



Objectif : Comprendre la circulation des eaux souterraines pour pouvoir gérer la ressource en eau

Organisation:

➤ 1 CM : V. de Montety

➤ 1 sortie de terrain

• **Caractérisation de la circulation de l'eau souterraine: à partir de forage**

- Mesures de niveau piézométrique
- Mesure de conductivité électrique

**V. de Montety +
Y. Cousquer**

• **Caractérisation à la source** : mesure de débit (= jaugeage)

- Mesure de la dilution par traçage au sel,
- Mesure de la vitesse de surface par flotteur

**Y. Cousquer +
L. Serene**

➤ 2 TPs d'interprétation



Objectif : Comprendre la circulation des eaux souterraines pour pouvoir gérer la ressource en eau

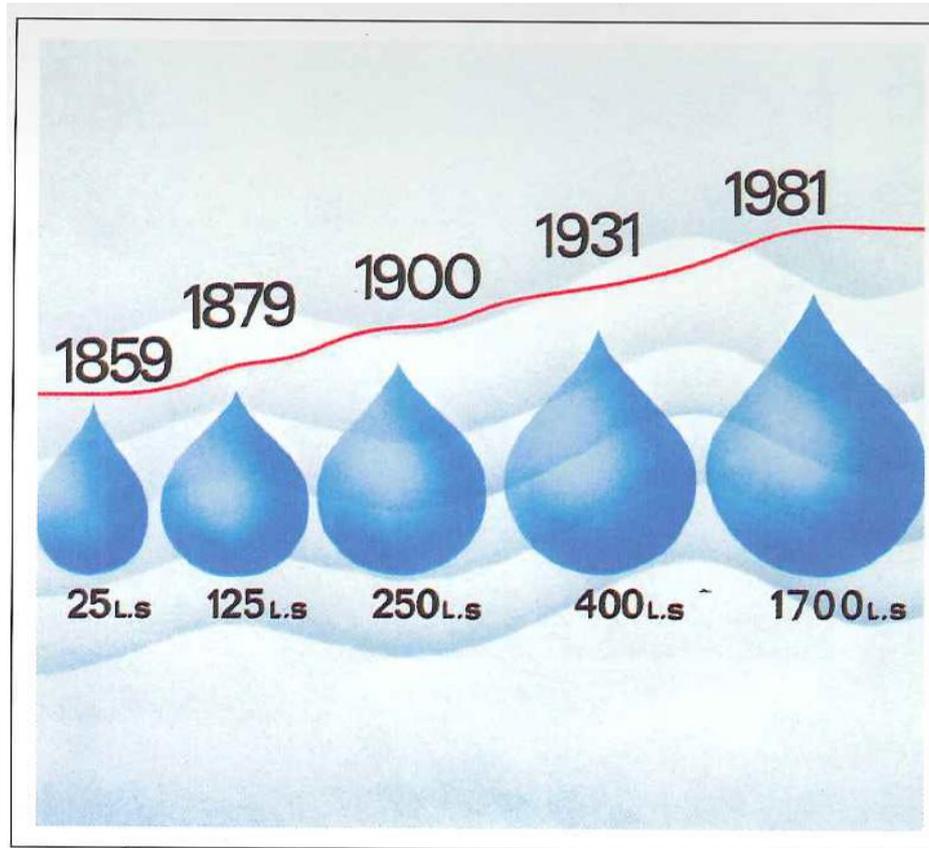
Exemple : Alimentation en eau et gestion des crues de la ville de Montpellier

I. Alimentation en eau de la ville de Montpellier



La source du Lez, à Saint-Clément-de-Rivière (Hérault), en période de hautes eaux. © BRGM

