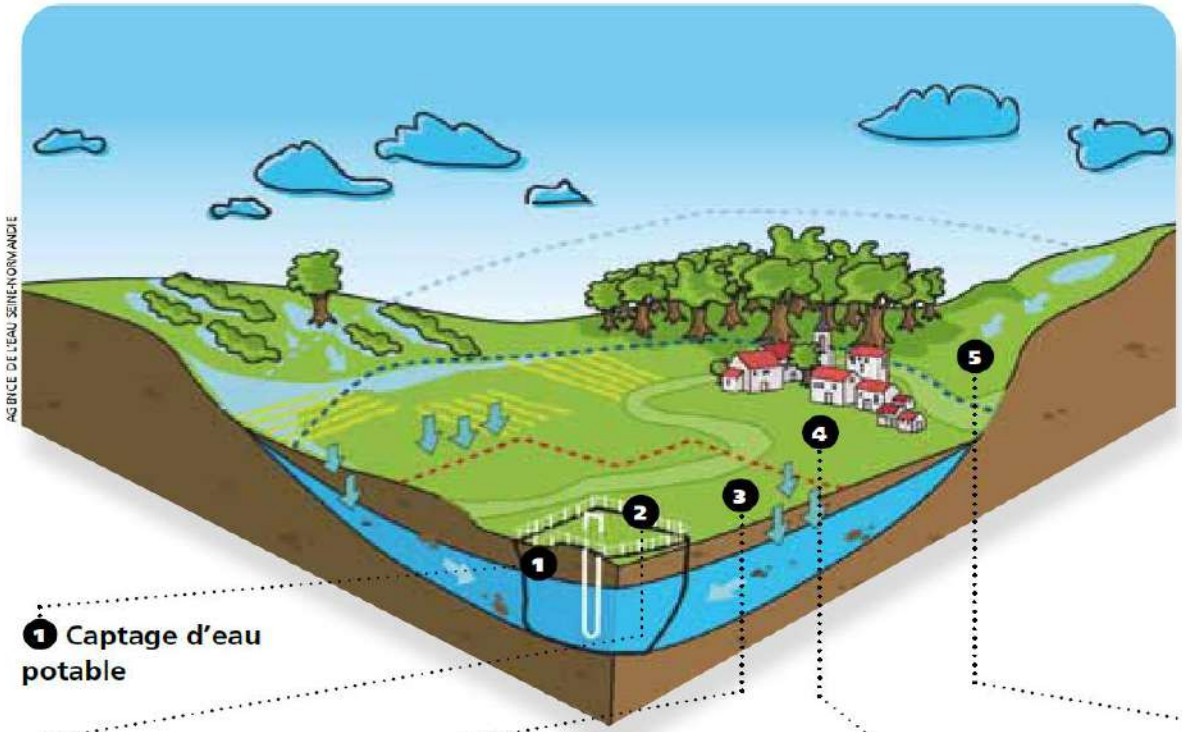


Protection de la ressource en eau : les 3 périmètres de protection d'un captage



http://www.alterre-bourgogne.fr/fileadmin/Alfresco/Eau/Guide_protection_captages_2011.pdf

Protection de la ressource en eau



On parle de pollution ponctuelle quand une source de pollution localisée en un point précis provoque une contamination (bactériologique ou par des hydrocarbures…) de la ressource.
Les pollutions accidentelles font référence par exemple à des erreurs de manipulation ou des défaillances de transport. Elles sont localisées.
Quant aux pollutions diffuses, leur origine ne peut être localisée en un point précis, ni concerner un acteur en particulier. Elles sont réparties sur une surface importante. Les résidus polluants sont entraînés par les eaux de ruissellement ou par percolation dans le sol et le sous-sol.

1 Captage d'eau potable

2 Le périmètre de protection immédiate est destiné à protéger les ouvrages du captage. Il doit être clôturé et est généralement enherbé. La collectivité distributrice de l'eau en est propriétaire. Aucune activité autre que l'entretien mécanique et l'entretien de l'ouvrage n'y est autorisée.

3 Le périmètre de protection rapprochée est défini pour protéger le captage des migrations de substances polluantes. Il permet de préserver le captage des risques de pollutions accidentelles ou ponctuelles. Dans le cas de petits bassins versants, il permet aussi d'agir sur des pollutions diffuses. Les activités ou aménagements pouvant nuire à la qualité des eaux y sont réglementés ou interdits.

4 Le périmètre de protection éloignée constitue une zone de vigilance particulière, vis-à-vis notamment des pollutions accidentelles pouvant avoir des conséquences sur la ressource. Les activités ou aménagements à l'intérieur de ce périmètre y sont souvent réglementés. L'application de la réglementation générale doit y être appliquée en toute rigueur, c'est-à-dire sans possibilité de dérogation.

