



Sciences de l'eau : Hydrologie et Hydrogéologie

Licence 2 SVT

Homme et Environnement, Envipom, TERRE

Bruno ARFIB

**Maître de Conférences Université Aix-Marseille,
CEREGE Centre Saint Charles**

**Laboratoire de Géologie – CEREGE – Bâtiment Sciences Naturelles – Rez de
jardin**

arfib@cerege.fr

www.karsteau.fr

**Aix-Marseille
université**

Hydrologie et Hydrogéologie



Eau de surface



Eau souterraine

Hydrologie et Hydrogéologie

Objectifs de cette unité d'enseignement (UE)

- Comprendre le cycle de l'eau
 - Connaître les méthodes de mesure des flux d'eau dans le cycle de l'eau
 - Connaître le vocabulaire courant en hydrogéologie
 - Savoir établir et lire une carte piézométrique
 - Comprendre la Loi de Darcy
- + 1 sortie : Auriol, Vallon des Encanaux
- Relations eau souterraine / eau de surface dans un aquifère karstique
 - Mesures in-situ de paramètres physico-chimiques simples
 - Observations du cadre géologique

Hydrologie et Hydrogéologie

Pourquoi étudier l'hydrologie et l'hydrogéologie?

- eau = 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)...

* **Une 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.

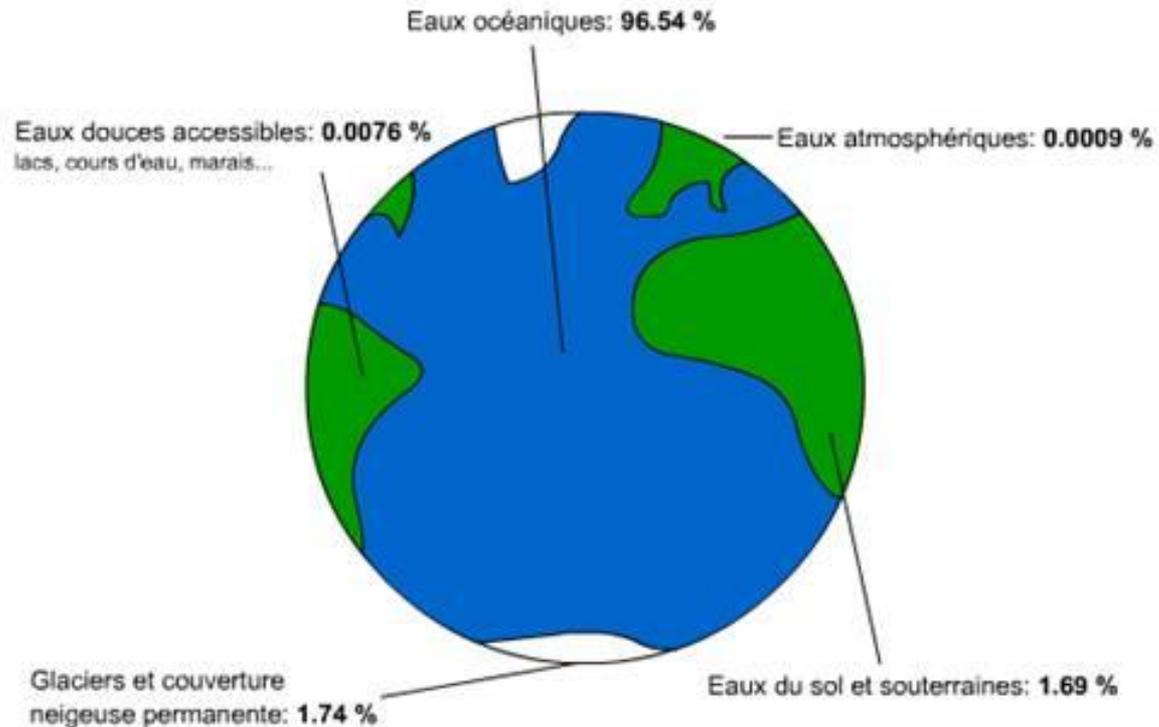
1- Quantification du cycle de l'eau

1.1- Le cycle de l'eau

1.1.1- L'eau sur terre

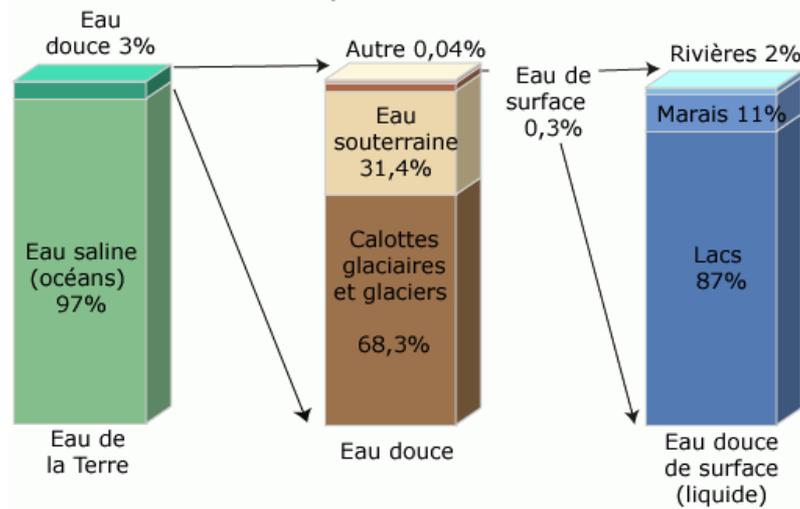
L'eau sur Terre

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



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

Répartition de l'eau



Estimation de la distribution globale de l'eau :

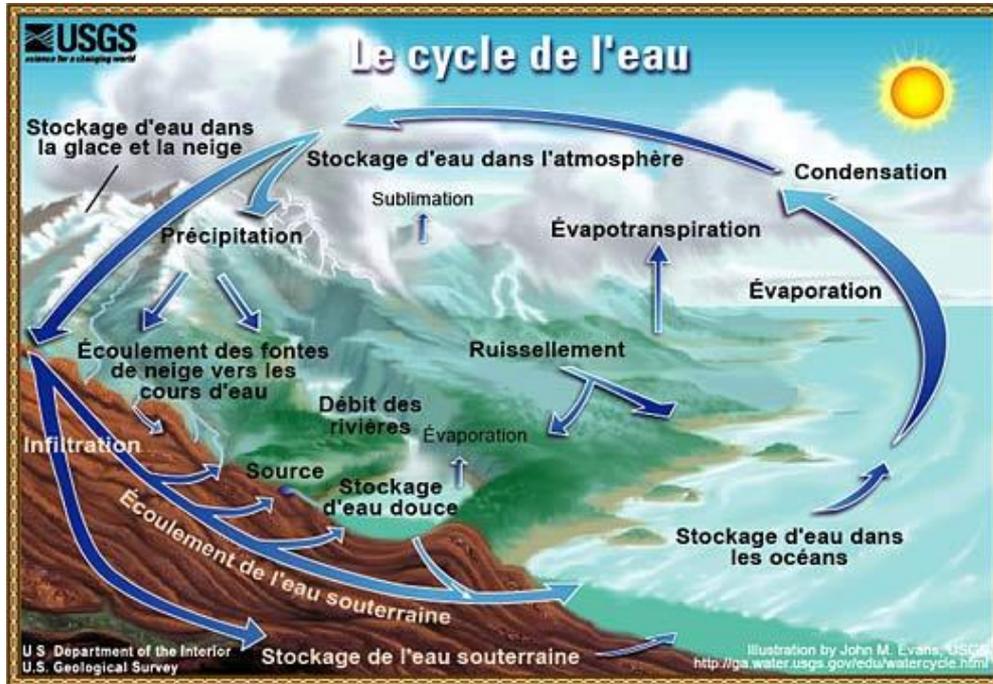
Source d'eau	Volume d'eau (km ³)	Volume d'eau (miles ³)	% d'eau douce	% d'eau totale
Océans, mers & baies	1,338,000,000	321,000,000	--	96.5 %
Calottes glaciaires, glaciers et neiges éternelles	24,064,000	5,773,000	68.7 %	1.74 %
Eau souterraine	23,400,000	5,614,000	--	1.7 %
douce	10,530,000	2,526,000	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 %

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

$$= \frac{\text{Taille du réservoir}}{\text{Débit d'entrée ou de sortie}}$$

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	-

1.1.2- Le cycle de l'eau



Des flux :

- Evaporation
- Evapotranspiration
- Précipitations
- Écoulement de l'eau souterraine
- Écoulement de l'eau de surface
- +
- Ruissellement
- Infiltration

Des stocks :

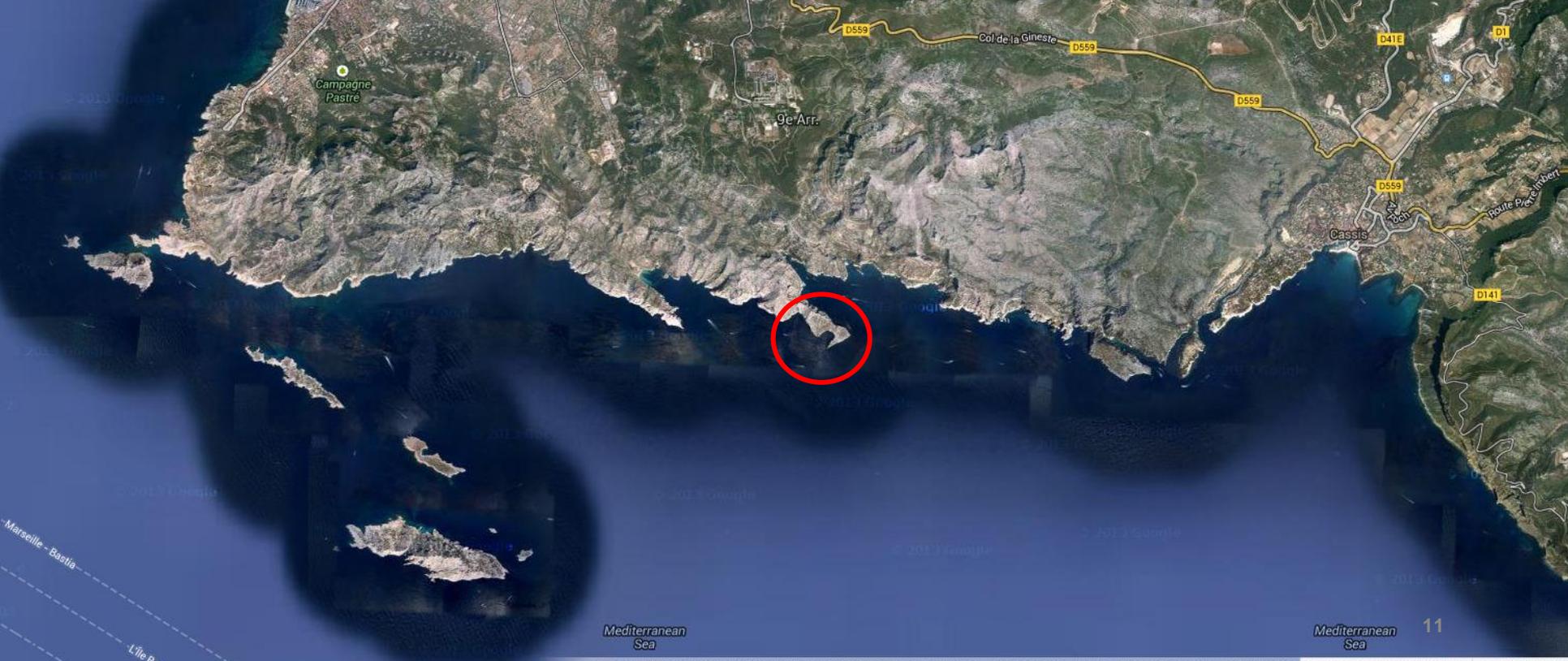
- Océan
- Glace
- Eau souterraine
- Eau de surface (lac + rivières)
- Atmosphère
- Biologie

Comment expliquer les variations du niveau de la mer ?

La Grotte COSQUER



Cap Morgiou





La Grotte COSQUER

<http://www.culture.gouv.fr/fr/archeosm/fr/fr-cosqu1.htm>

**Mains négatives à doigts
incomplets
(Main 19, secteur 205 :
27 740 +/-410 ans BP âge14CBP
ou
32371+/-400 ans âge calibréBP)**





Panneau des chevaux

Pingouins ; 27 et 26 cm



**Cheval 7, secteur 123 ;
salle basse de la zone ouest
(19720 ans \pm 210 ans BP \hat{a} ge 14CBP
Ou 23565 \pm 408 ans \hat{a} ge calibréBP)**



Variations du niveau de la mer

Comment expliquer physiquement cette élévation du niveau de la mer ?

Attention, il y a 2 échelles temporelles :

- **l'échelle des temps géologiques → variations naturelles**
- **l'échelle du temps moderne (dernier siècle) → impact des activités humaines (réchauffement climatique)**

L'explication physique reste la même mais l'origine des variations est différente.

Variations du niveau de la mer

Comment expliquer cette élévation du niveau de la mer ?

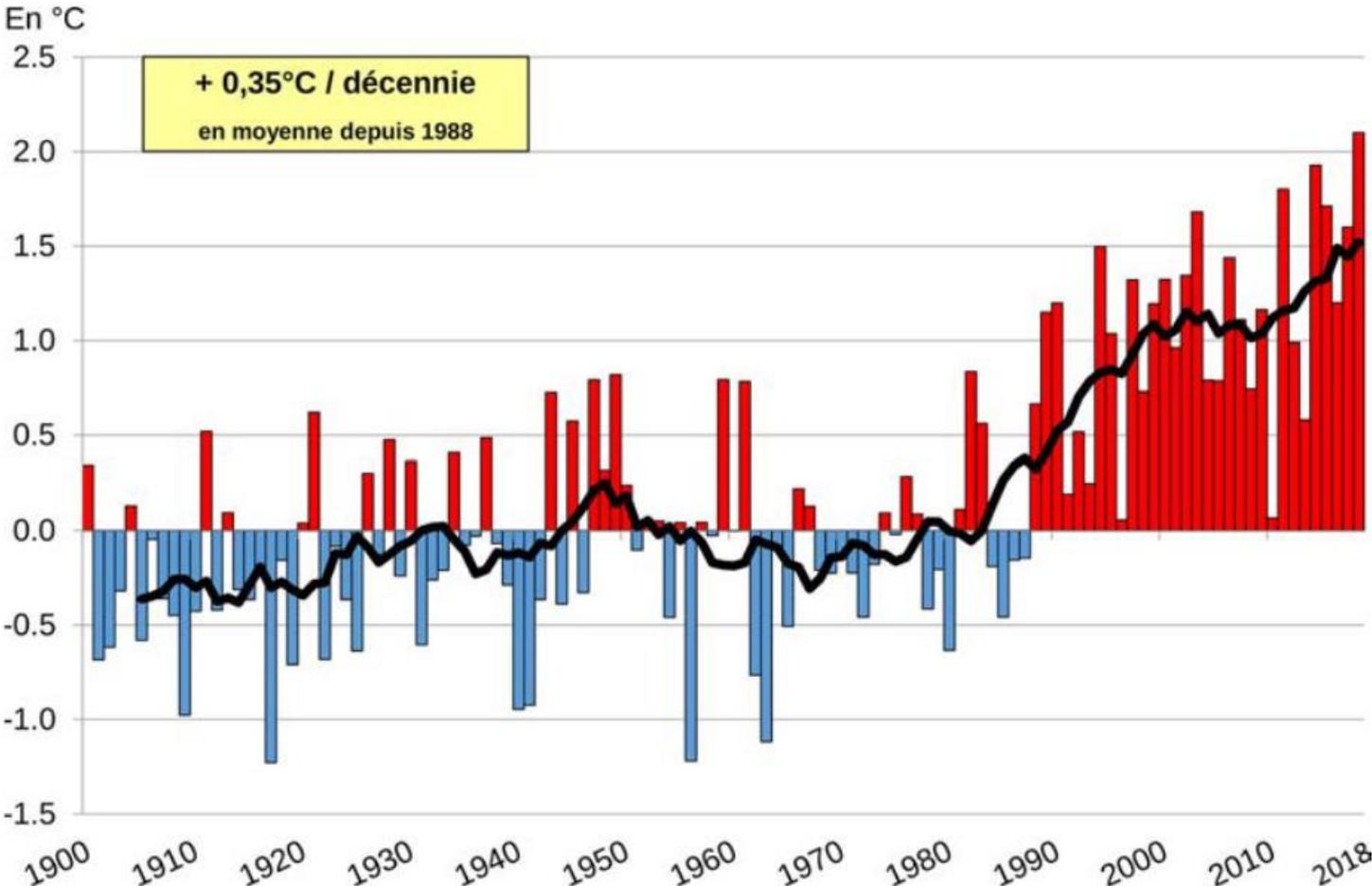
La dilatation thermique des océans explique à 50 % l'élévation entre 1993 et 2003, les autres 40 % étant dus à la fonte des glaciers et calottes polaires, la marge d'erreur étant de 10 % (voir tableau ci-dessous).

Facteur d'élévation du niveau de la mer	Vitesse d'élévation du niveau de la mer (mm/an)	
	1961–2003	1993–2003
Dilatation thermique	0,42 ± 0,12	1,6 ± 0,5
Glaciers et calottes glaciaires	0,50 ± 0,18	0,77 ± 0,22
Inlandsis groenlandais	0,05 ± 0,12	0,21 ± 0,07
Inlandsis antarctique	0,14 ± 0,41	0,21 ± 0,35
Somme des diverses contributions liées au climat	1,1 ± 0,5	2,8 ± 0,7
Élévation totale observée du niveau de la mer	1,8 ± 0,5a	3,1 ± 0,7a
Différence (niveau observé, moins la somme des contributions climatiques estimées)	0,7 ± 0,7	0,3 ± 1,0

GIEC 2007

Climat : un réchauffement avéré en France

Graphique 21 : Évolution des températures moyennes annuelles en France métropolitaine



Note : l'évolution de la température moyenne annuelle est représentée sous forme d'écart de cette dernière à la moyenne observée sur la période 1961-1990 (11,8 °C) à la différence de la mesure du réchauffement planétaire global qui se réfère généralement à la période préindustrielle (1850-1900) et concerne les températures globales (terres et océans).

Source : Météo-France.

1- Quantification du cycle de l'eau

1.1- Le cycle de l'eau

1.2- Matériel et mesures du cycle de l'eau

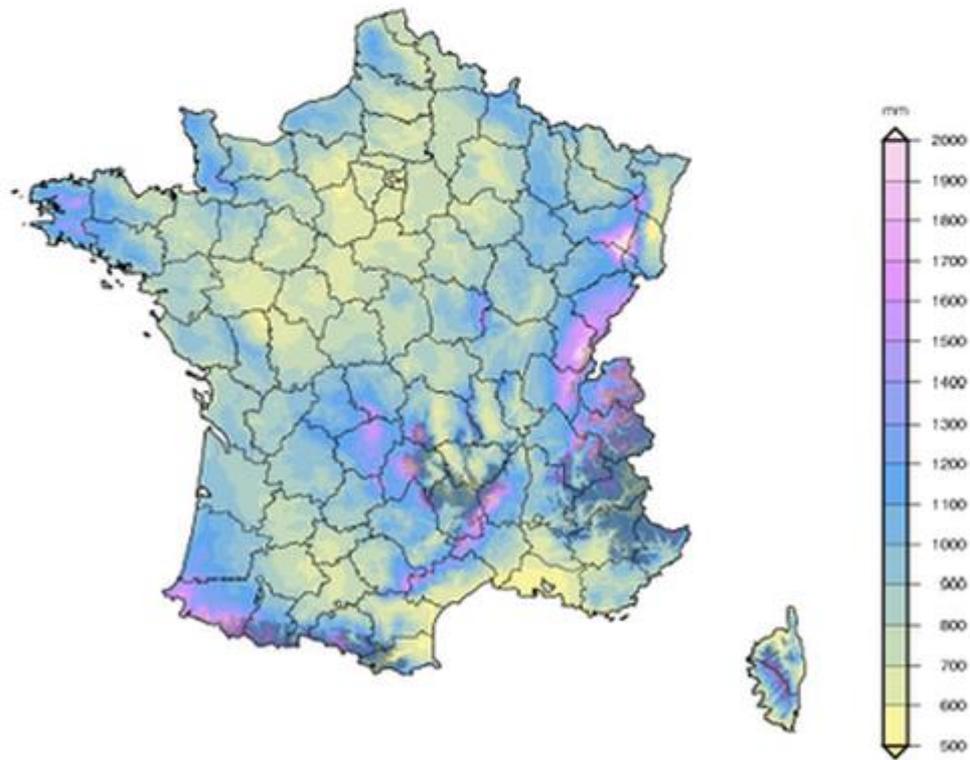
1.2.1- Précipitations

Pluie moyenne (1981-2010) – Météo France



Moyenne annuelle de référence 1981-2010 des précipitations

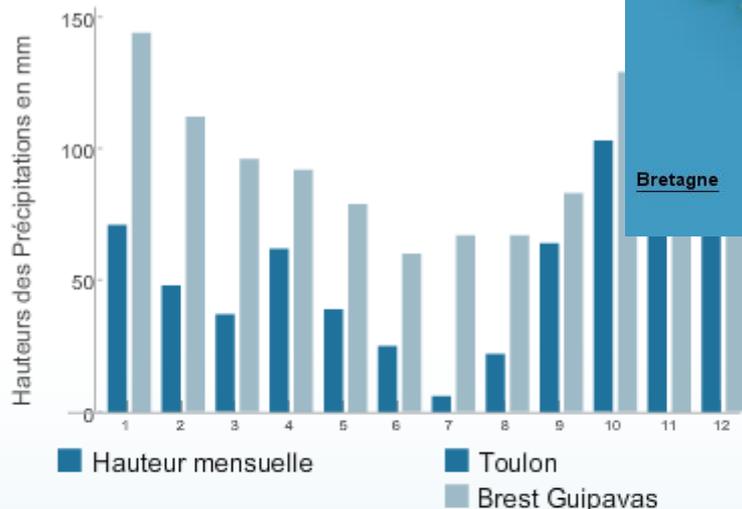
France



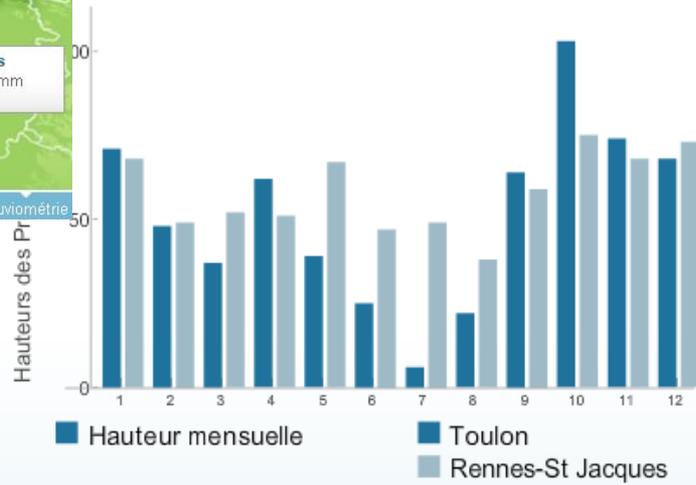
Pluie moyenne (1981-2010) – Météo France