I. Alimentation en eau de la ville de Montpellier

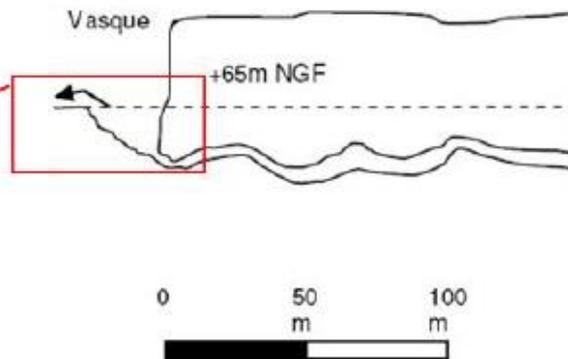


Débit demandé à la source du Lez

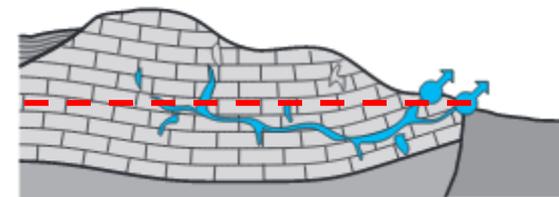
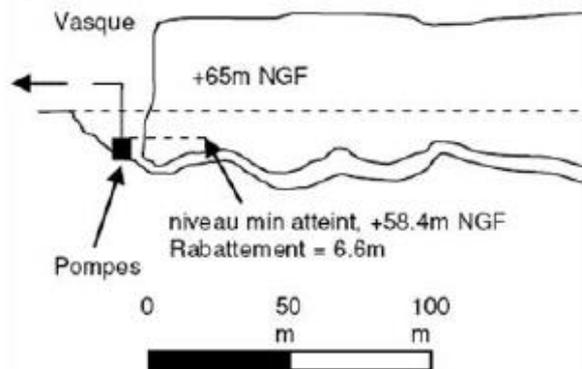
I. Alimentation en eau de la ville de Montpellier

La source karstique du Lez

Prélèvement gravitaire à la vasque d'émergence de la source du Lez (avant 1968).



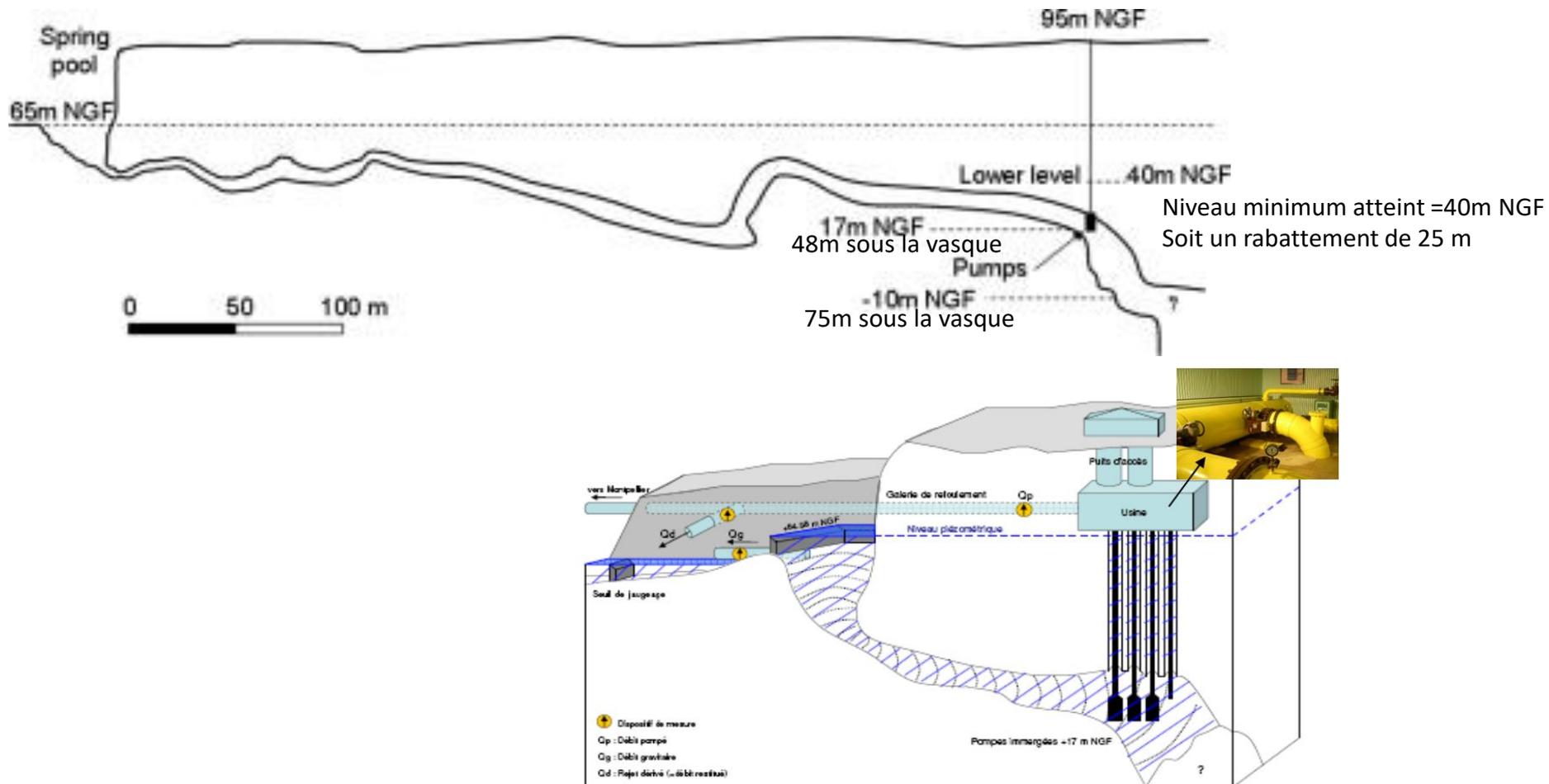
Dispositif de pompage dans la vasque d'émergence de la source du Lez (de 1968 à 1982).