5 Le bassin d'alimentation de captage (BAC), aussi appelé aire d'alimentation de captage (AAC), désigne la surface du sol sur laquelle l'eau qui ruisselle et/ou s'infiltre alimente le captage.

http://www.alterre-bourgogne.fr/fileadmin/Alfresco/Eau/Guide_protection_captages_2011.pdf

Préconisation pour la délimitation des périmètres de protection rapprochée

(Guide technique Protection des captages d'eau – Acteurs et Stratégie. 2008)

Type d'aquifère ou de ressource	Petits captages gravitaires (montagne et piémont)	Nappe libre alluviale ou non	Nappe alluviale influencée Réalimentation induite	Nappe semi-captive peu profonde	Nappe captive profonde	Nappe de socle (Terrains profonds fissurés)	Eau superficielle		Karst
							Prises au fil de l'eau	Plans d'eau	
Critères de dimensionnement	Débits, méthode du bilan d'eau	Piézométrie, pompages, vitesse, modèles	Piézométrie, pompages, vitesse d'écoulement, modèles, importance respective des apports d'eau superficielle et d'eau souterraine	Piézométrie,pompages, drainance, épaisseur de la couverture imperméable	Débit, rabattement, piézométrie	Géologie, géophysique, fracturation, pompage de longue durée	Vitesses du cours d'eau	Taille du plan d'eau	Débits, limites géologiques, traçages, vitesses,
Paramètres de qualité, caractéristiques de la ressource captée	Température, conductivité, turbidité, bactériologie, nitrates	Nitrates, pesticides, (bactériologie)	Nitrates, micropollution, pesticides (bactériologie)	Potentiel redox, pH, NH4+, Fe, Mn, métaux	NH4, Fe, Mn, pH, métaux, sulfures	Nitrates (processus dénitrifiant éventuel), Fe, Mn, éléments traces métalliques	Paramètres organiques, température, nitrates, micropolluants organiques dont pesticides	Paramètres organiques, température, nitrates, micropolluants organiques dont pesticides	Turbidité, bactériologie, nitrates, pesticides
Zone d'étude	Bassin hydrogéologique ou topographique	Zone d'alimentation potentielle	Zone d'appel et bassin versant du cours d'eau	Zone d'appel	Recensement d'ouvrages dans un rayon de 2 km	Bassin versant topographique, limites géologiques	Bassin versant (étude globale) et zone proche du captage (étude détaillée)	Bassin versant du cours d'eau (étude globale) et cuvette de la retenue (étude détaillée)	Bassin versant théorique, limite imperméable, engouffrements
Extension de la protection rapprochée en amont du captage	Bassin versant en totalité ou de 150 à 400 m selon la vulnérabilité	Isochrone 50 jours	Isochrone 50 jours en nappe et 2 heures pour le cours d'eau	Zone d'appel ou isochrone 50 jours	PPR = PPI	Zone d'appel	2 heures pour un débit non dépassé 90 % du temps annuellement (ou pour le module)	Un secteur de berge ou auréole de terrain autour du plan d'eau	Quelques heures de temps de transfert + périmètre de protection satellites
Mesures complémentaires de protection des eaux distribuées	Aucun traitement, traitement A1ou A2	Aucun traitement, traitement A1	Traitement A1 ou A3, détecteur d'alerte, stockage de secours, surveillance piézométrique	Traitement A1 ou A3, limitation du rabattement	Aucun traitement, traitement A1 ou A3, surveillance des forages voisins du captage, limitation du rabattement	Traitement A1 ou A2	Traitement A2 ou A3, stockage d'eau brute ou traitée, interconnexions station d'alerte (si zones urbanisées ou industrielles)	Traitement A2 ou A3, stockage d'eau brute ou traitée, interconnexions station d'alerte (si zones urbanisées ou industrielles)	Traitement A1, A2 ou A3, détection de la turbidité, stockage d'eau brute ou traitée, ressource de secours
Zone de vigilance	Bassin versant	Zone d'alimentation	Zone d'alimentation + élément du bassin versant du cours d'eau	Zone d'alimentation	Rayon de quelques km	Bassin versant ou bassin hydrogéologique connu	Bassin versant en partie ou en totalité	Bassin versant en partie ou en totalité parfois sans objet (grands lacs de montagne)	Bassin versant

Bon courage

LIENS UTILES ☝

Visiter :

1. https://biologie-maroc.com
   - Télécharger des cours, TD, TP et examens résolus (PDF Gratuit)

2. https://biologie-maroc.com/shop/
   - Acheter des cahiers personnalisés + Lexiques et notions.
   - Trouver des cadeaux et accessoires pour biologistes et géologues.
   - Trouver des bourses et des écoles privées

3. https://biologie-maroc.com/emploi/
   - Télécharger des exemples des CV, lettres de motivation, demandes de ...
   - Trouver des offres d'emploi et de stage