<http://climat.meteofrance.com/>

Normales mensuelles



Normales mensuelles



températures pluviosité ensoleillement

températures pluviosité ensoleillement

Toulon comparaison avec Brest Guipavas - Normales annuelles

	Toulon	Brest Guipavas
Nombre de jours avec précipitations (> 1mm)	58	159
Hauteur de précipitations (mm)	616,1	1210,0

Toulon comparaison avec Rennes-St Jacques - Normales annuelles

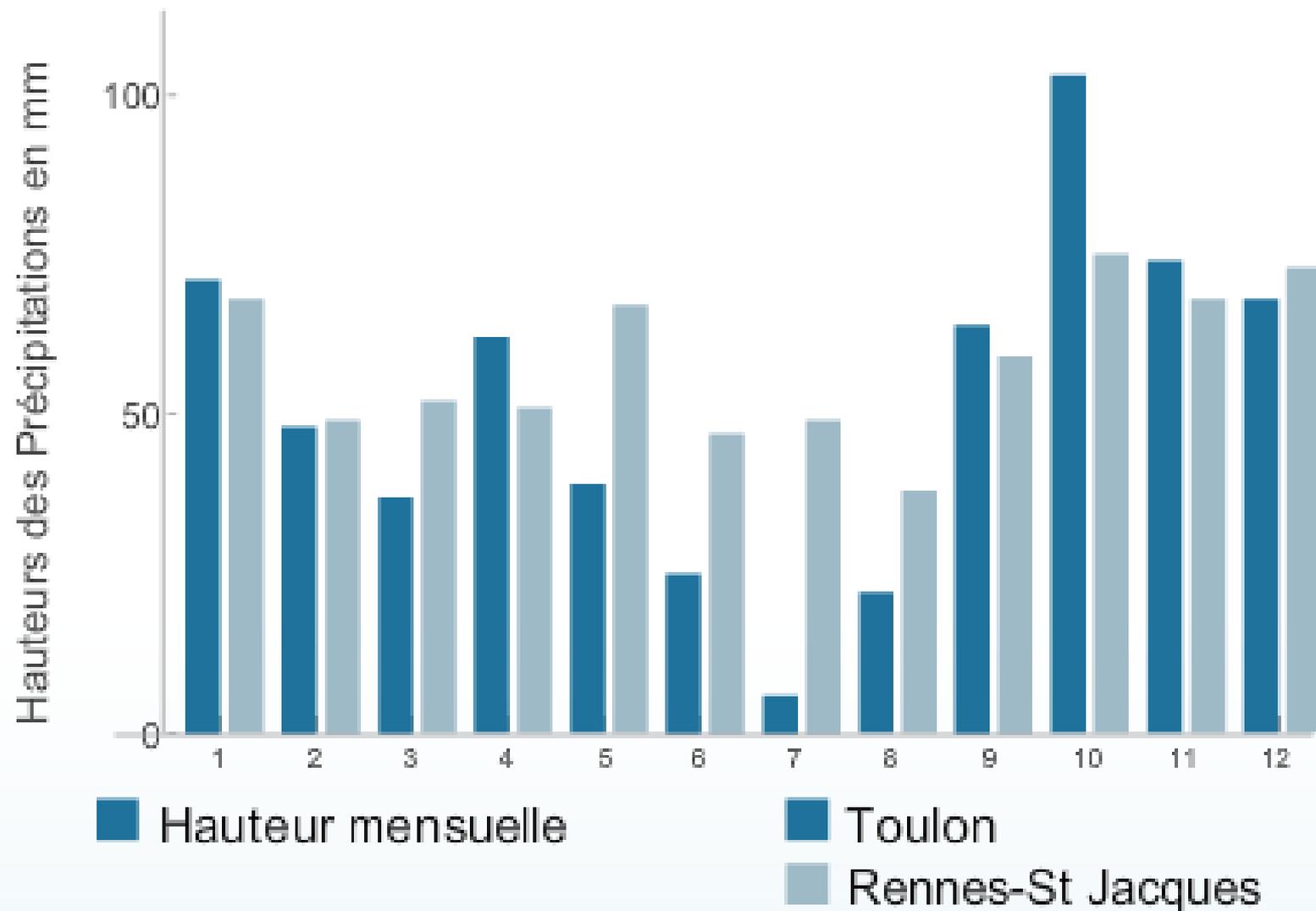
	Toulon	Rennes-St Jacques
Nombre de jours avec précipitations (> 1mm)	58	114
Hauteur de précipitations (mm)	616,1	694,0

Pluie moyenne

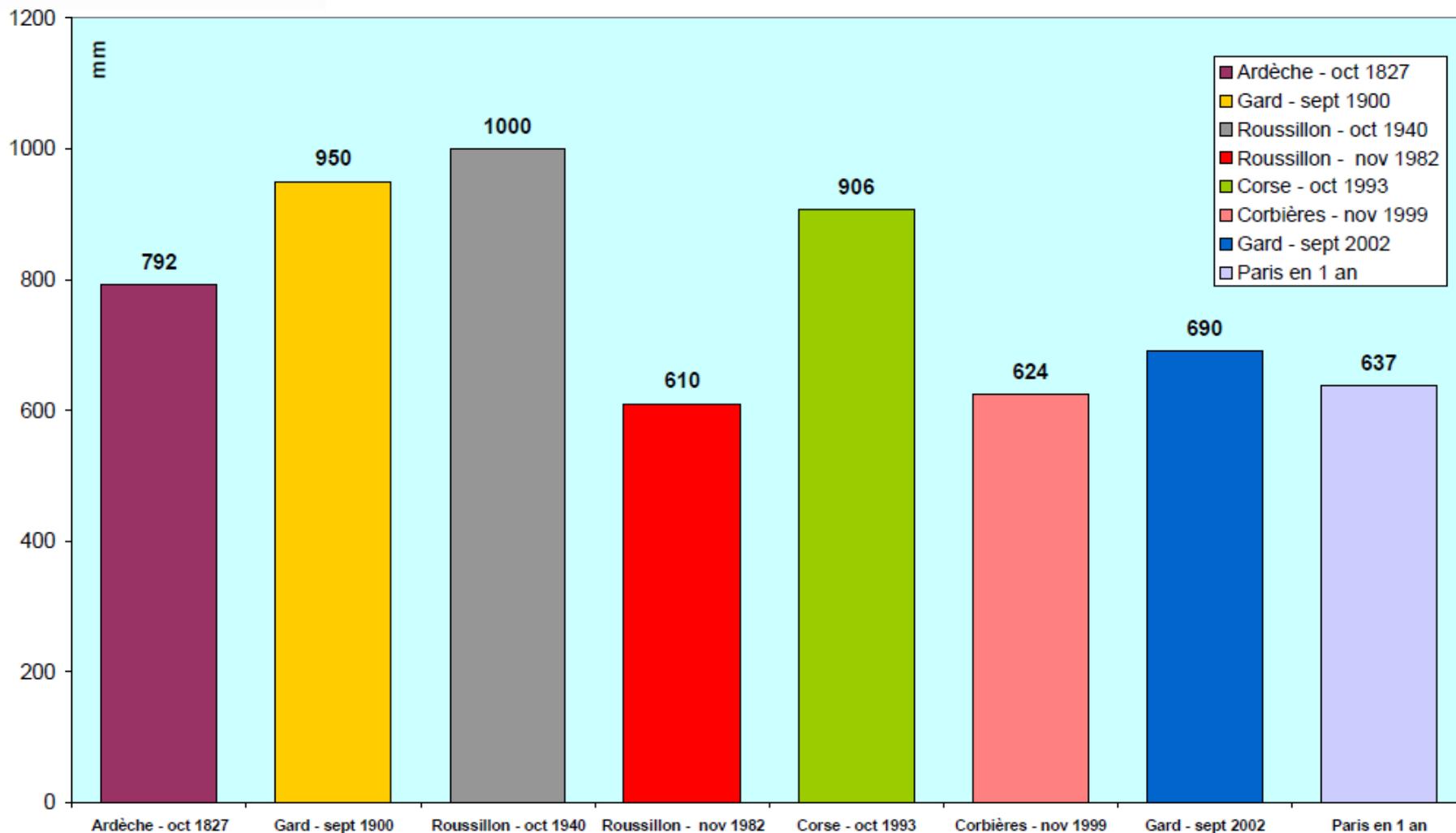
(1981-2010)

Normales mensuelles

<http://climat.meteofrance.com/>



Comparaison entre la normale annuelle sur Paris (1981-2010)
et les valeurs plus fortes en 1 jour mesurées sur les régions méditerranéennes

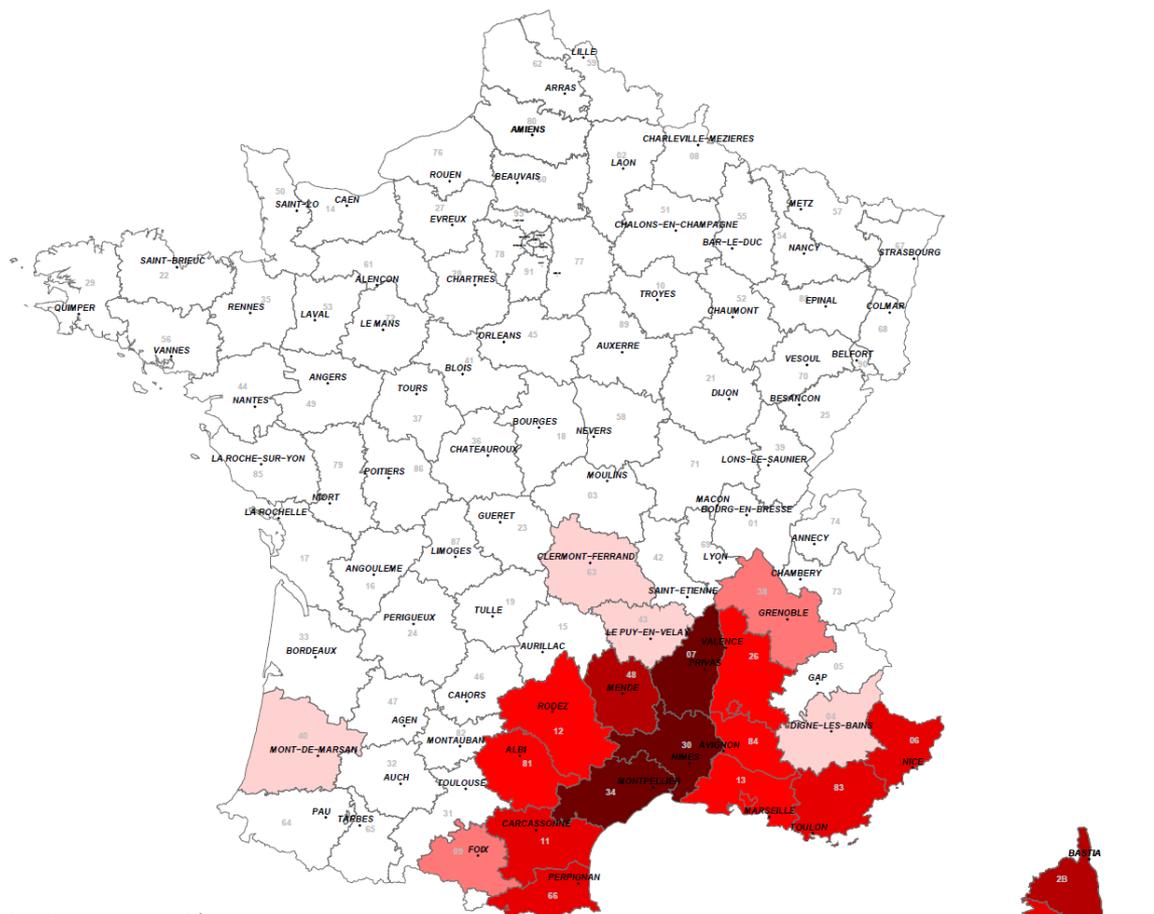


Edité le 13/04/2012

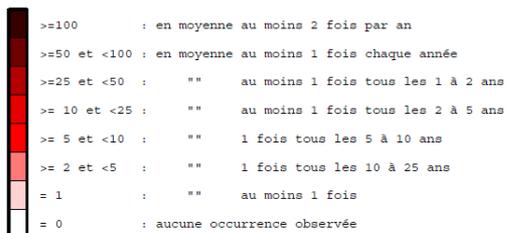
1 millimètre de pluie équivaut à 1 litre d'eau par m².

Pluie faible continue	1 à 3 mm par heure
Pluie modérée	4 à 7 mm par heure
Pluie forte	8 mm / heure et plus
Pluie intense	> 50 mm/jour en plaine
Pluie extrême (méditerranéenne)	> 100 mm/h

200 mm



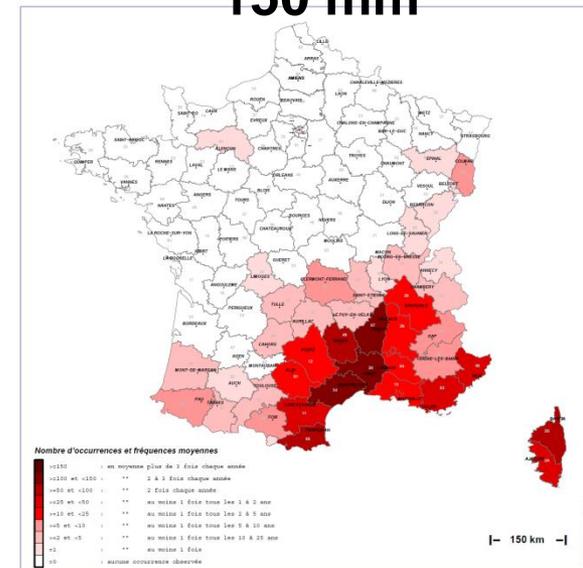
Nombre d'occurrences et fréquences moyennes



— 150 km —

Fond de carte © IGN

150 mm

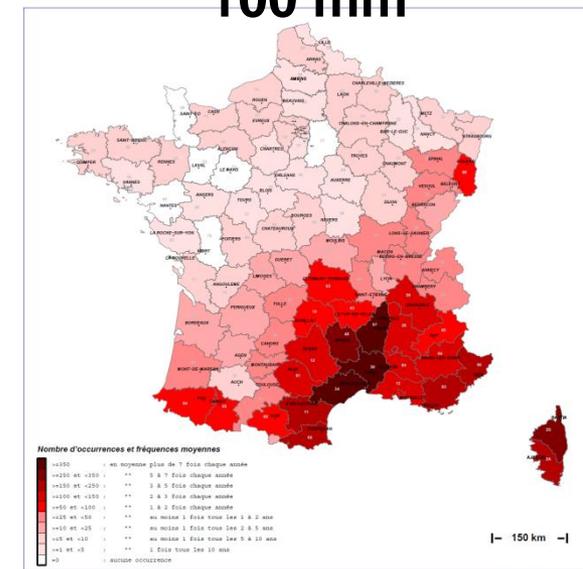


Nombre d'occurrences et fréquences moyennes

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

100 mm



Nombre d'occurrences et fréquences moyennes

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.

Météo-France

Météo-France

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.

Aux Arcs : 382,5 mm en 24 heures

dont 351,3 mm en 12 h et 226 mm en 6 h

- avec entre 10 h 24 et 19 h 36 UTC :

des pointes d'intensités horaires successives de 47 mm, 59 mm, 25 mm, 37,5 mm, 33,5 mm, 48,7 mm, 24 mm et 12,6 mm.

Les pointes d'intensités les plus fortes en 3 heures ont été de 126,5 mm, 112,5 mm et 69,1 mm.

A Lorgues (station automatique (Source: CIRAME)) : 460 mm en 24 heures

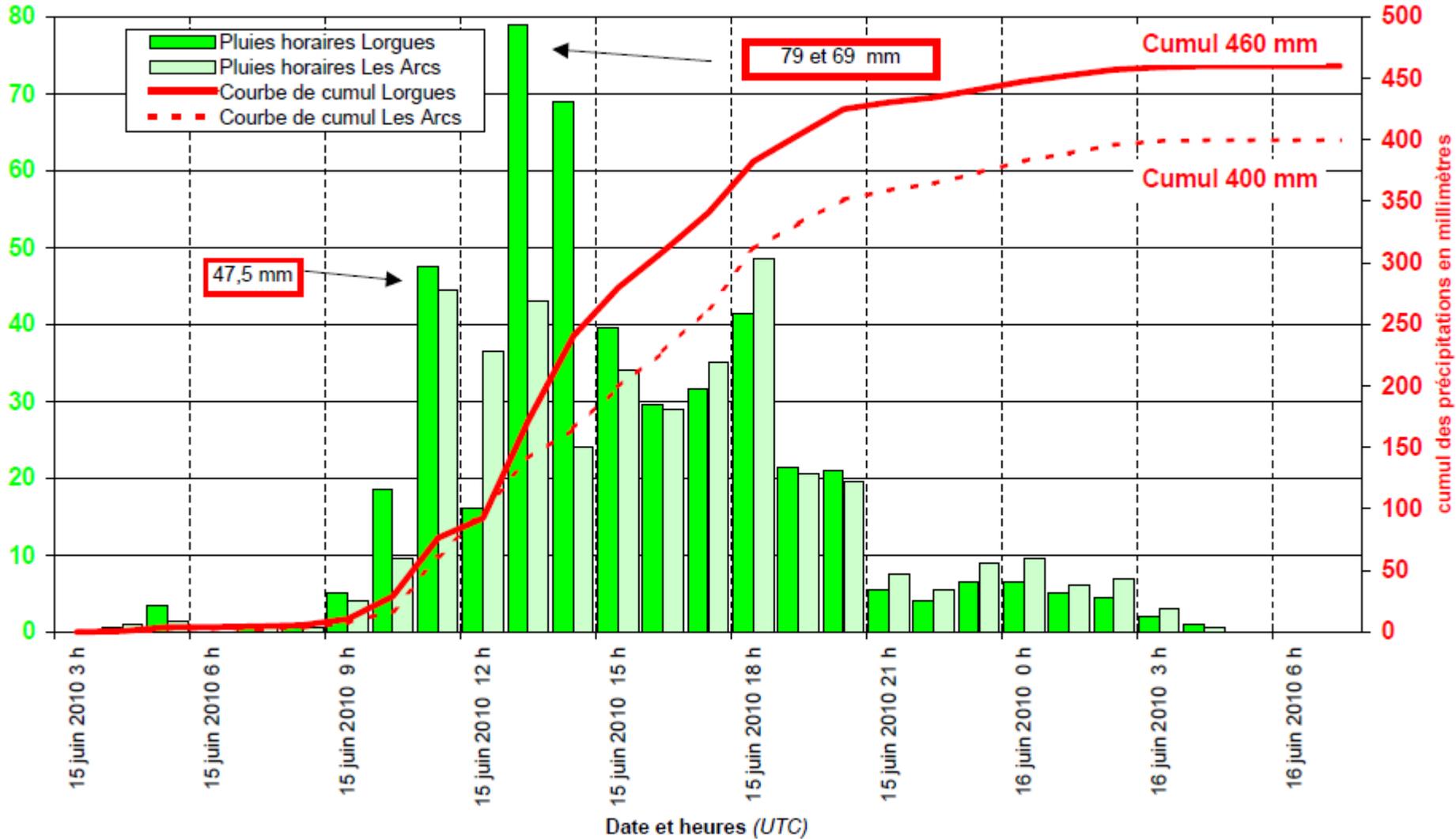
dont 420,2 mm en 12 h et 290 mm en 6 h

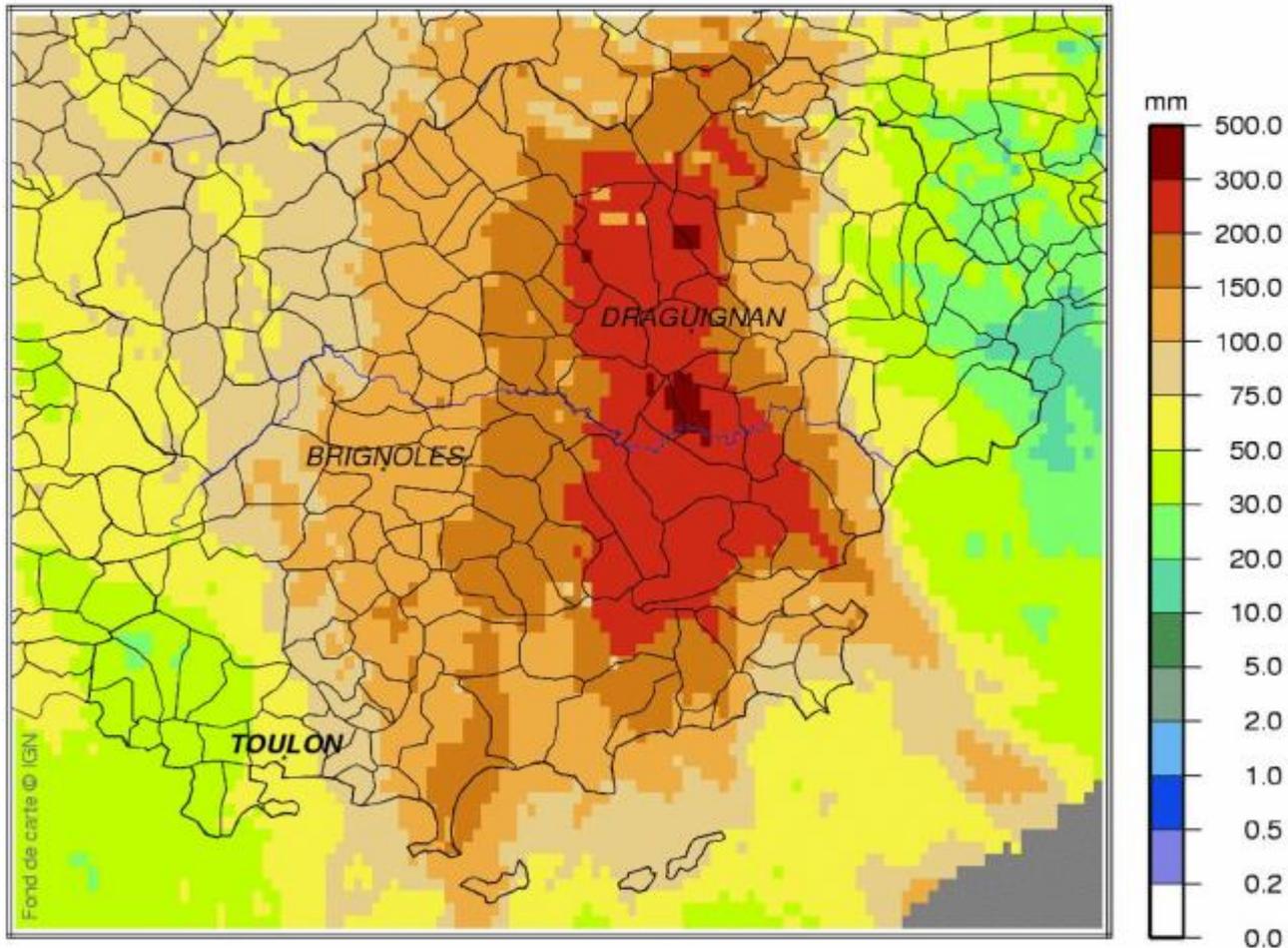
- avec entre 10 h et 18 h UTC :

des pointes d'intensités horaires successives de 47,5 mm 30 mm, 83,5 mm, 56,8 mm, 40 mm, 31,5 mm et 45,5 mm.