I. Alimentation en eau de la ville de Montpellier

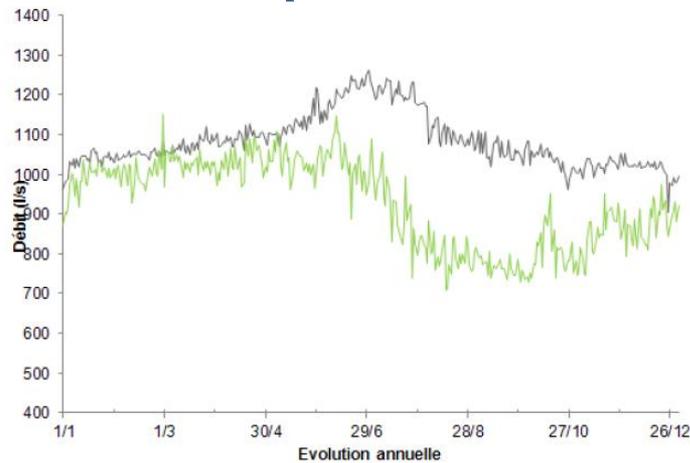
La source karstique du Lez

Réseau karstique de la source du Lez (Paloc, 1975) et dispositif de captage dans le drain (depuis 1982).

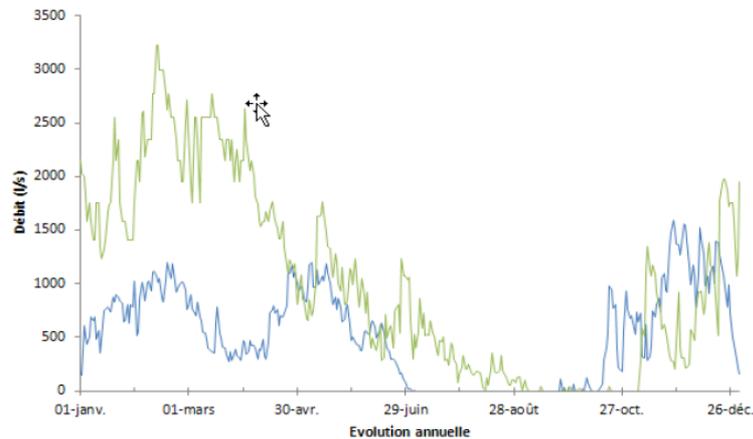


I. Alimentation en eau de la ville de Montpellier

La source karstique du Lez



Débits de prélèvement à la source du Lez



Débits de Débordement à la source du Lez

(BRGM, 2011)

Augmentations des prélèvements après 1982

⇒ Baisse de la fréquence et des volumes de débordements

Risque à long terme d'épuisement des réserves?

II. Les entrées : Les précipitations

- Un épisode pluvieux est caractérisé par:
 - Une lame (mm)
 - ⇒ 1mm sur 1m² représente 1 litre
 - Une intensité = Lame par unité de temps (mm/h)
- Problèmes
 - Surface à considérer? Échelle d'observation?
 - Mesure de la lame d'eau précipitée?

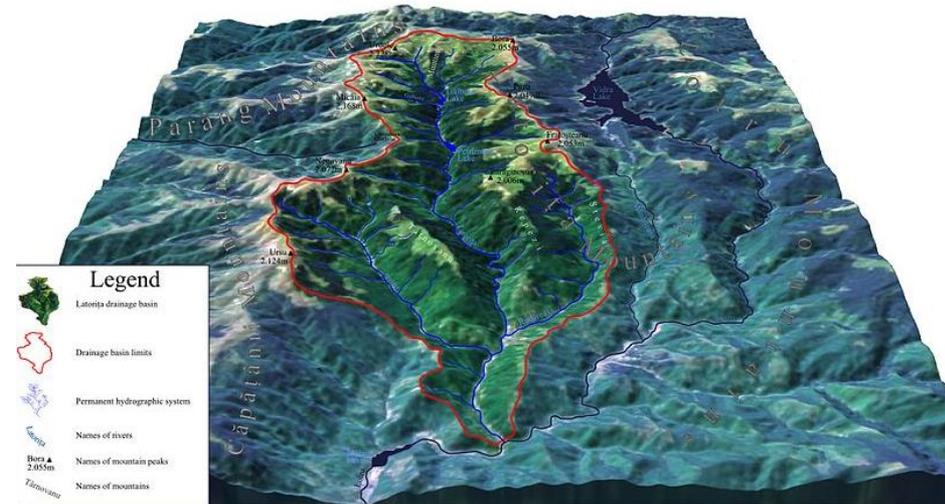
II. Les précipitations

1. Interface sol/atmosphère : le Bassin Versant (BV)

- =**surface topographique** qui draine vers un même point (exutoire) l'ensemble des eaux ruisselées

=interface entre l'atmosphère et le système hydrologique

- Son contour correspond au tracé des lignes de crêtes passant par l'exutoire considéré (=mer, confluence, station etc.)

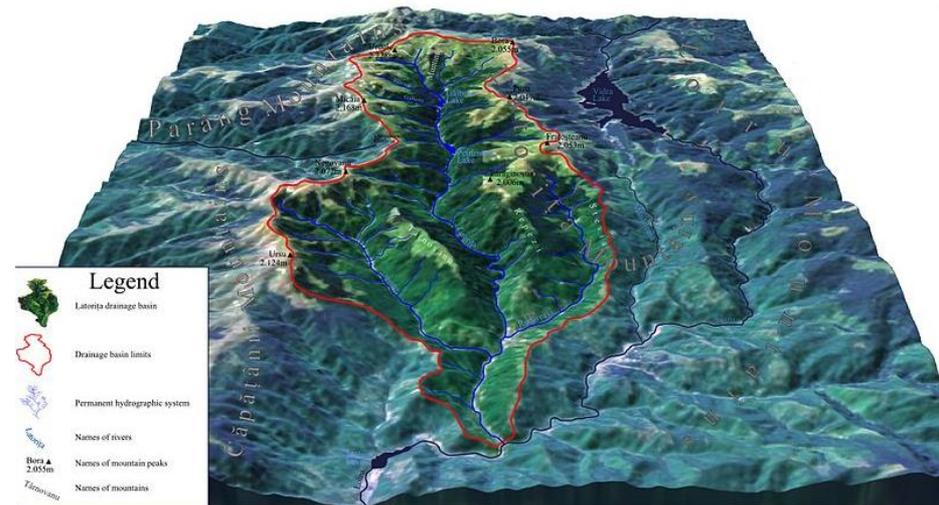
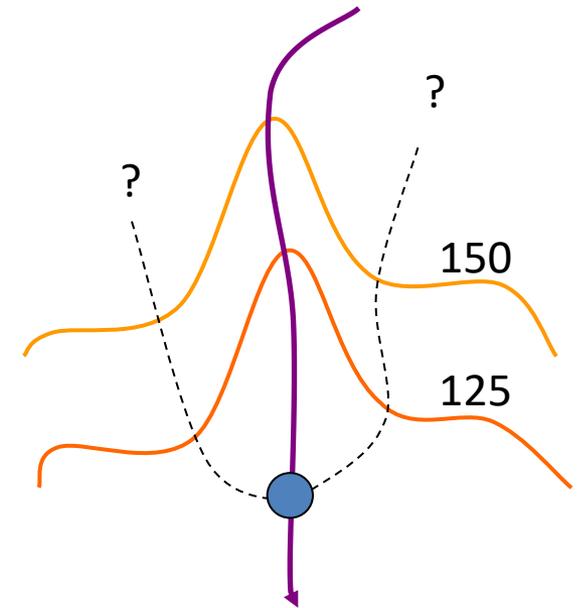