Les pointes d'intensités les plus fortes en 3 heures ont été de 82 mm, 187,2 mm et 102,8 mm.

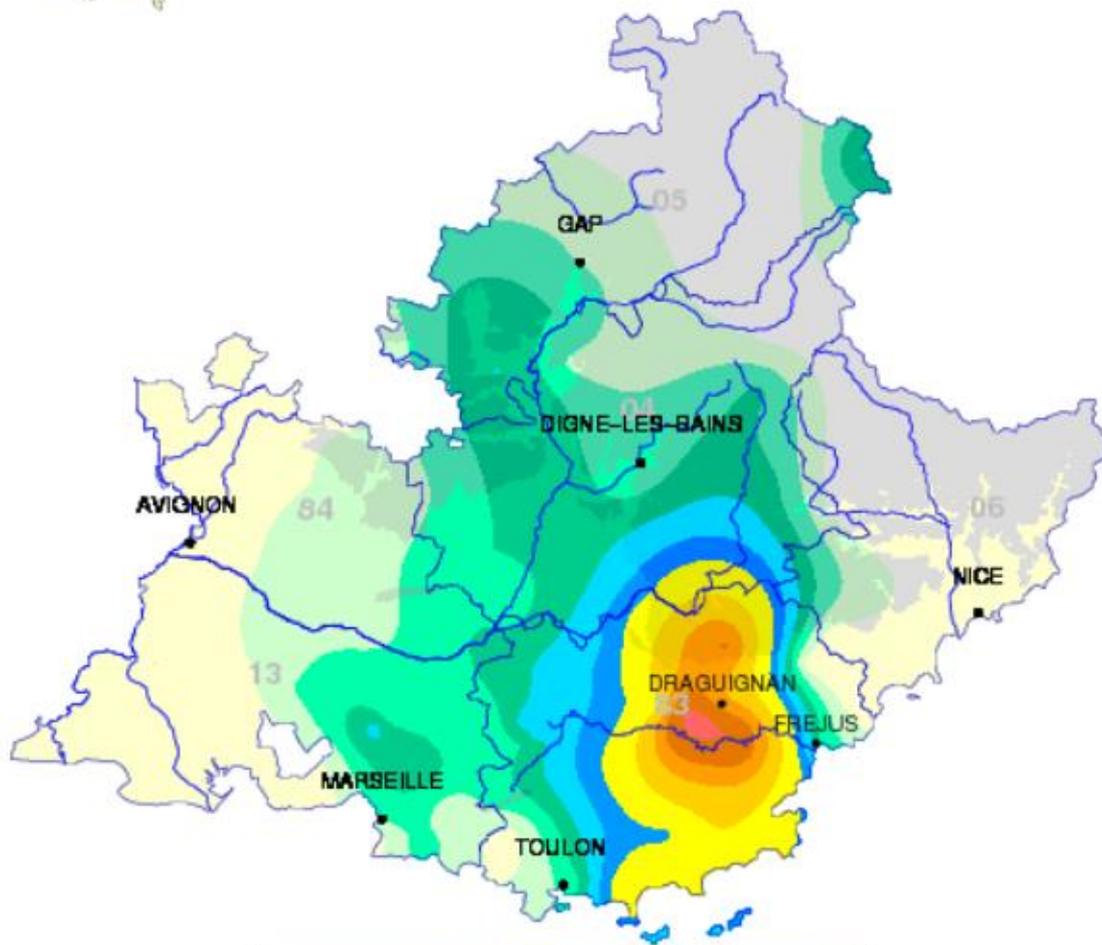
Précipitations comparées aux Arcs et à Lorgues - Source CIRAME - (Var)
du 15/06/2010 à 3h (UTC) au 16/06/2010 à 6h (UTC)





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



40 60 80 100 125 150 200 250 300 400 600 800

Cumul pluviométrique en 24 heures (mm)

le 16 06 2010 à 04 h UTC

Source: <http://pluiesextremes.meteo.fr>

EDITION SPECIALE VILLE DE DRAGUIGNAN

juillet 2010



MARDI 15 JUIN 2010 POUR NE RIEN OUBLIER



En mémoire de toutes les victimes...



En quelques minutes, aux alentours de 18 h, le quartier Saint Hermentaire et les Florentins sont submergés par des eaux furieuses. Les sinistrés ne devront leur salut qu'aux hélicoptères et à leur fuite par les toits de leurs maisons.



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://météofrance.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 \neq Evapotranspiration

Quels paramètres influencent l'évaporation et l'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 $DE = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$

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).

1.2.3- Infiltration

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

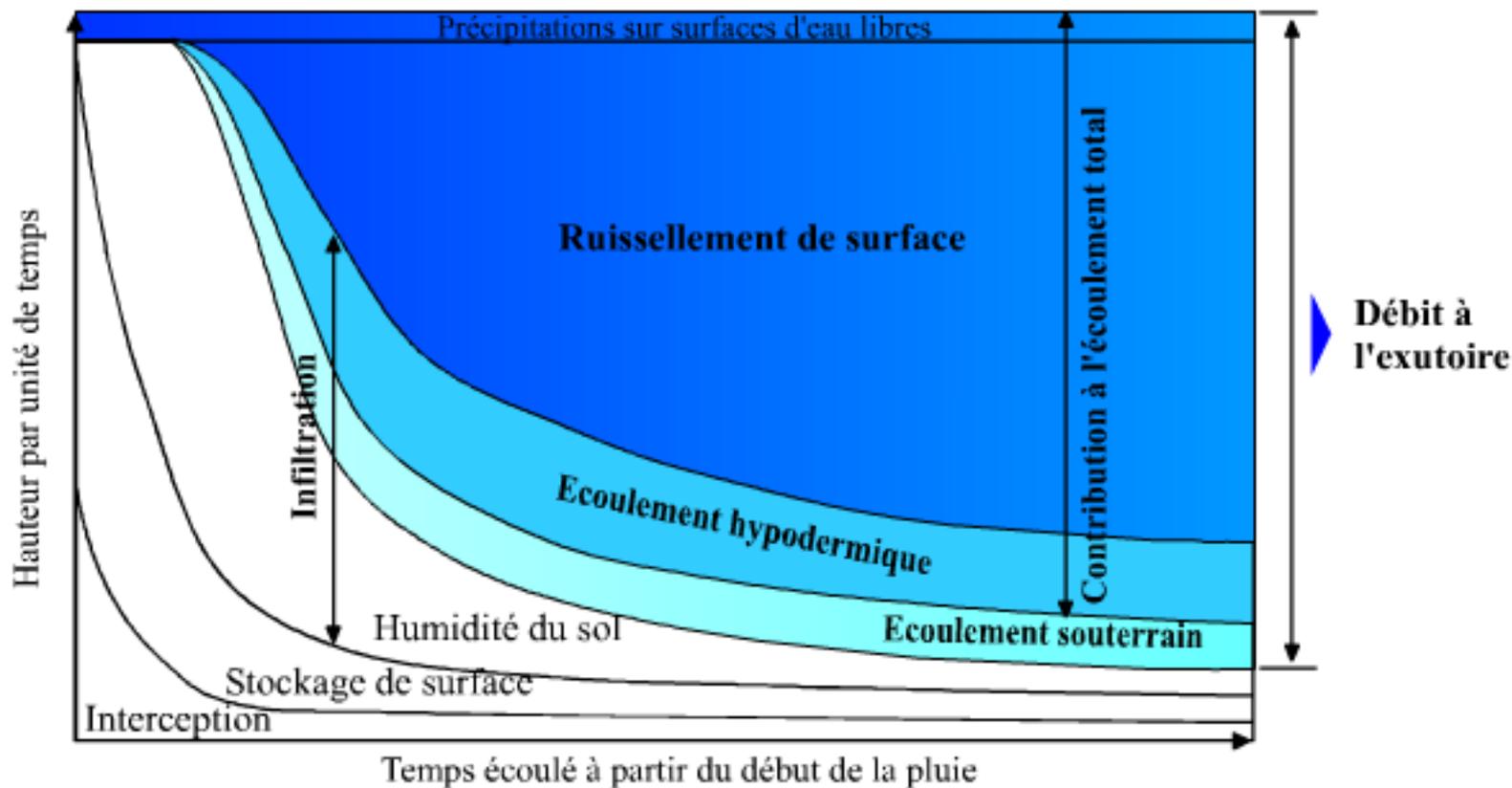
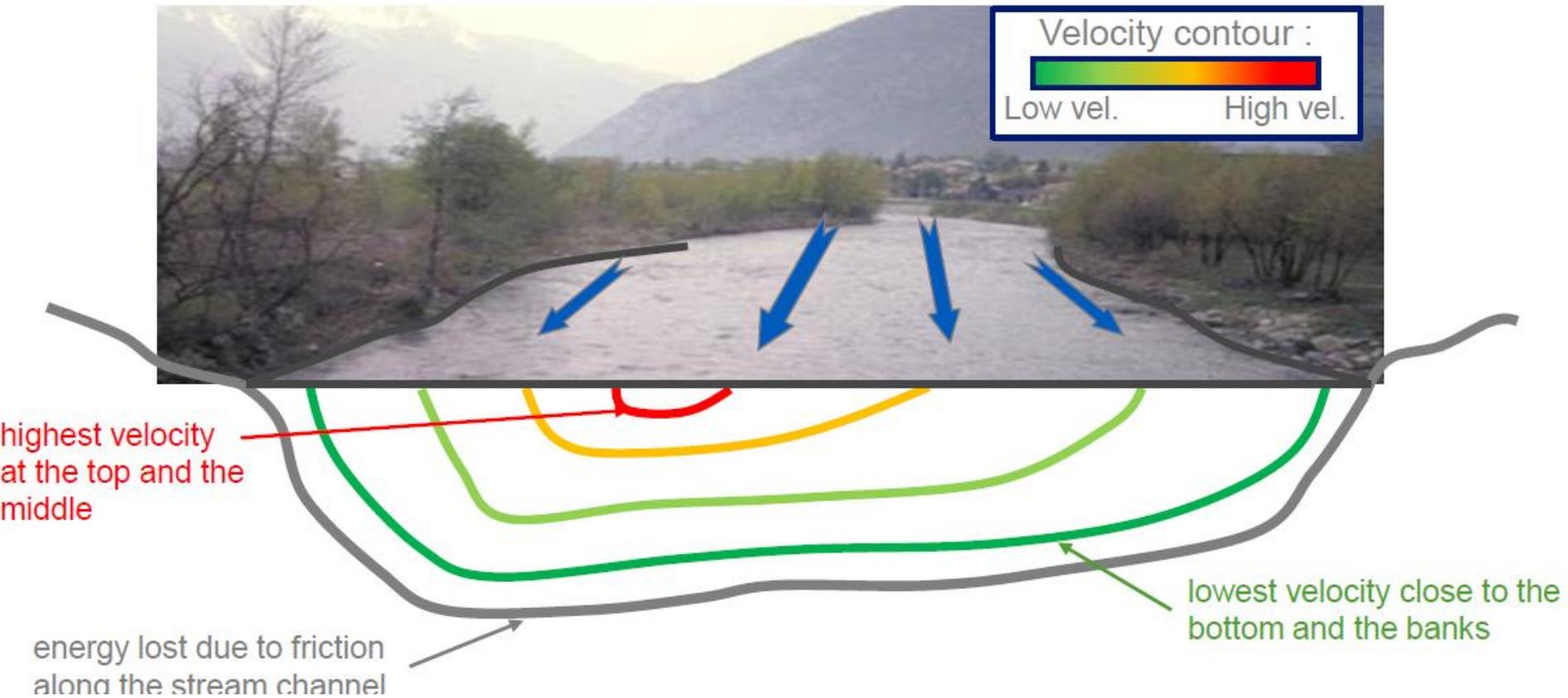
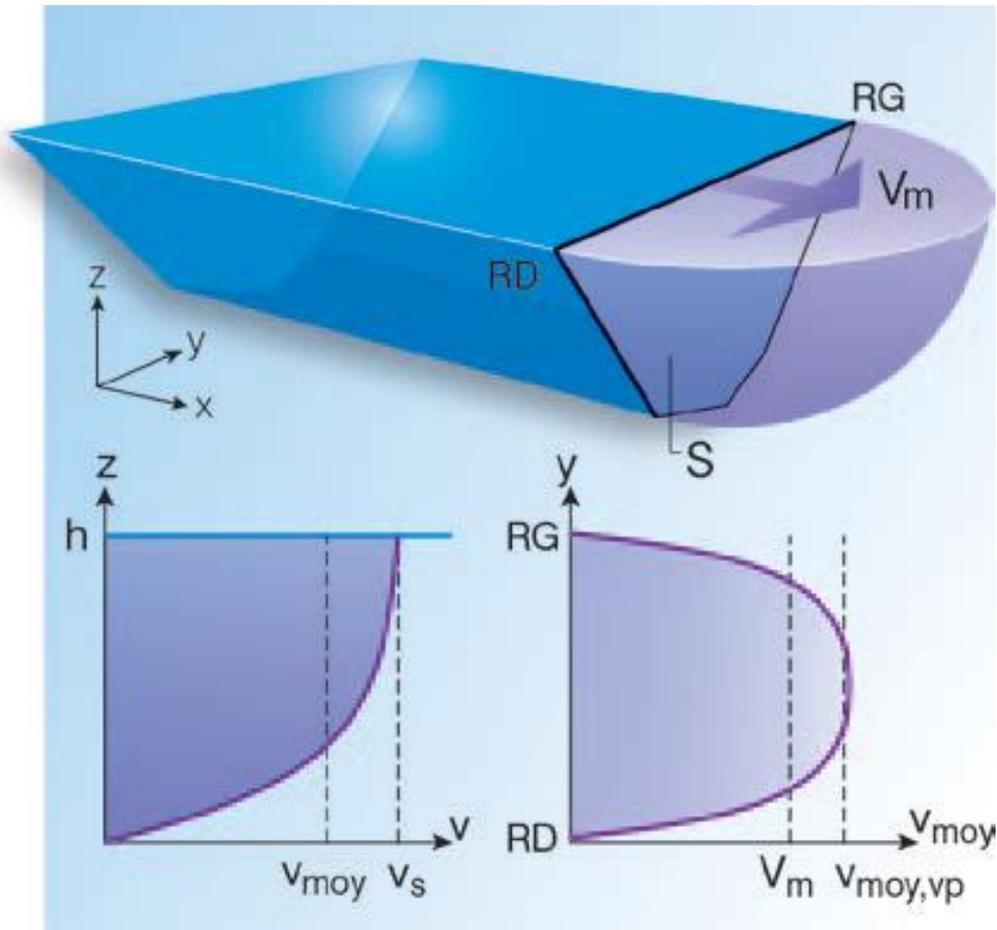


Fig. 5. 9 - Répartition de la hauteur de précipitations au cours d'une averse d'intensité constante (d'après Rémériéras, 1976).

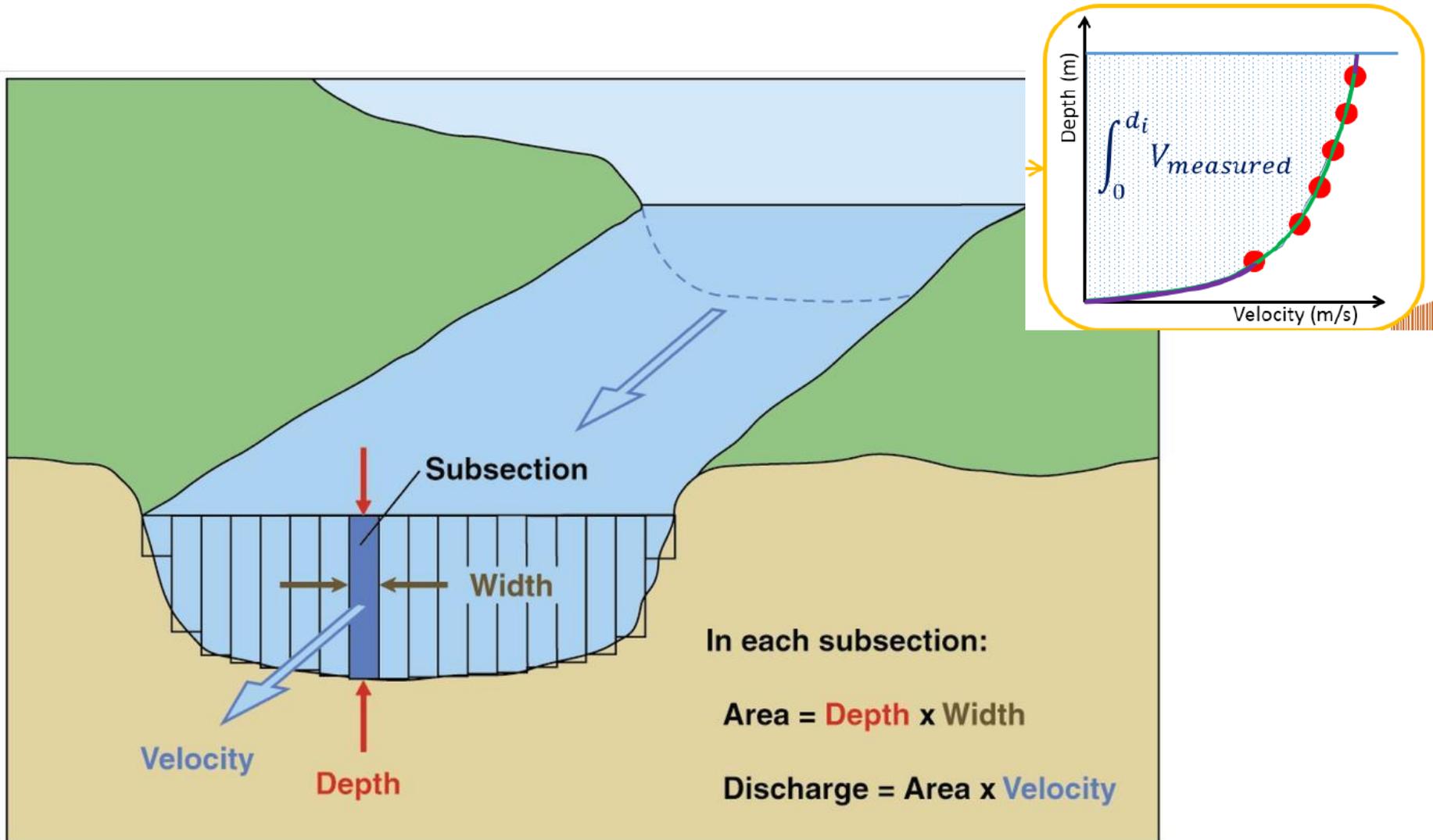
1.2.4- Débit des cours d'eau



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



Mesure du débit d'un cours d'eau



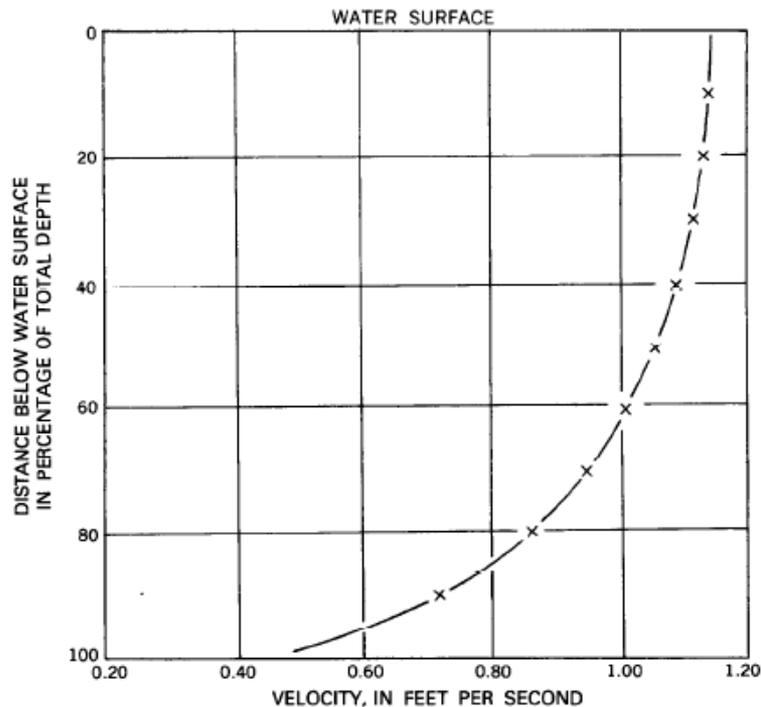


FIGURE 88.—Typical vertical-velocity curve.

TABLE 2.—Coefficients for standard vertical-velocity curve

Ratio of observation depth to depth of water	Ratio of point velocity to mean velocity in the vertical	alpha
0.05	1.160	0.86
.1	1.160	0.86
.2	1.149	0.87
.3	1.130	0.88
.4	1.108	0.90
.5	1.067	0.93
.6	1.020	0.98
.7	.953	1.05
.8	.871	1.15
.9	.746	1.34
.95	.648	1.54

$$Q = V_{\text{moyenne}} \cdot \text{Section d'écoulement}$$

$$V_{\text{moyenne}} = \alpha \cdot V_{\text{surface}}$$

alpha : coefficient qui dépend du site

- Largeur du cours d'eau
- Profondeur
- Rugosité du fond

...

alpha = 2/3 à 0,9 (environ)

Type d'écoulement	moyen	lisse	rugueux	très rugueux
Paramètre m (ISO748)	6 - 7	10	4	2 - 3
$\alpha = m / (m+1)$ (coefficient de vitesse)	0,86 - 0,87	0,91	0,80	0,67 - 0,75

Notice utilisation logiciel BAREME (P.M. Bechon)

1- Quantification du cycle de l'eau

1.1- Le cycle de l'eau

1.2- Matériel et mesures du cycle de l'eau

1.2.1- Précipitations

1.2.2- Evaporation et évapotranspiration

1.2.3- Infiltration

1.2.4- Débit des cours d'eau

1.2.5- Eau souterraine



Où accéder à l'eau souterraine?

Source

Forage ou puits

(piézomètre)



Grottes

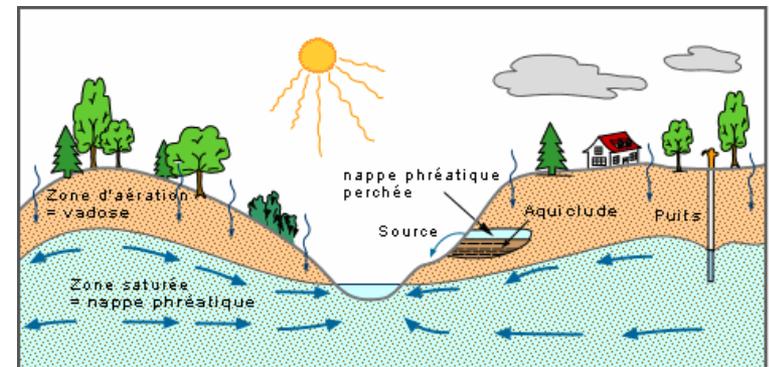
1.2.5- Eau souterraine

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

Où accéder à l'eau souterraine?

Comment la quantifier?

- Variations de stock : bilan hydrique, satellite (GRACE)
- Débit d'une source
- Calcul de débit d'une nappe d'eau souterraine



➔ Les prochains chapitres de ce cours

Voir le ppt avec les photos de terrain

1- Quantification du cycle de l'eau

1.1- Le cycle de l'eau

1.2- Matériel et mesures du cycle de l'eau

1.2.1- Précipitations

1.2.2- Evaporation et évapotranspiration

1.2.3- Infiltration

1.2.4- Débit des cours d'eau

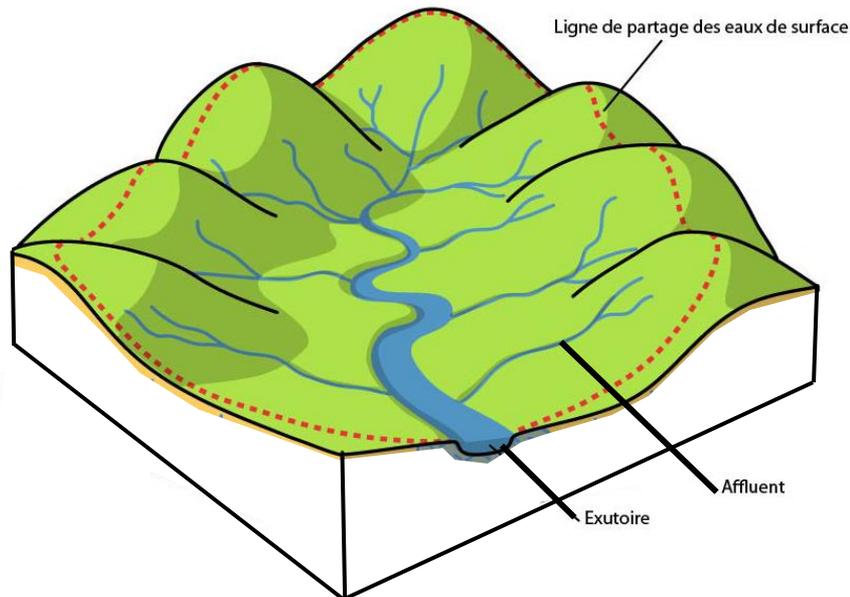
1.2.5- Eau souterraine

1.3- Bassins versants et bilan hydrologique

BASSIN VERSANT

Le bassin versant représente ----- sur laquelle se base l'analyse du ----- et de ses -----.

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



BASSIN VERSANT

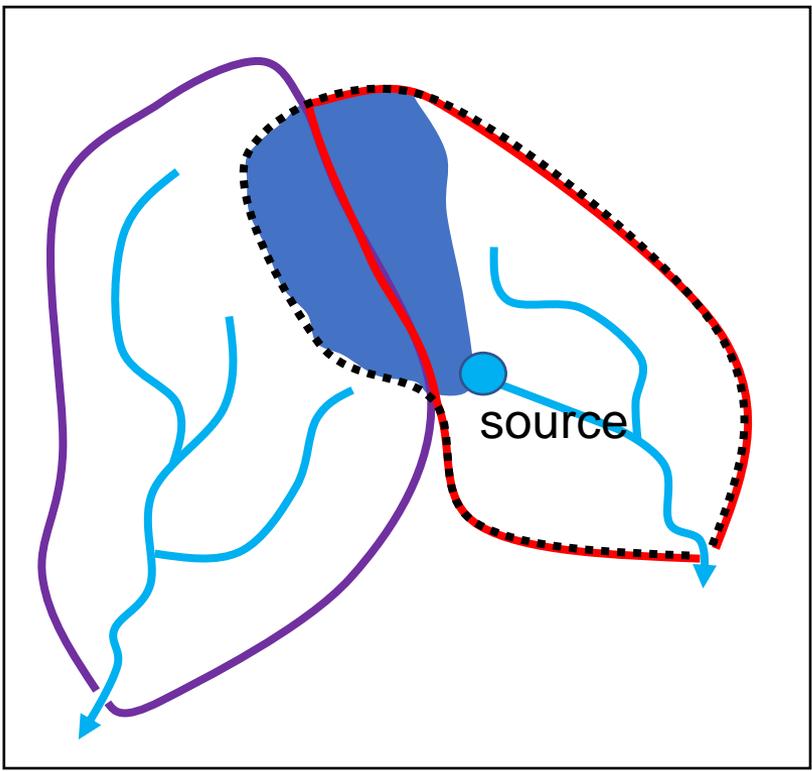
Le *bassin versant*

Le *bassin versant hydrologique*

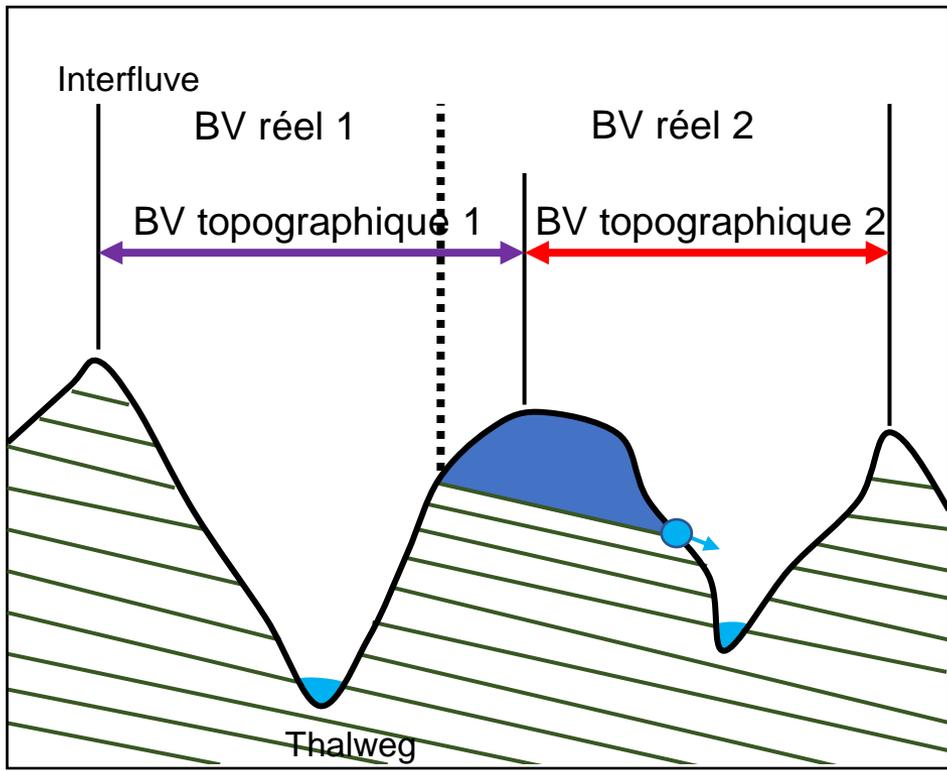
Le *bassin versant hydrogéologique, ou réel*, tient compte des
----- . Il diffère du bassin versant
hydrologique en fonction de la -----
à l'affleurement et en profondeur.

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

Plan



Coupe

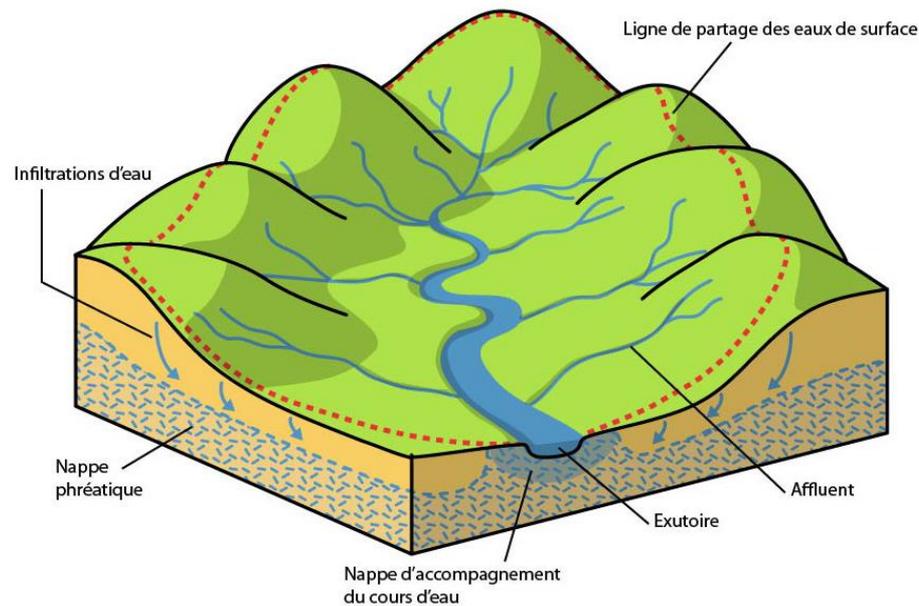


- Bassin versant topographique 1
- Bassin versant topographique 2

- Bassin versant réel 2
- zone karstique

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

Entrées | Sorties + Variations de stock



© Source Alsace Nature

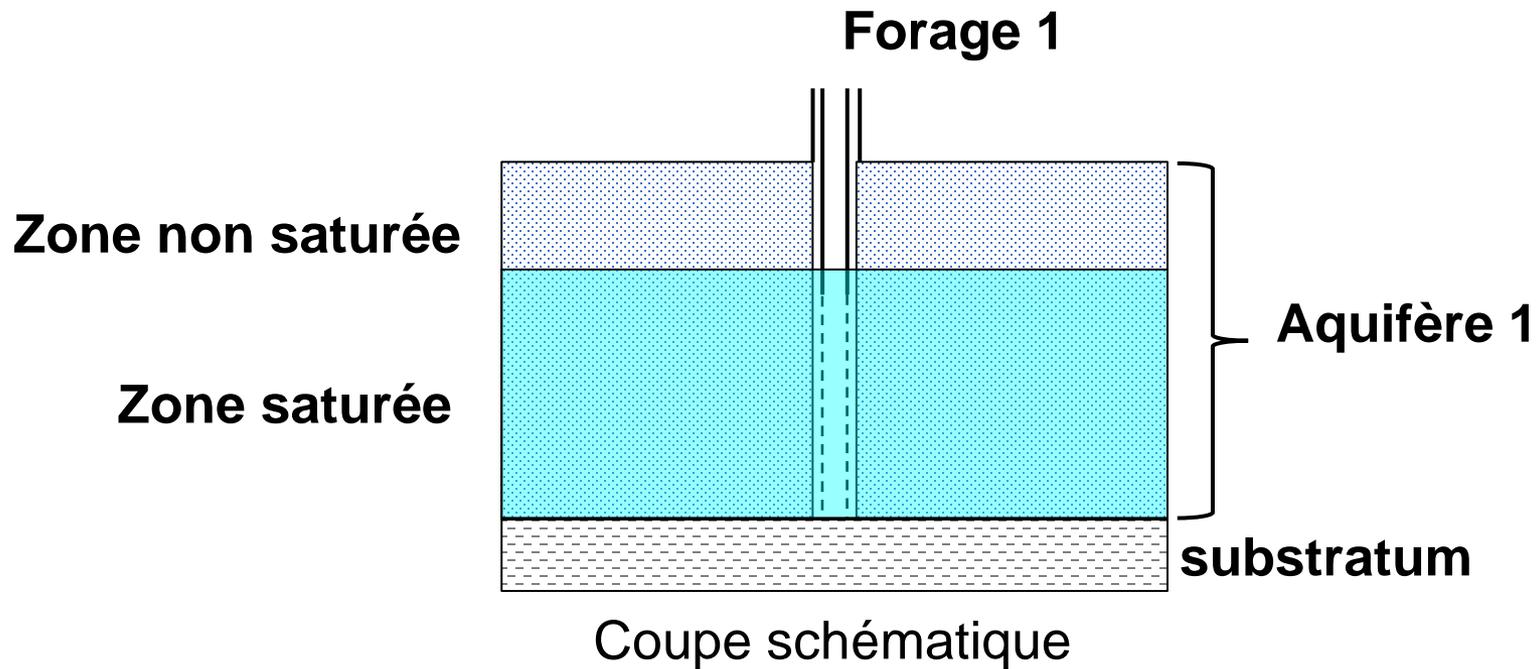
<http://www.syribt.fr/notre-territoire/definition/>

1- Quantification du cycle de l'eau

2- Les définitions indispensables de l'hydrogéologie

AQUIFÈRE

Un *aquifère* est un corps (couche, massif) de roches ...



AQUIFÈRE

AQUITARD

Un *aquitard* est une formation géologique ...

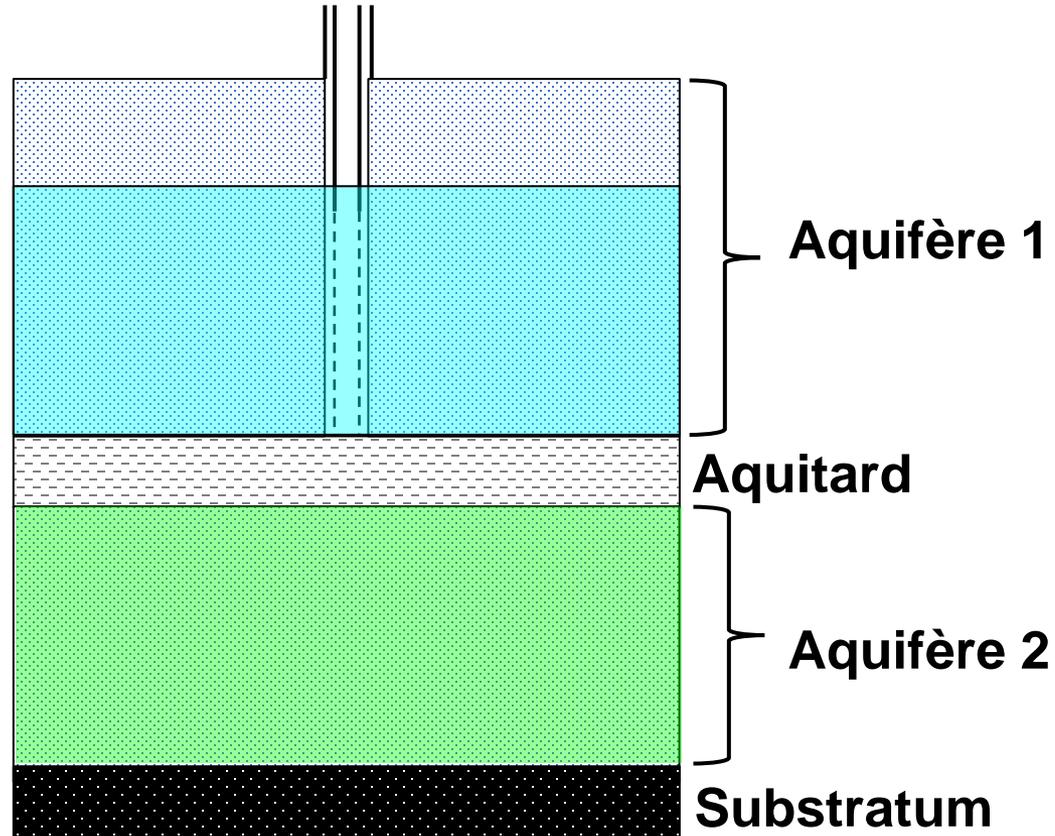
Ces formations peuvent assurer la communication entre des aquifères superposés par le phénomène de -----.

Forage 1

Zone non saturée

Zone saturée

Zone saturée



Aquifère 1

Aquitard

Aquifère 2

Substratum

Coupe schématique

AQUIFÈRE

AQUITARD

AQUICLUDE

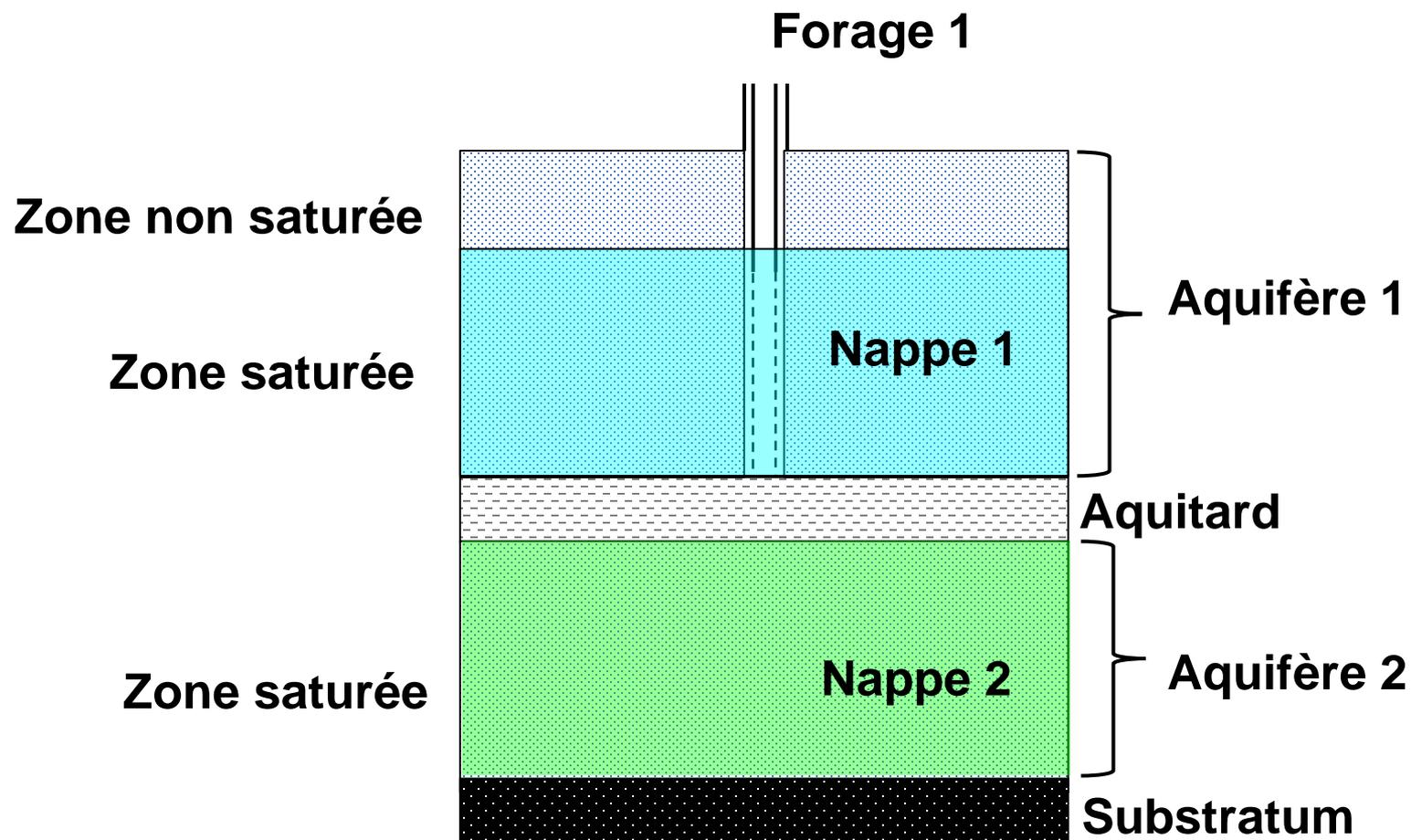
Les *aquicludes* sont des formations ...

NAPPE (ou nappe d'eau souterraine)

...

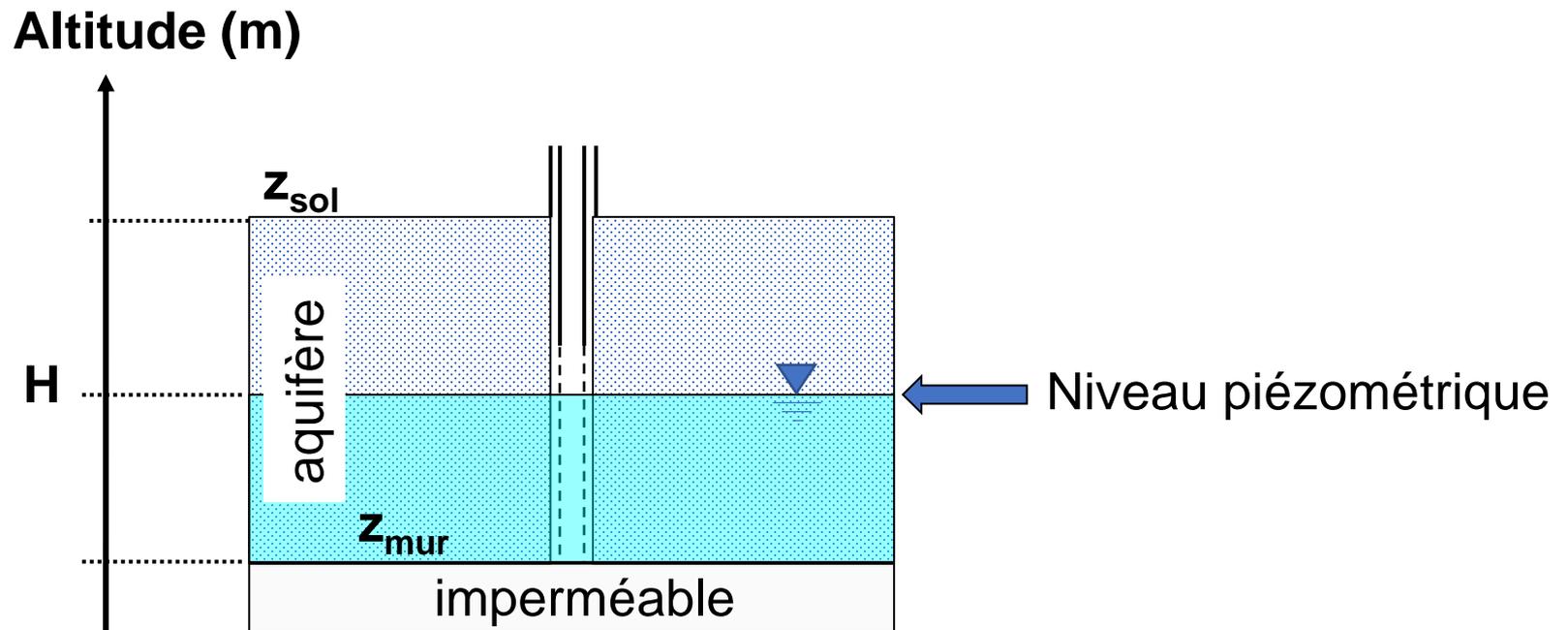
...

(définition de Margat et Castany).



Niveau piézométrique

Le niveau piézométrique est ...



Coupe schématique

1- Quantification du cycle de l'eau

2- Les définitions indispensables de l'hydrogéologie

3- Écoulement de l'eau souterraine dans la nature

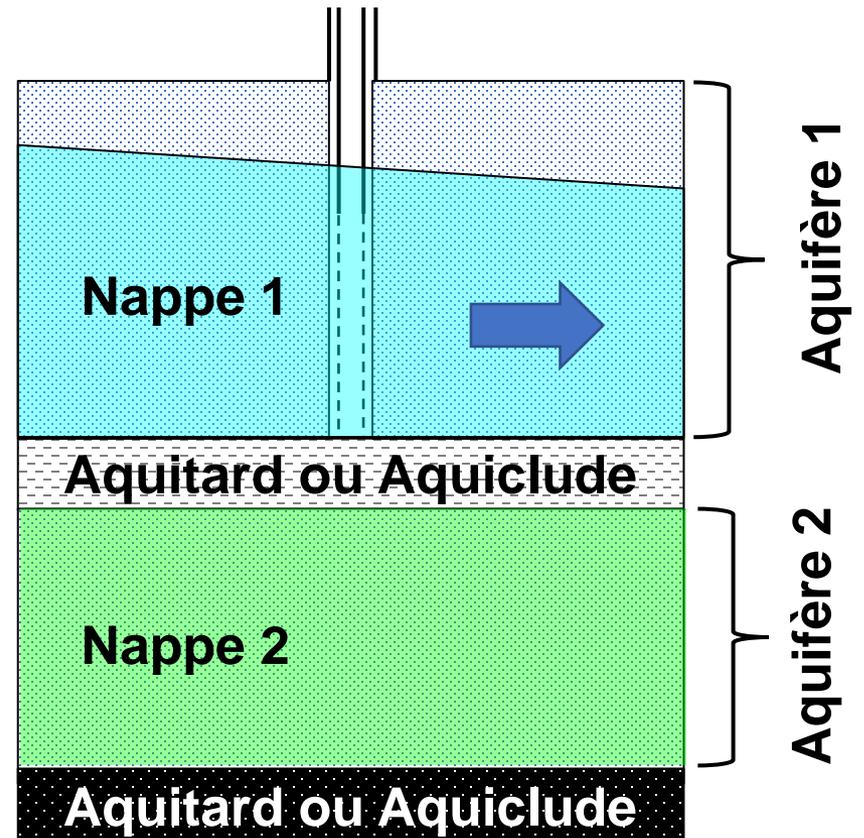
3.1- Écoulement et niveau piézométrique

3.1- Écoulement et niveau piézométrique

Niveau piézométrique

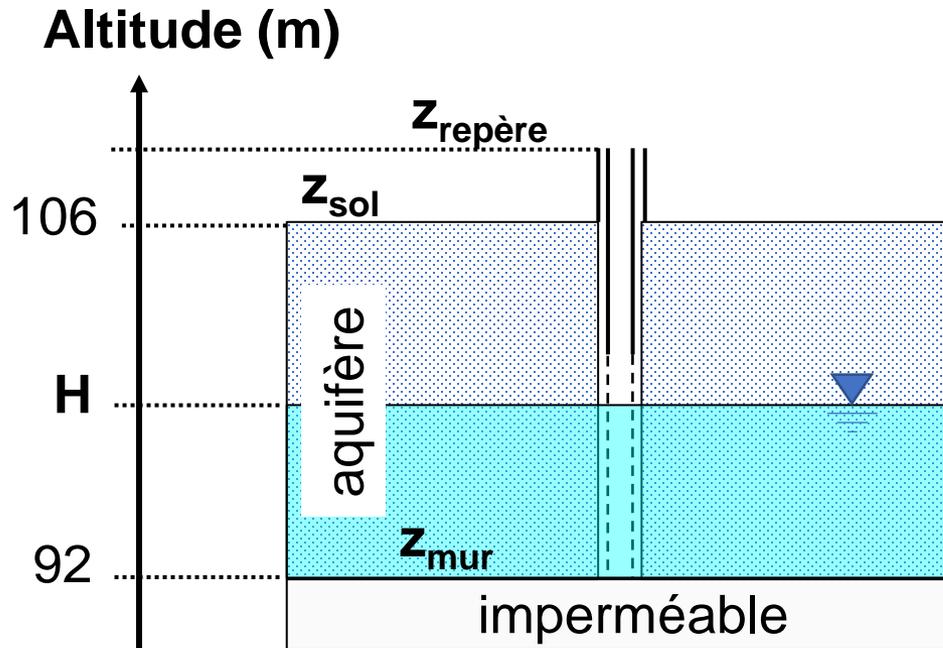
Altitude

Forage 1



Coupe schématique

Coupe schématique



Niveau piézométrique

Profondeur de l'eau : 4,85 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.



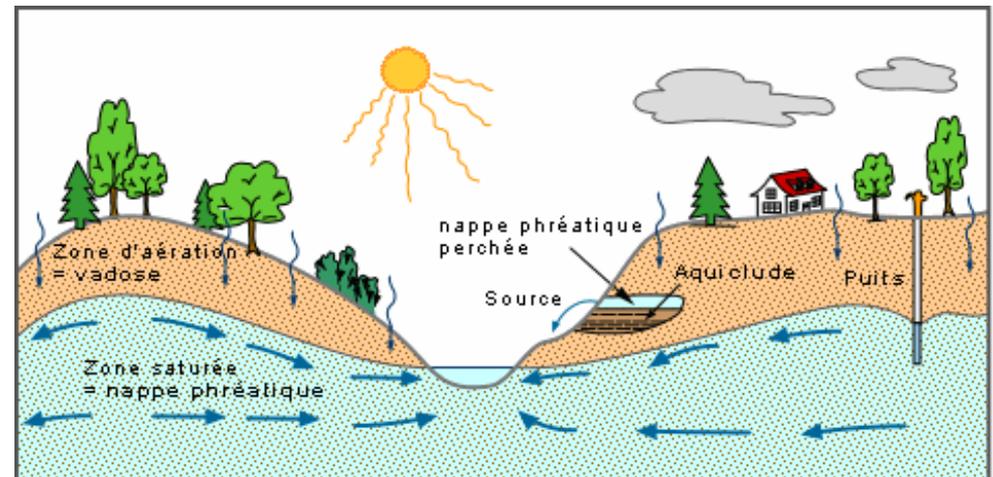
1- Quantification du cycle de l'eau

2- Les définitions indispensables de l'hydrogéologie

3- Écoulement de l'eau souterraine dans la nature

3.1- Écoulement et niveau piézométrique

3.2- Nappe libre



1- Quantification du cycle de l'eau

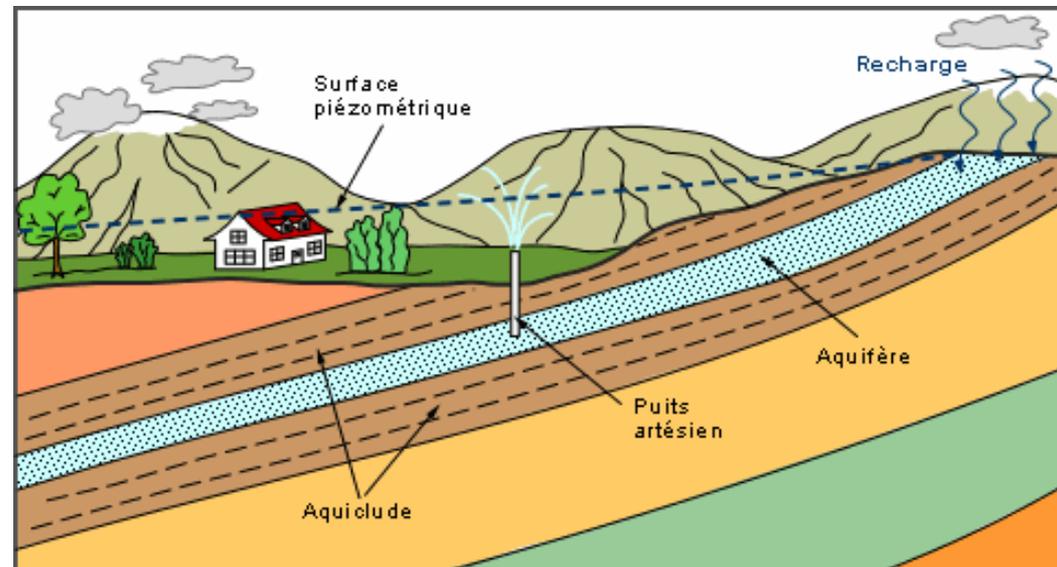
2- Les définitions indispensables de l'hydrogéologie

3- Écoulement de l'eau souterraine dans la nature

3.1- Écoulement et niveau piézométrique

3.2- Nappe libre

3.3- Nappe captive



1- Quantification du cycle de l'eau

2- Les définitions indispensables de l'hydrogéologie

3- Écoulement de l'eau souterraine dans la nature

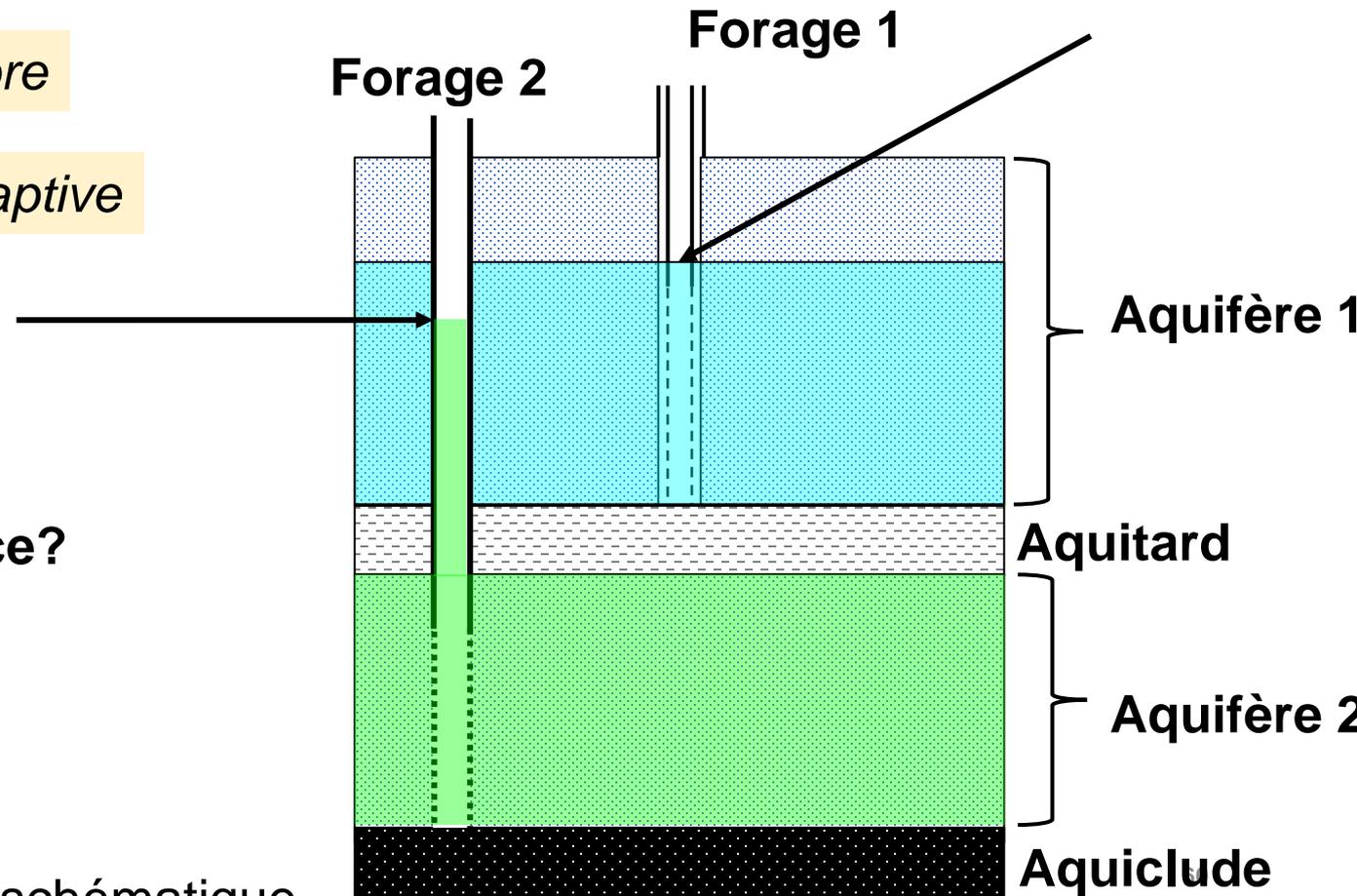
3.1- Écoulement et niveau piézométrique

3.2- Nappe libre

3.3- Nappe captive

Sens de la drainance?

Coupe schématique



1- Quantification du cycle de l'eau

2- Les définitions indispensables de l'hydrogéologie

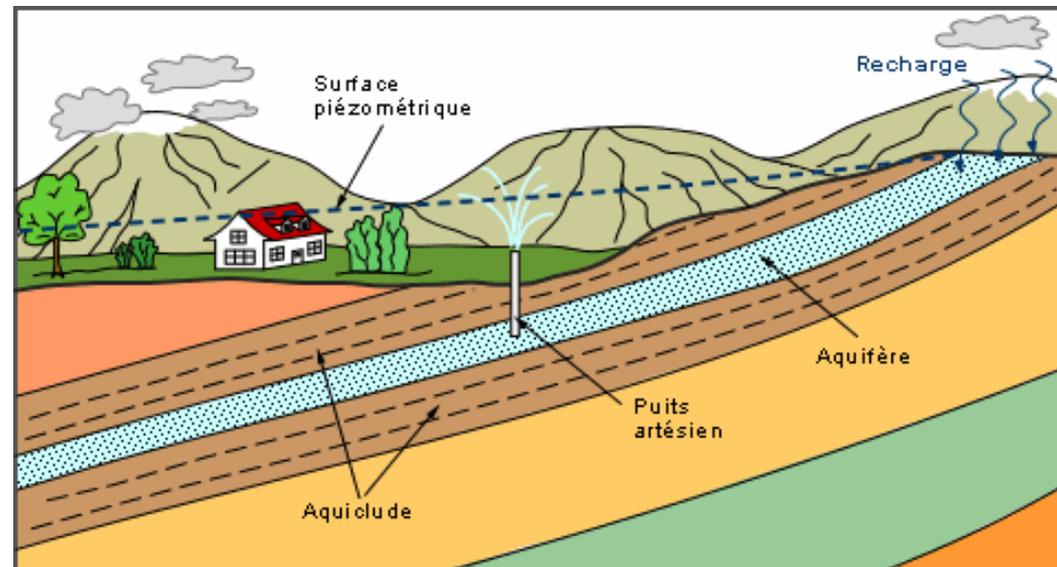
3- Écoulement de l'eau souterraine dans la nature

3.1- Écoulement et niveau piézométrique

3.2- Nappe libre

3.3- Nappe captive

3.4- Nappe captive artésienne



1- Quantification du cycle de l'eau

2- Les définitions indispensables de l'hydrogéologie

3- Écoulement de l'eau souterraine dans la nature

3.1- Écoulement et niveau piézométrique

3.2- Nappe libre

3.3- Nappe captive

3.4- Nappe captive artésienne

3.5- Allure de la surface piézométrique

1- Quantification du cycle de l'eau

2- Les définitions indispensables de l'hydrogéologie

3- Écoulement de l'eau souterraine dans la nature

3.1- Écoulement et niveau piézométrique

3.2- Nappe libre

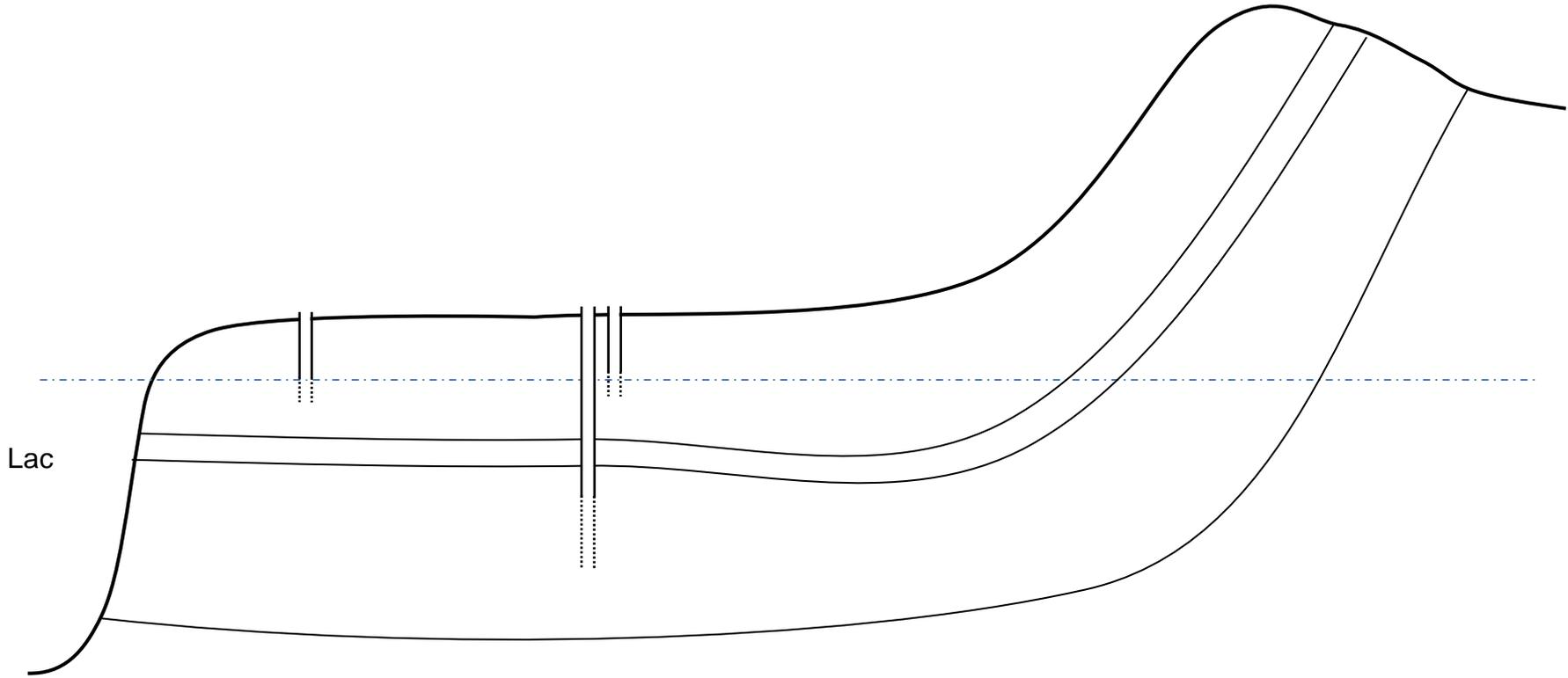
3.3- Nappe captive

3.4- Nappe captive artésienne

3.5- Allure de la surface piézométrique

3.6- Synthèse des différents types de nappes et de leurs zones de recharge associées

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



Propriétés hydrogéologiques



1- Quantification du cycle de l'eau

2- Les définitions indispensables de l'hydrogéologie

3- Écoulement de l'eau souterraine dans la nature

4- La carte piézométrique

4.1- Définitions

4.2- Tracé

4.3- Objectifs

4.4- Relations aux limites

4.5- Cas d'étude complémentaires

4.5.1- Cours d'eau déconnecté de la nappe

4.5.2- Stockage dans les berges

4.5.3- Effet d'un pompage

- *Inversion du sens d'écoulement nappe-rivière*
- *Zone d'appel du forage*

Carte piézométrique : voir ppt

1- Quantification du cycle de l'eau

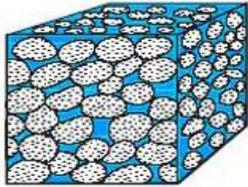
2- Les définitions indispensables de l'hydrogéologie

3- Écoulement de l'eau souterraine dans la nature

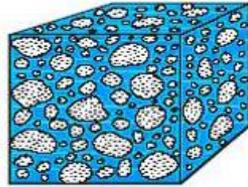
4- La carte piézométrique

5- Théorie de l'écoulement de l'eau souterraine en milieu poreux

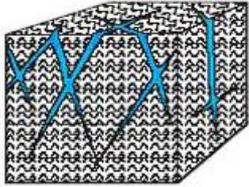
5.1- Qu'est-ce qu'un milieu poreux (VS milieu fissuré et milieu karstique)



Well-sorted sand



Poorly sorted sand



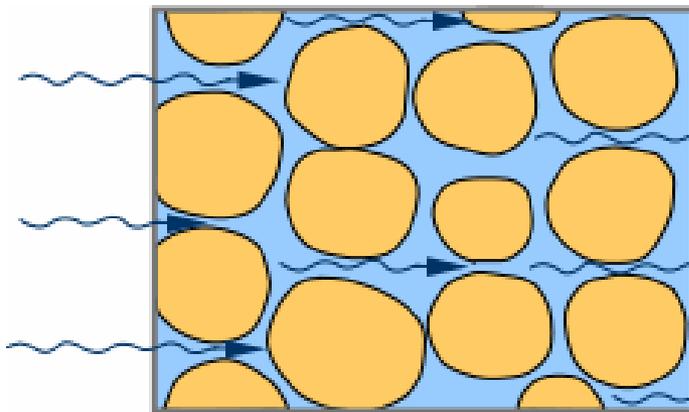
Fractures in granite

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

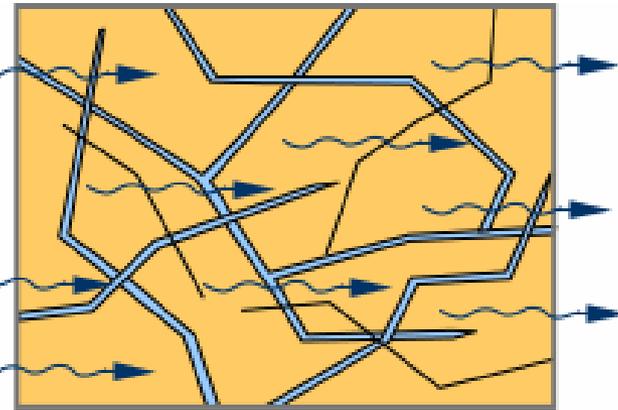
arène granitique (poreux)



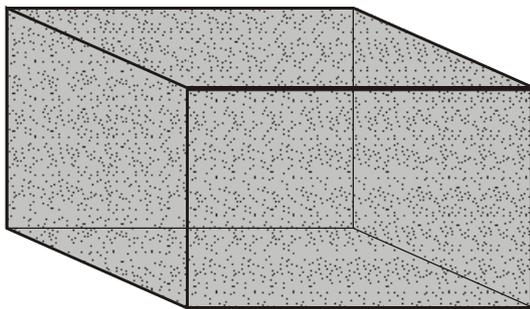
granite sain fracturé



Milieu poreux



Milieu fracturé

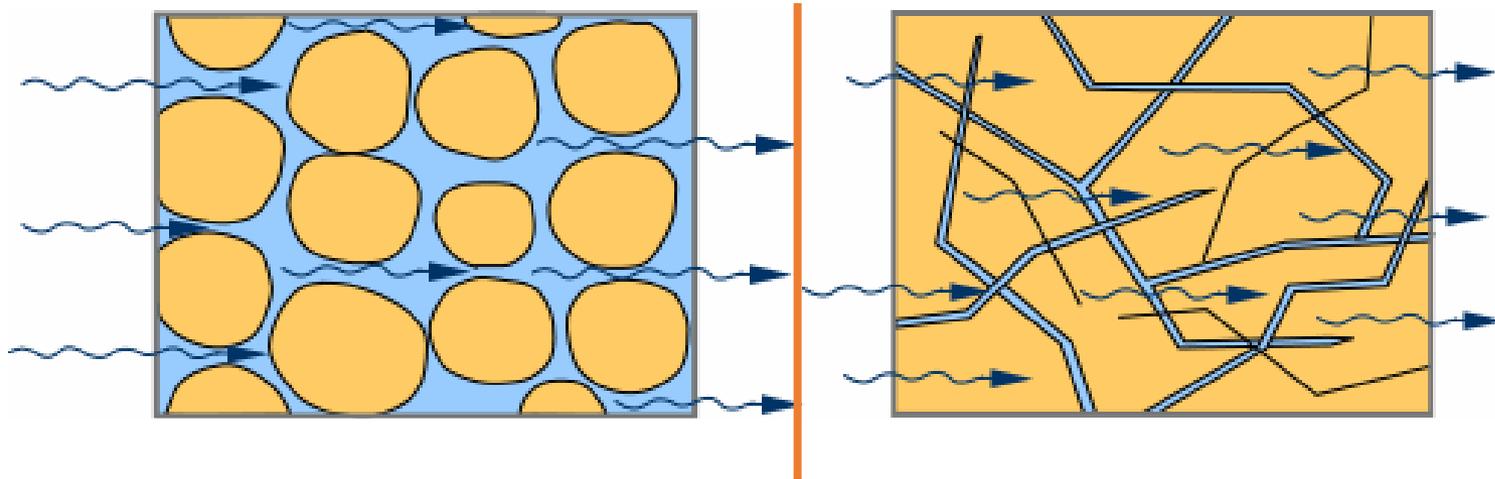


matrice



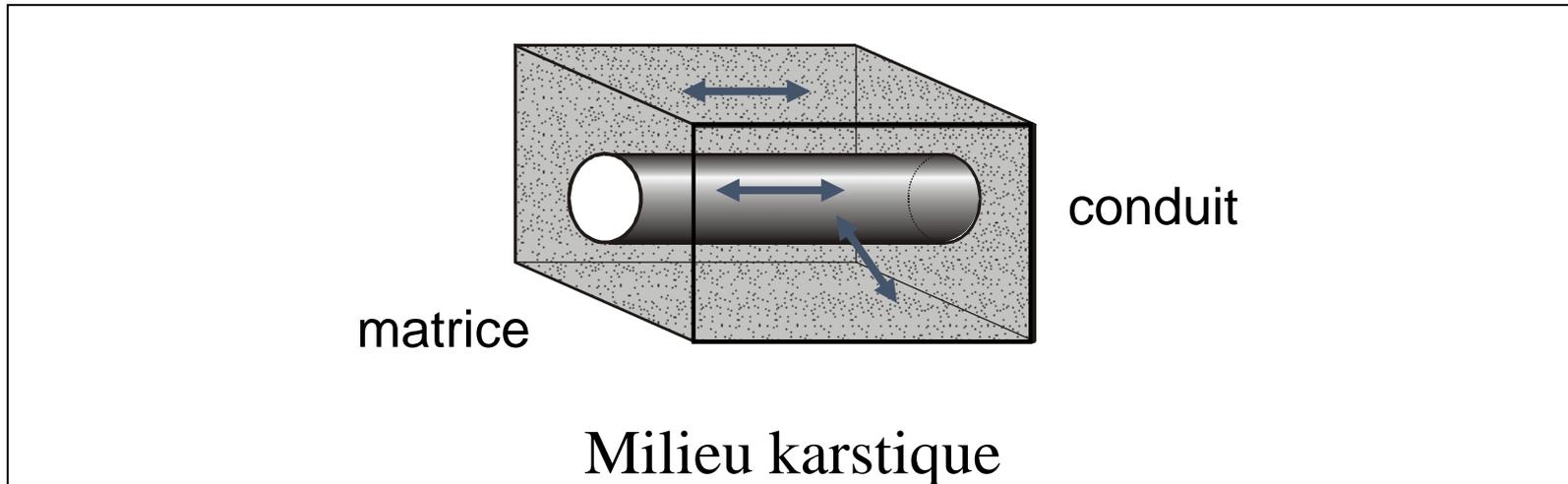
conduit

Milieu karstique



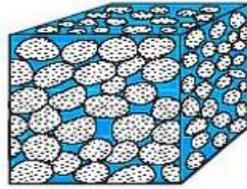
Milieu poreux

Milieu fracturé

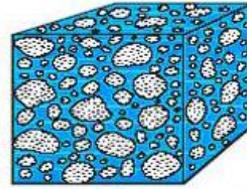


Milieu karstique

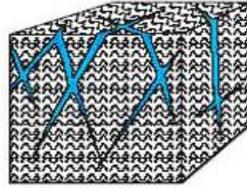
http://www.uved.fr/modules/moduleDynResNat/html/m2c2_m2c2_p3_m2c2p3sp3_1.html



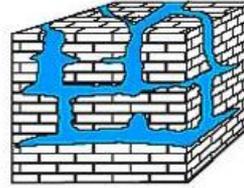
Well-sorted sand



Poorly sorted sand



Fractures in granite



Caverns in limestone

Conduit



Foux de Nans les Pins, France

Karst

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

arène granitique (poreux)



granite sain fracturé

Matrice

Calcaire du Plattenkalke, Crète



Conduit

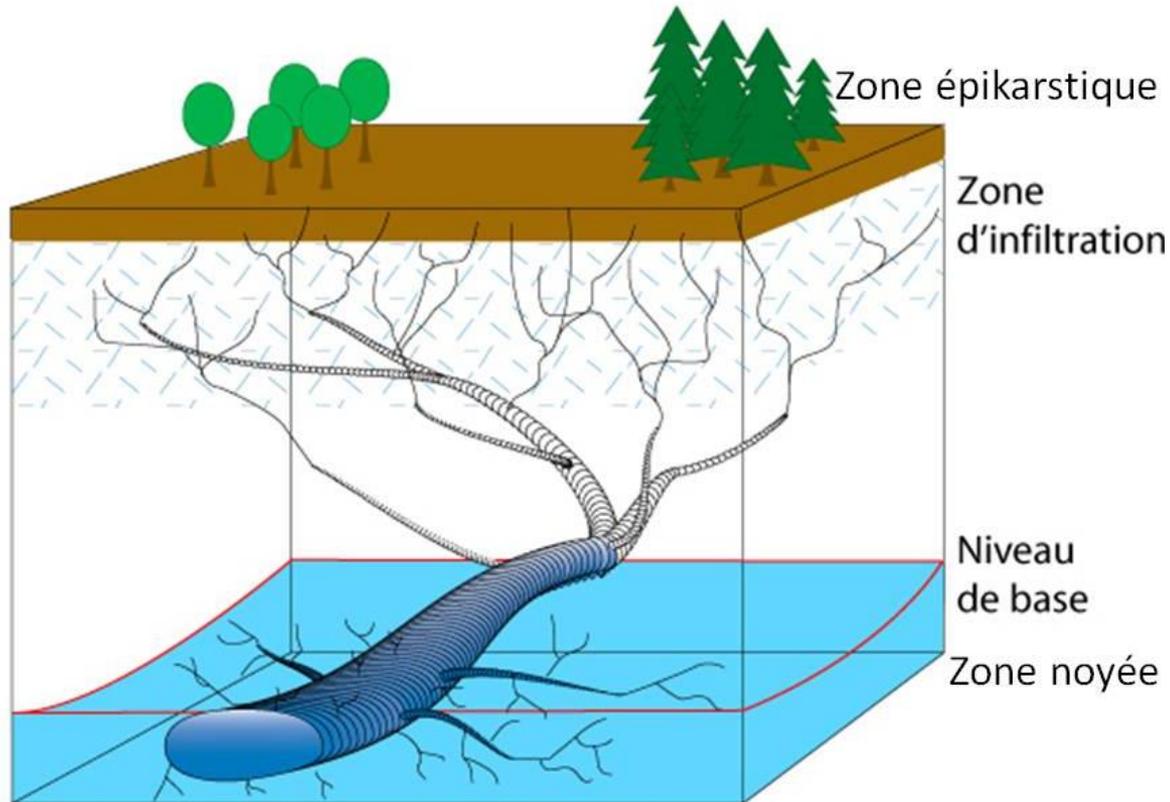


Matrice



→ Deux structures qui influencent l'écoulement et le transport

Une caractéristique fondamentale : Hiérarchisation des écoulements vers un drain principal

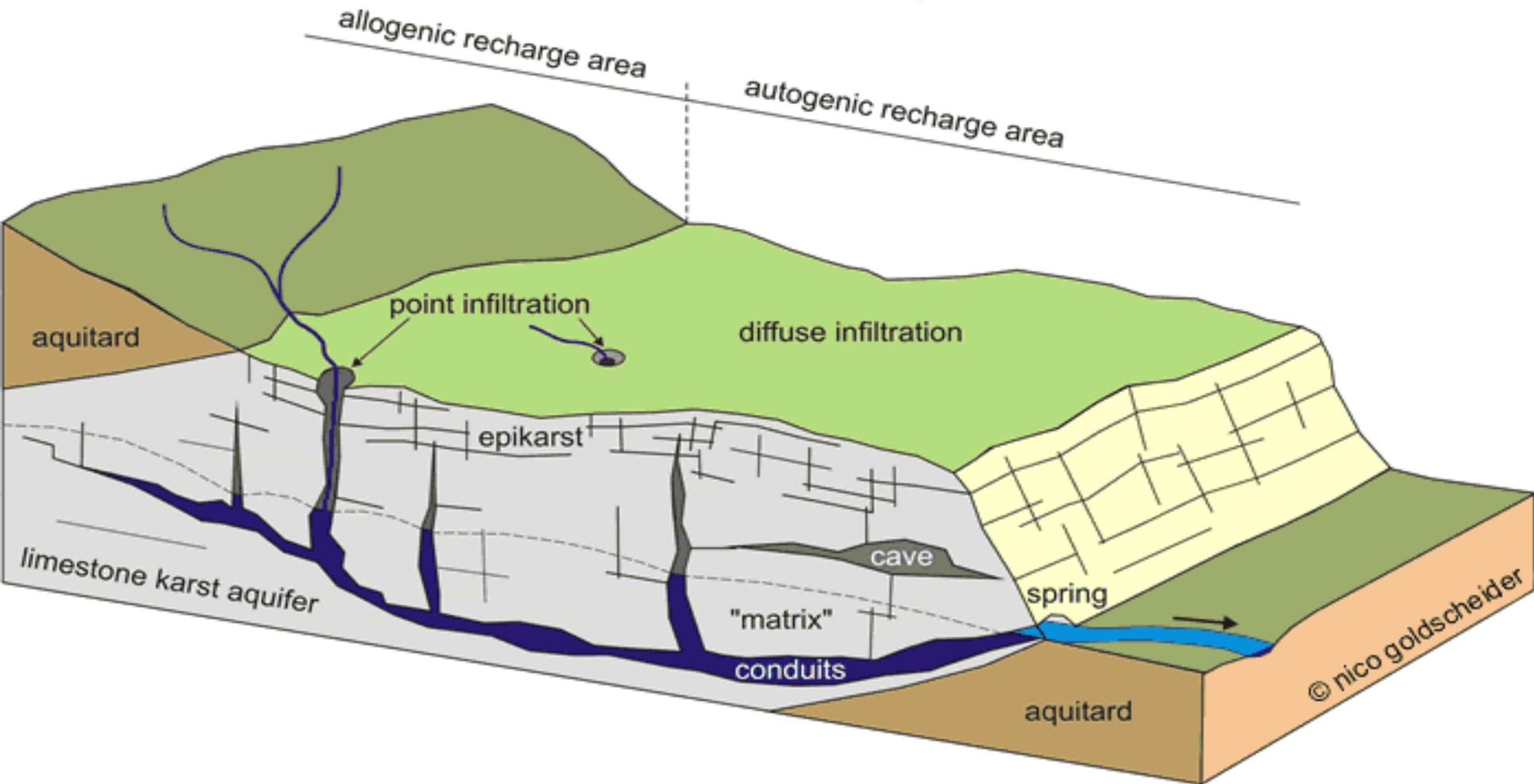


Perrette, 1999

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

crue de janvier 1999

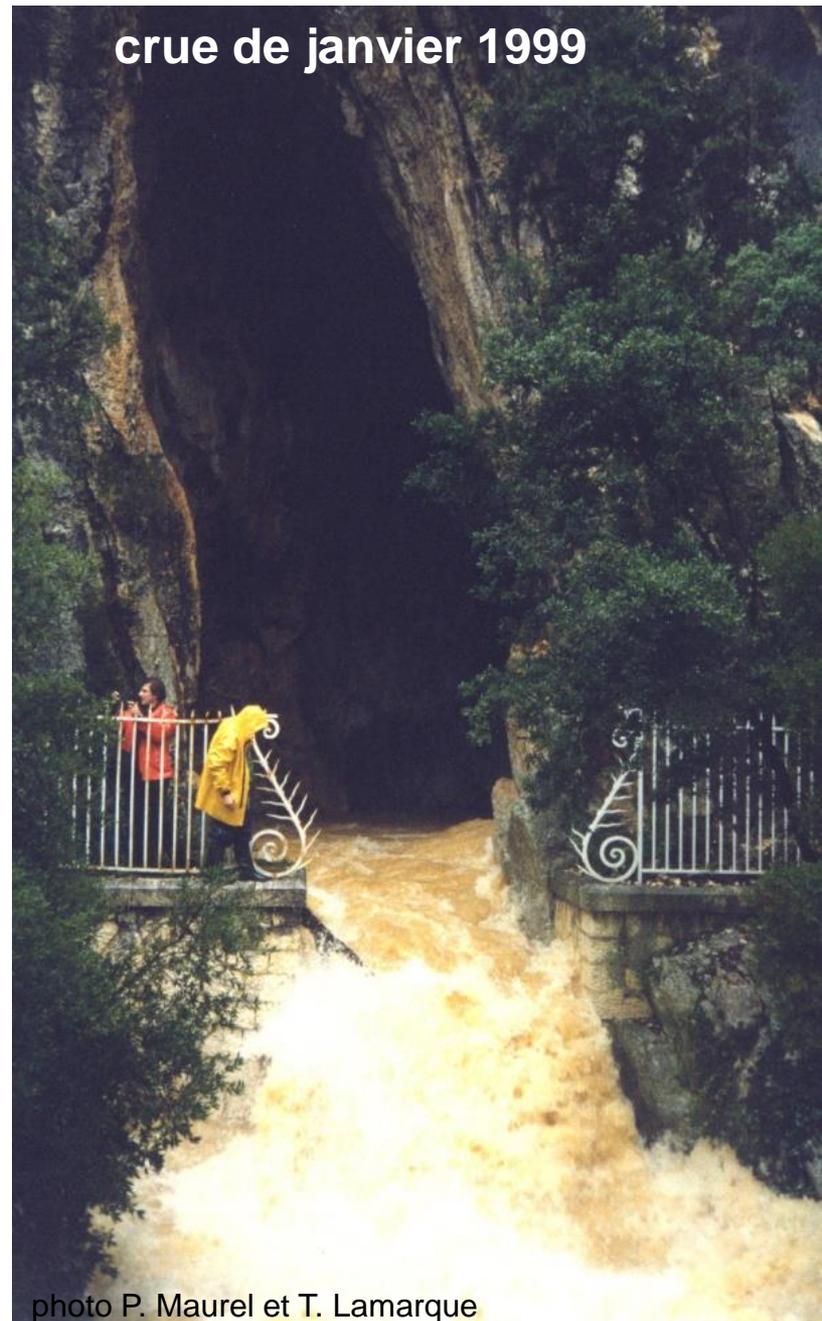
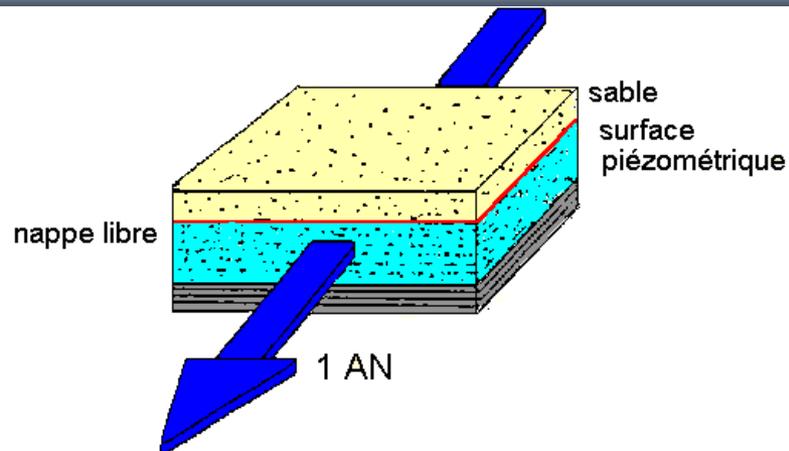


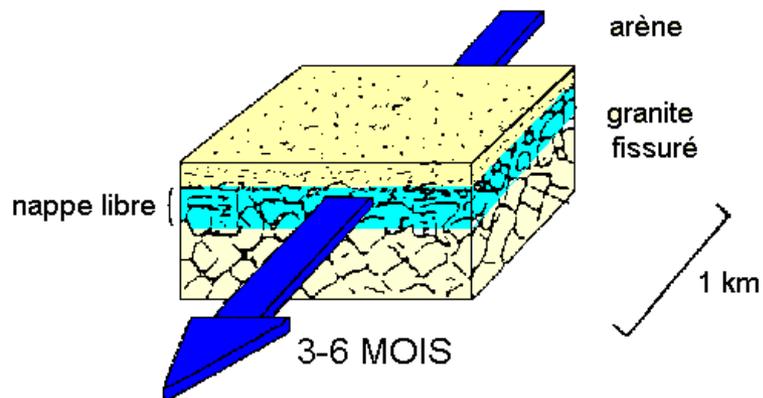
photo P. Maurel et T. Lamarque

Les grands types d'aquifères

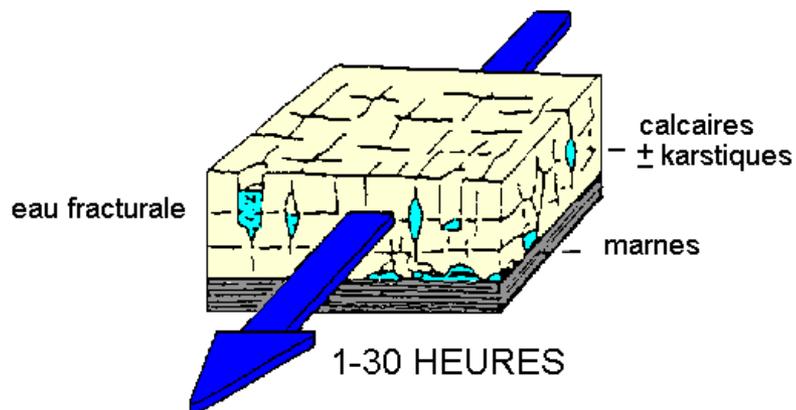
milieu poreux
hétérogène à grande échelle
homogène à petite échelle



milieu fissuré
hétérogène à grande échelle
homogène à petite échelle



milieu karstique
hétérogène
quelque soit l'échelle



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

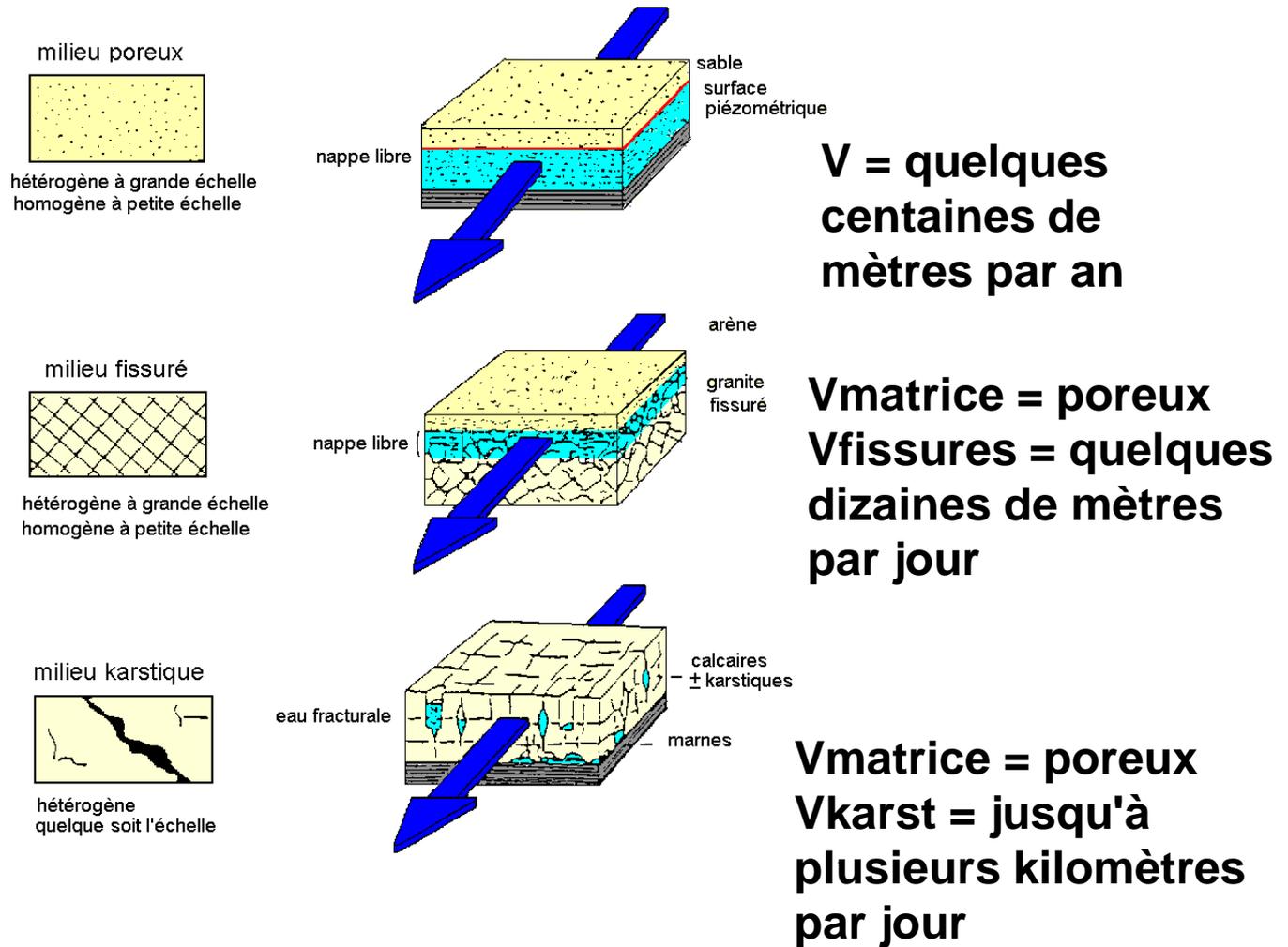
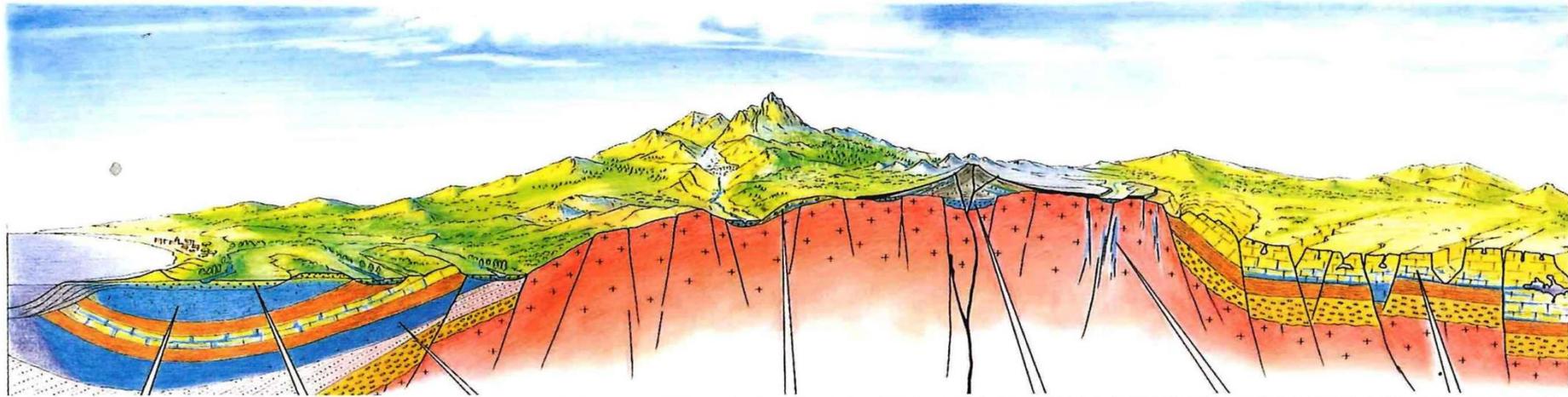


Figure 7-16A: Hétérogénéité des aquifères et vitesse d'écoulement (adapté de DROGUE in GUILLEMIN et ROUX).

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

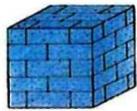
Parameter	Aquifer type		
	Single porosity (porous medium)	Double porosity	Triple porosity (karst)
Flow components	Matrix	Matrix Fracture	Matrix Fracture Channel
Flow laws	Darcy	Darcy Hagen–Poiseuille	Darcy Hagen–Poiseuille Darcy–Weisbach
Flow modes	Laminar	Laminar	Laminar Turbulent
Flow lines are	Parallel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

Les grands types de roches et aquifères



© J.-J. Collin, Les eaux souterraines

Aquifères de roches sédimentaires (libres)



Calcaire, craie, grès

Débit :
moyen à élevé

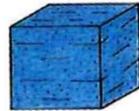
Sables et alluvions des vallées



Graviers et sables

Débit :
bon à élevé

Aquifères sédimentaires profonds (captifs)



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

Dépôts glaciaires (moraines)



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

Aquifères volcaniques



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

Roches dures fissurées



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

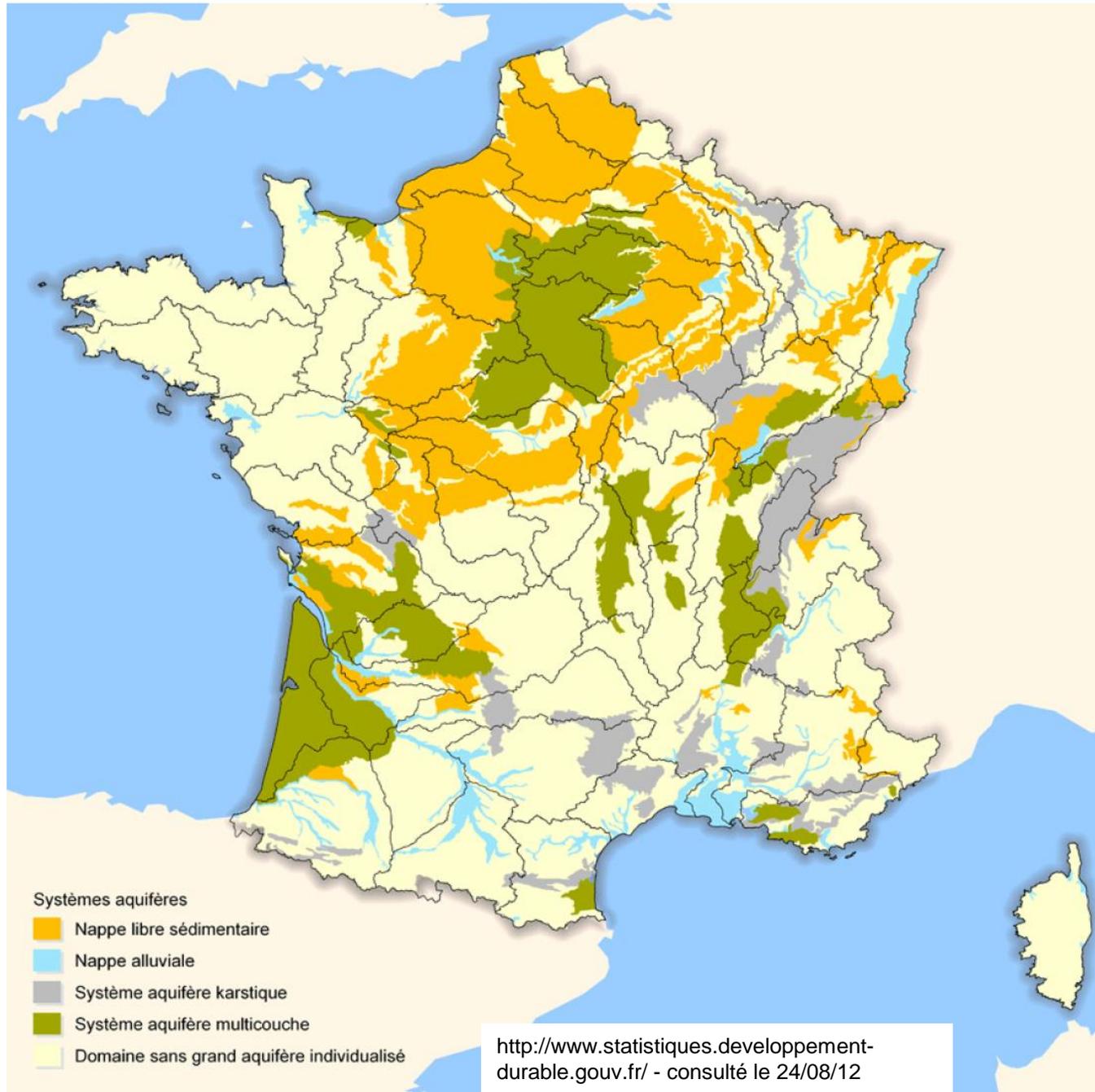
Aquifères karstiques



Cavités dans le calcaire compact
Débit : très variable

Extrait de Aquifères et Eaux souterraines en France. BRGM. 2006

Les eaux souterraines : les grands systèmes hydrogéologiques



1- Quantification du cycle de l'eau

2- Les définitions indispensables de l'hydrogéologie

3- Écoulement de l'eau souterraine dans la nature

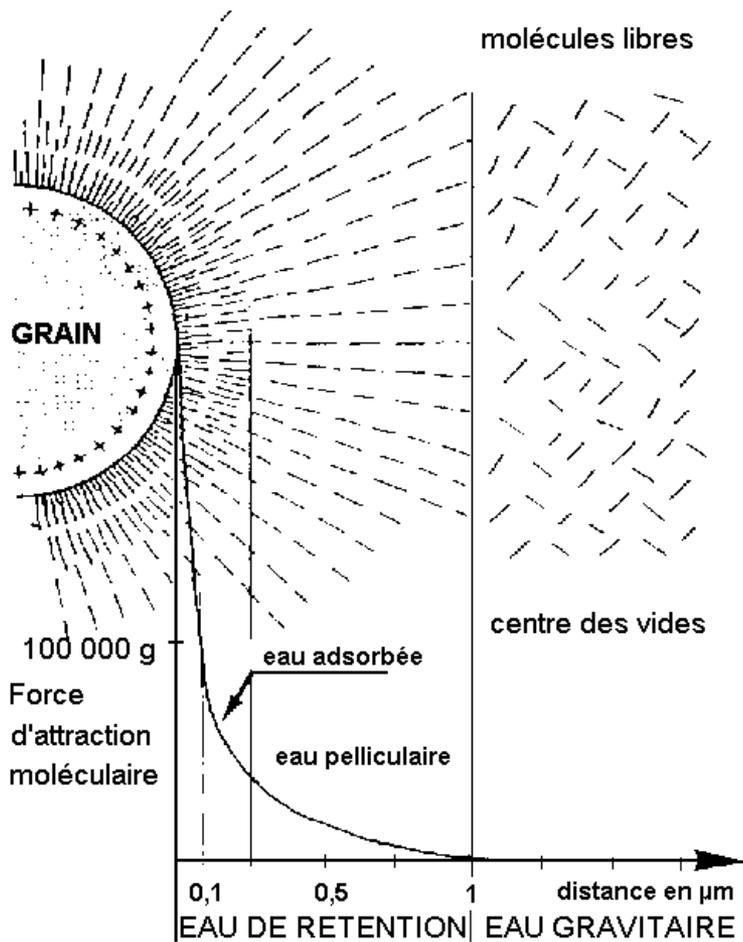
4- La carte piézométrique

5- Théorie de l'écoulement de l'eau souterraine en milieu poreux

5.1- Qu'est-ce qu'un milieu poreux (VS milieu fissuré et milieu karstique)

5.2- Eau gravitaire et eau de rétention

Castany



1- Quantification du cycle de l'eau

2- Les définitions indispensables de l'hydrogéologie

3- Écoulement de l'eau souterraine dans la nature

4- La carte piézométrique

5- Théorie de l'écoulement de l'eau souterraine en milieu poreux

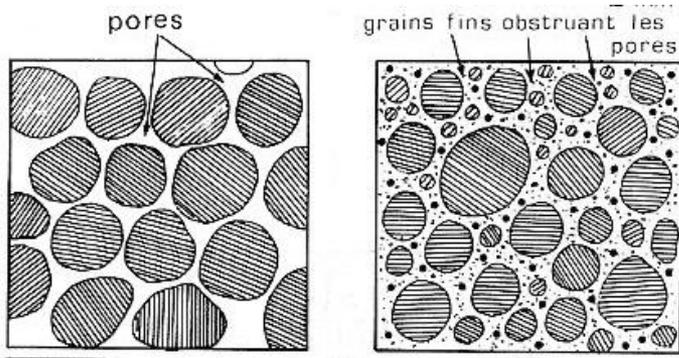
5.1- Qu'est-ce qu'un milieu poreux (VS milieu fissuré et milieu karstique)

5.2- Eau gravitaire et eau de rétention

5.3- Quantification des volumes d'eau souterraine

5.3.1- Porosités

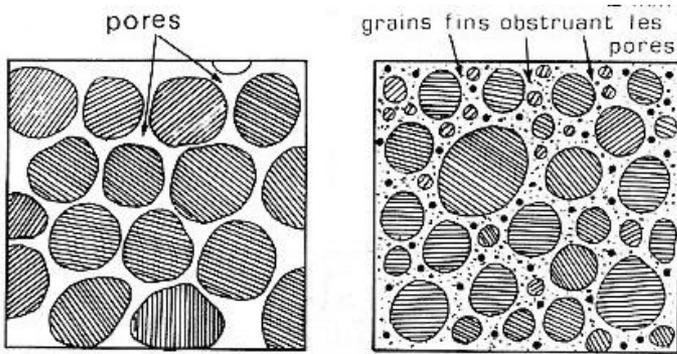
Espace total et espace disponible pour l'écoulement



$$\text{Porosité totale} = \frac{\text{Volume vide}}{\text{Volume total de l'échantillon}}$$

5.3.1- Porosités

Espace total et espace disponible pour l'écoulement

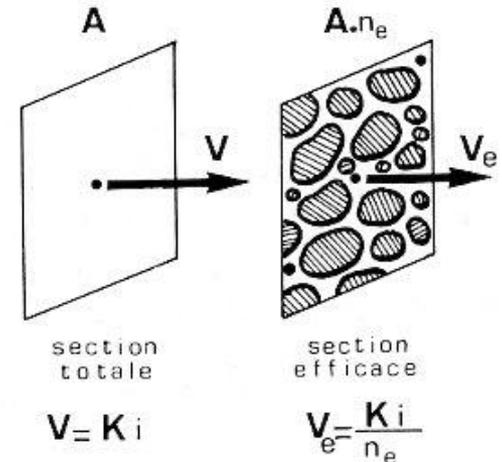
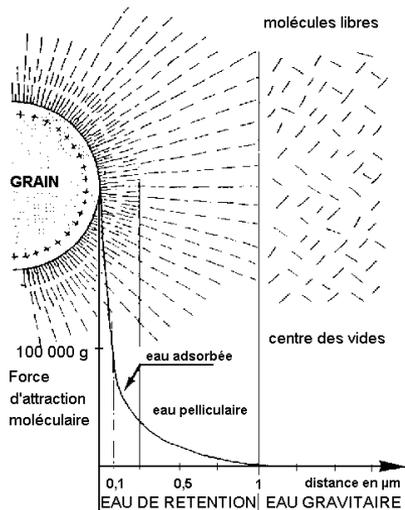


Castany

$$\text{Porosité totale} = \frac{\text{Volume vide}}{\text{Volume total de l'échantillon}}$$

Volume vide disponible pour l'écoulement de l'eau gravitaire

$$\text{Porosité efficace} = \frac{\text{Volume vide disponible pour l'écoulement de l'eau gravitaire}}{\text{Volume total de l'échantillon}}$$



5.3.1- Porosités

5.3.2- Teneur en eau

5.3.3- Saturation en eau

5.4- Loi de Darcy

5.4.1- La Loi de Darcy par l'approche expérimentale

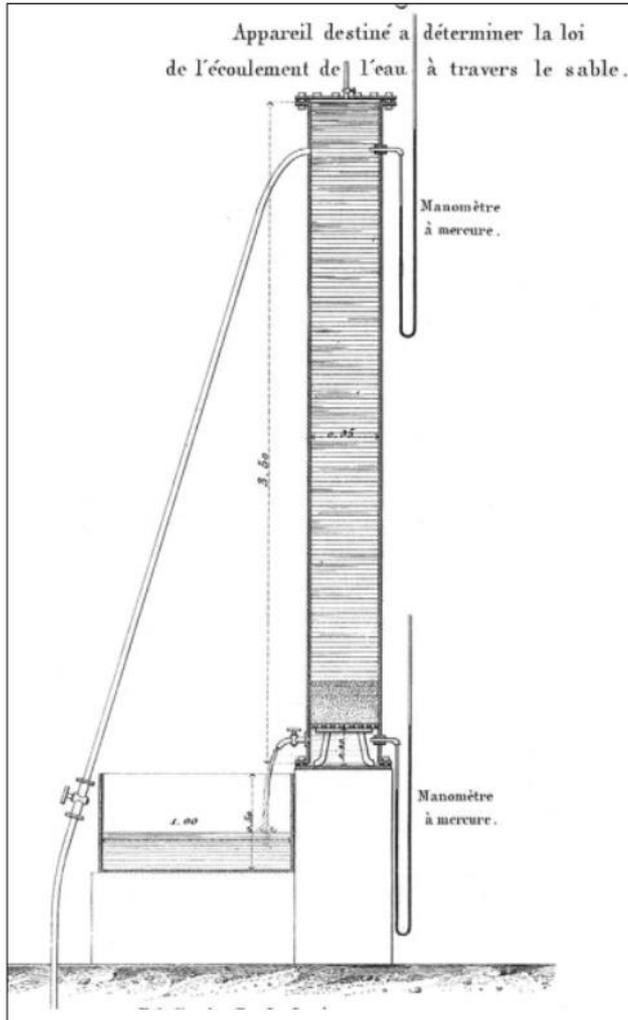
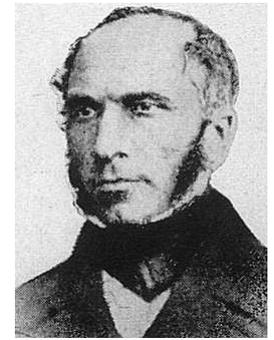


Figure 4. Darcy's original sand column apparatus (Darcy 1856, Plate 24, Figure 3).

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 PARCHASSON DES TUYAUX DE FONTE, DE CROUD, DE TOLE ET DE CUIVRE

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 commune des hommes et des animaux, et à remédier aux accidents qui résultent des causes générales ou locales, soit dans le lit des fontaines, des rivières, des ruisseaux où elles coulent, soit dans les lieux où sont conservés celles qui en découlent, soit enfin dans les puits d'où sont prises des sources.

(De l'écoulement de l'eau à travers le sable, 1856, p. 134.)

PARIS

VICTOR DALMONT, ÉDITEUR,

Successeur de Carlier-Severy et V^o Dalmont,

LIBRAIRE DES CORPS IMPÉRIAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES,
Quai des Augustins, 40.

1856

5.4.1- La Loi de Darcy par l'approche expérimentale

Écoulement dans un aquifère : modèle simple

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

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 synthétique de l'expérience

Lien avec la partie 3.1- Écoulement et niveau piézométrique

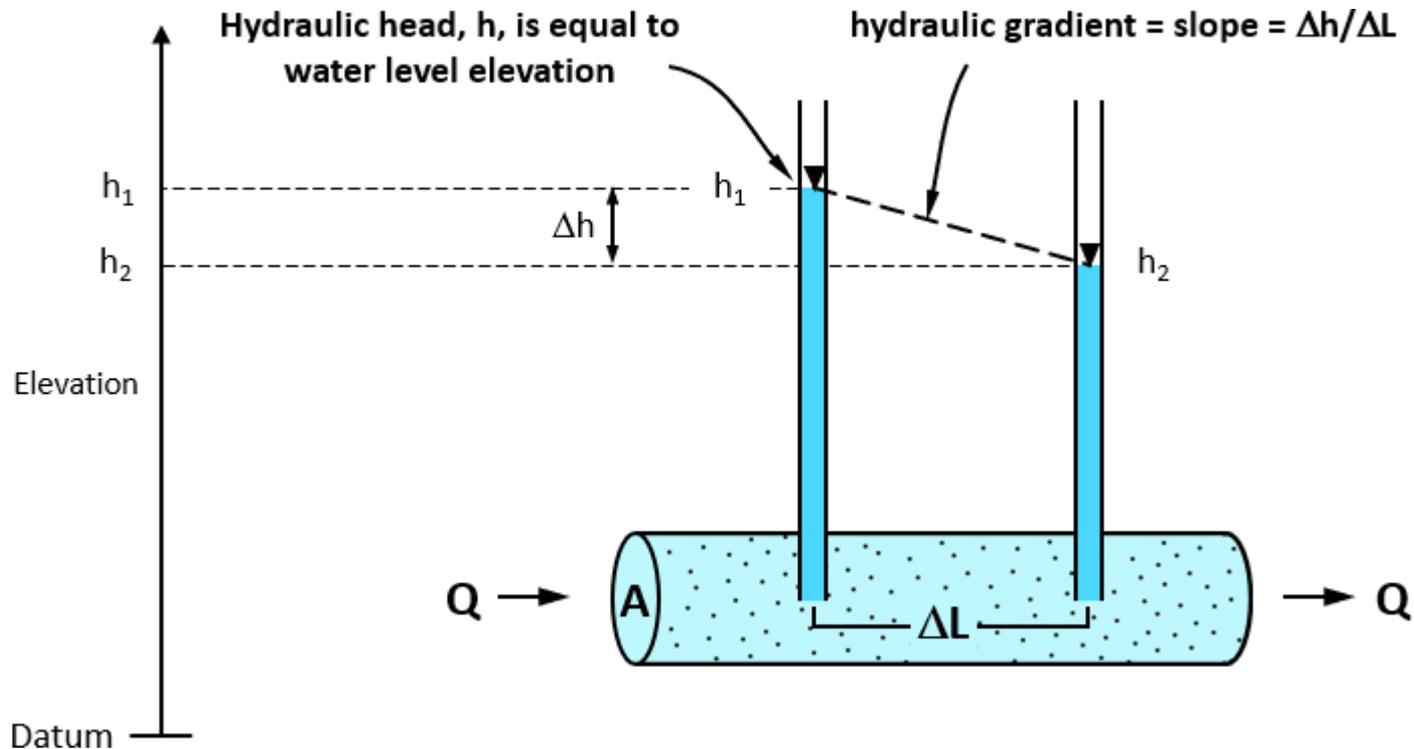


Figure 2 - Illustration of hydraulic gradient based on two measurement points. Hydraulic gradient is defined by the distance between the piezometers and the difference in hydraulic head (Cohen and Cherry, 2020).

A. J.B. Cohen, J. A. Cherry (2020) Conceptual and Visual Understanding of Hydraulic Head and Groundwater Flow. ISBN: 978-1-7770541-6-8. <https://gw-project.org/books/conceptual-and-visual-understanding-of-hydraulic-head-and-groundwater-flow/>

Lien avec la partie 3.1- Écoulement et niveau piézométrique

Flow is always from higher to lower head.

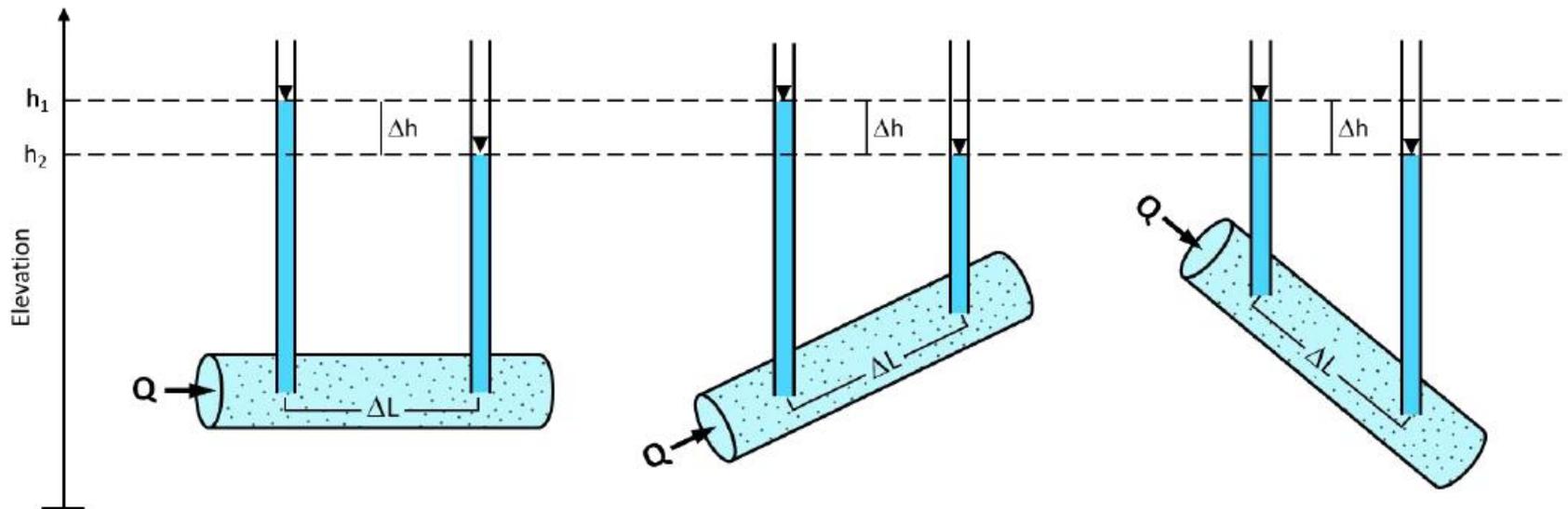


Figure 4 - Different apparatus orientations with the same hydraulic gradient: the gradient magnitude ($\Delta h/\Delta L$) is the same in each case and the gradient direction is parallel to the tube in each case. Darcy's law is independent of the apparatus orientation, so the flow rate, Q , is the same in each case, and the flow direction is the same, in this case, parallel to the apparatus (Cohen and Cherry, 2020).

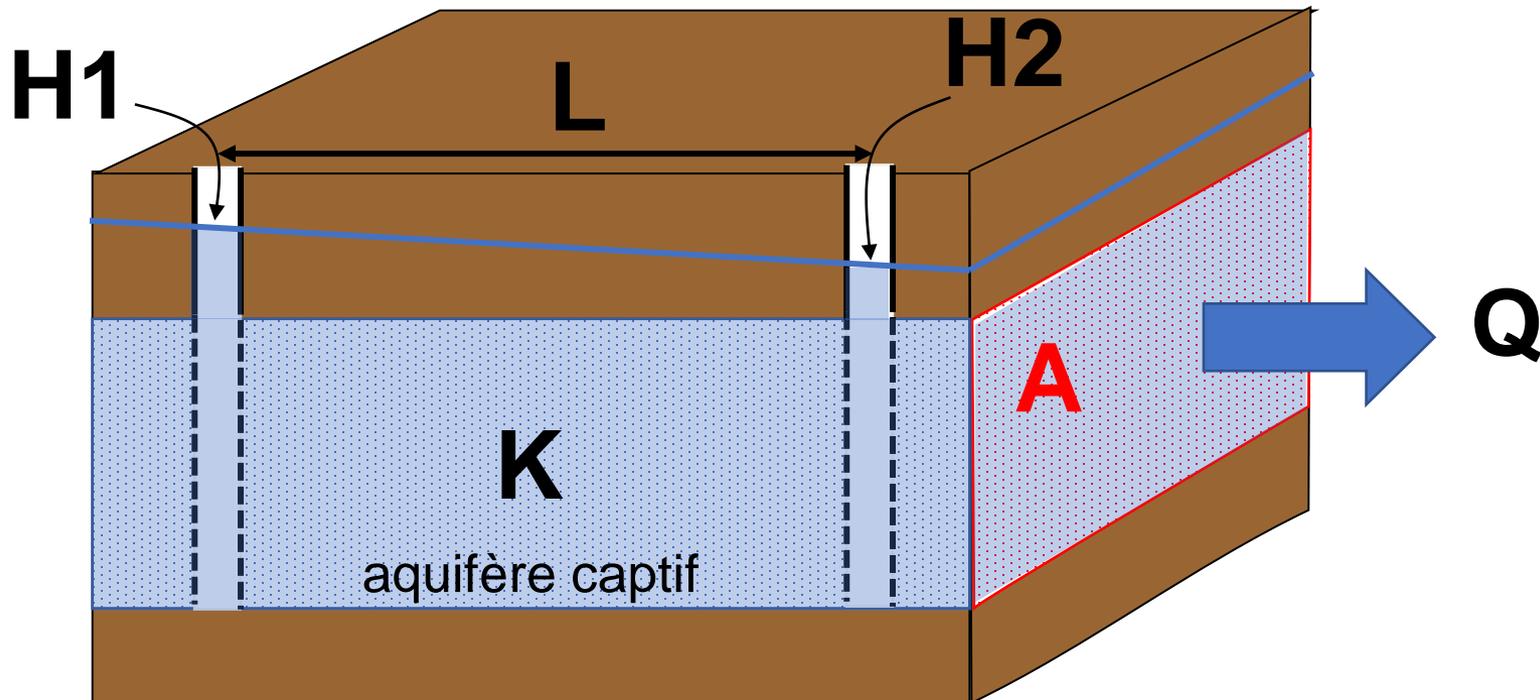
A. J.B. Cohen, J. A. Cherry (2020) Conceptual and Visual Understanding of Hydraulic Head and Groundwater Flow. ISBN: 978-1-7770541-6-8. <https://gw-project.org/books/conceptual-and-visual-understanding-of-hydraulic-head-and-groundwater-flow/>

5.4.2- La Loi de Darcy en milieu naturel

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

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

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

Lien avec la partie 4- La carte piézométrique

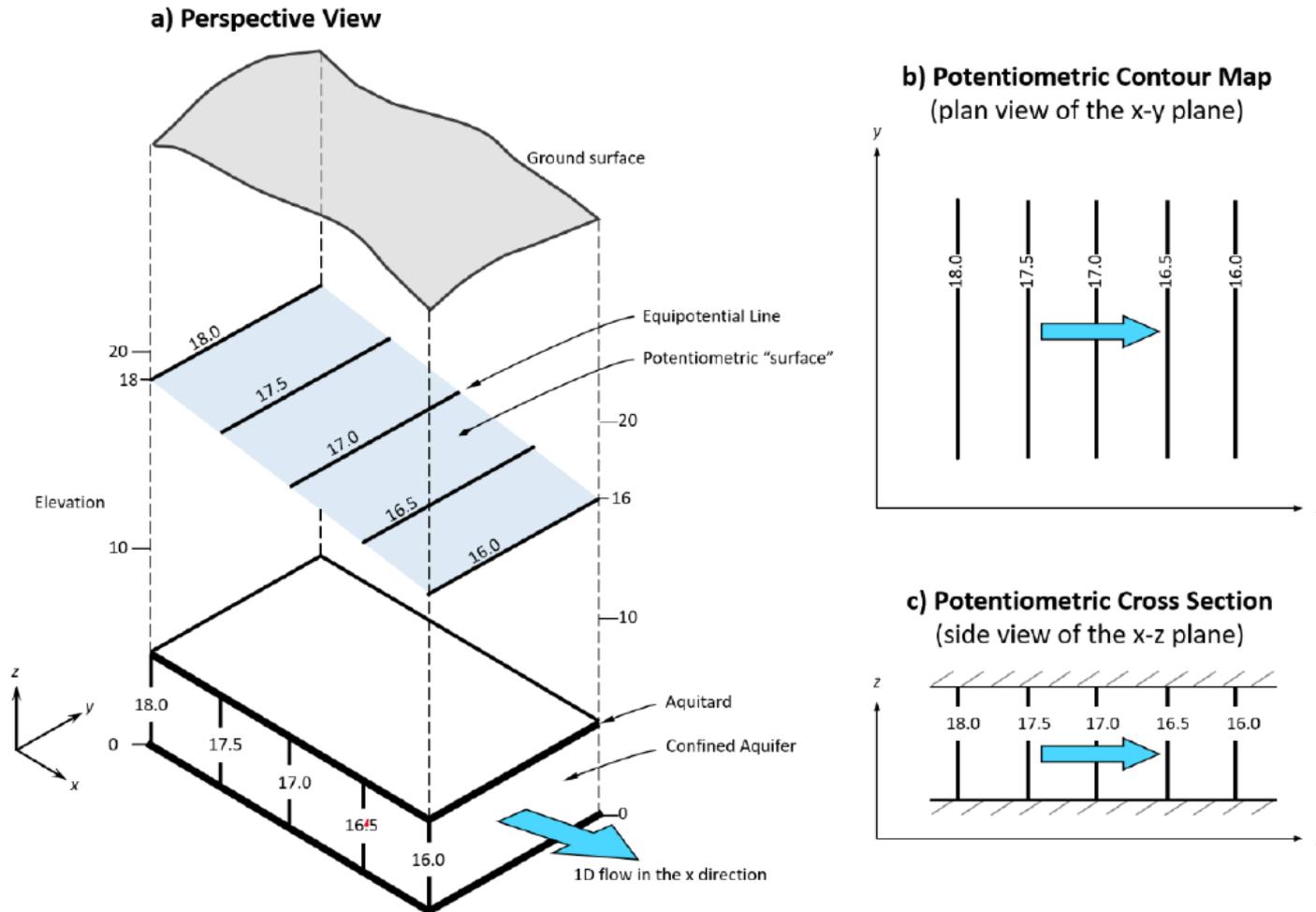


Figure 20 - Potentiometric contours for a confined aquifer shown in various views: a) perspective; b) plan; and, c) cross section. In the plan view, the potentiometric surface can be represented using equipotential lines in a manner similar to elevation contour lines used to represent ground surface topography (Cohen and Cherry, 2020)

A. J.B. Cohen, J. A. Cherry (2020) **Conceptual and Visual Understanding of Hydraulic Head and Groundwater Flow**. ISBN: 978-1-7770541-6-8. <https://gw-project.org/books/conceptual-and-visual-understanding-of-hydraulic-head-and-groundwater-flow/>

5.5- Paramètres hydrodynamiques

5.5.1- Coefficient de perméabilité (ou conductivité hydraulique)

5.5.2- Transmissivité

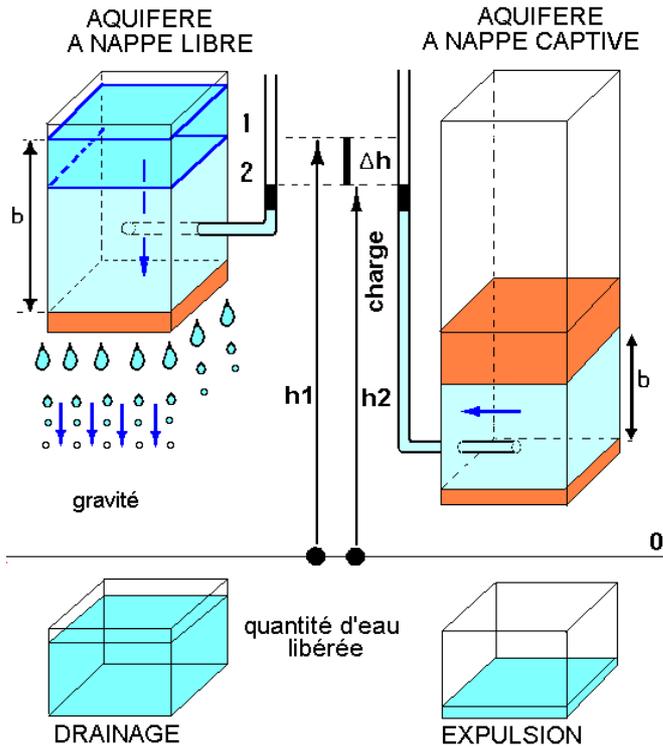
5.5.2- Coefficient d'emmagasinement

5.6- Vitesses

5.6.1- Vitesse de Darcy

5.6.2- Vitesse effective

Coefficient d'emmagasinement et porosité de drainage



Coefficient de perméabilité ou conductivité hydraulique

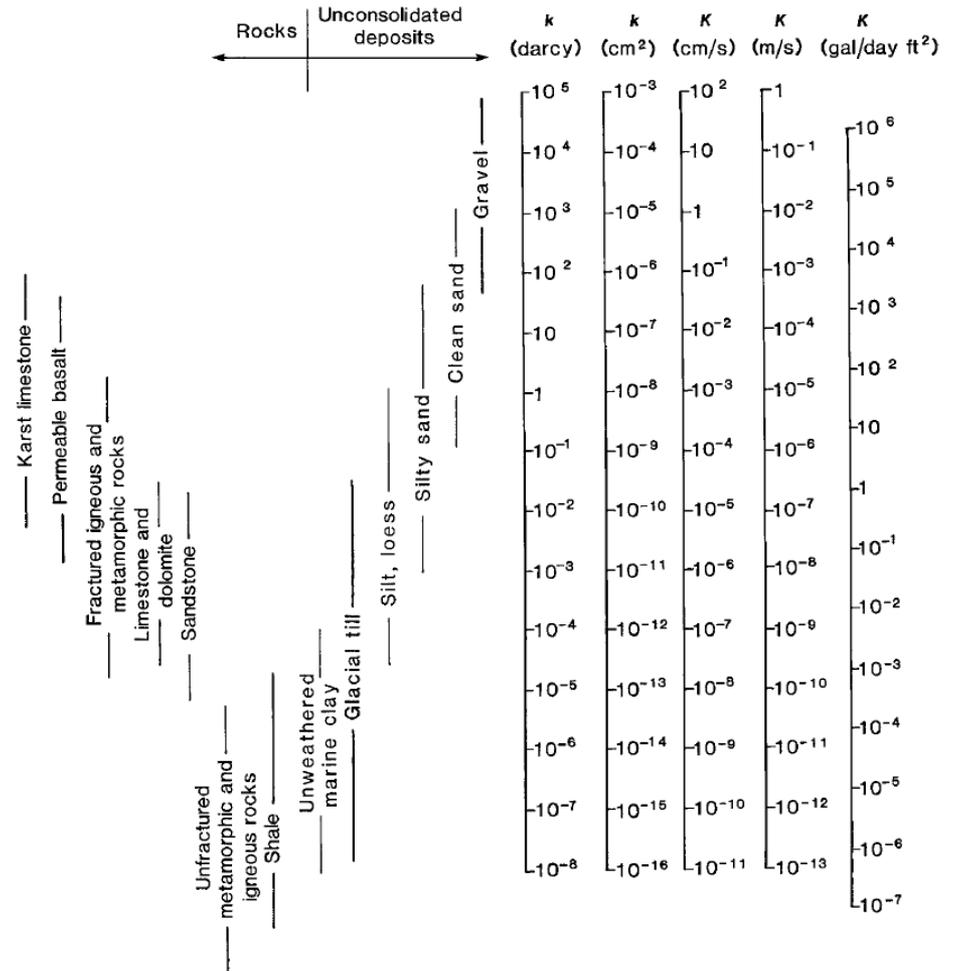


Figure 5.8 Range of values of hydraulic conductivity and permeability. Reproduced from Freeze, R.A. and J.A. Cherry, Groundwater, p. 604 © 1979 Prentice Hall.