II. Les précipitations

1. Interface sol/atmosphère : le Bassin Versant (BV)

Délimitation du bassin-versant

- Identifier les lignes de crêtes
 - 1- Méthode manuelle à partir des iso valeurs d'altitude = carte IGN...
 - 2- Méthode automatisée = Modèle Numérique de Terrain + GIS...
- Calcul de la surface
 - 1- Planimètre...
 - 2- Calcul direct sous SIG(ArcGIS)
- Précision
 - 1- Équidistance des courbes
 - 2- Précision du MNT...



II. Les précipitations

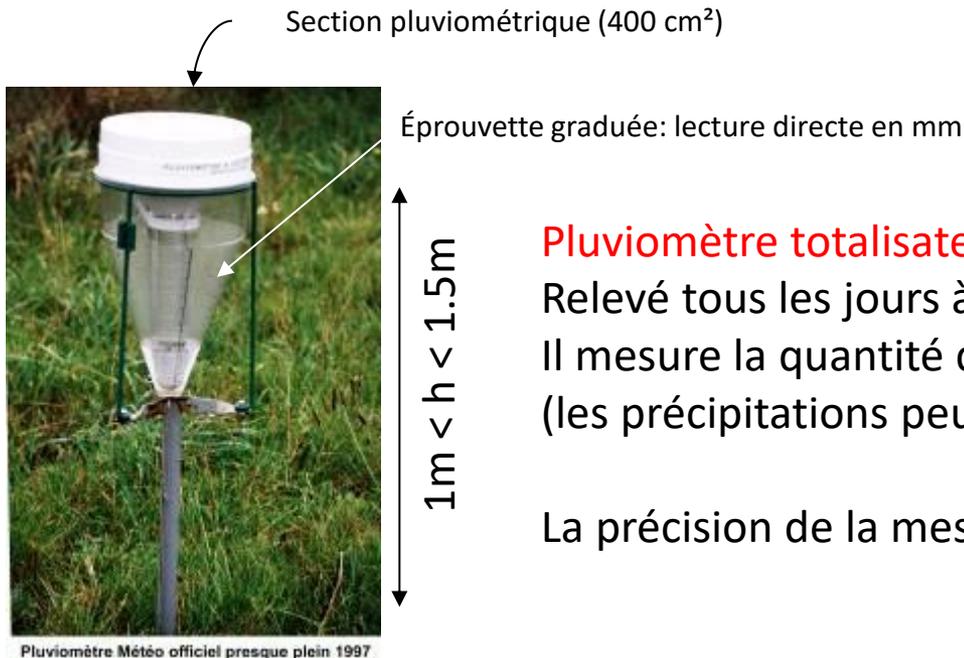
1. Interface sol/atmosphère : le Bassin Versant (BV)



II. Les précipitations

2. Mesures - Au sol

- Pluviomètre : quantité de pluie sur une section pluviométrique horizontale



Pluviomètre totalisateur (pluie journalière)

Relevé tous les jours à heure fixe

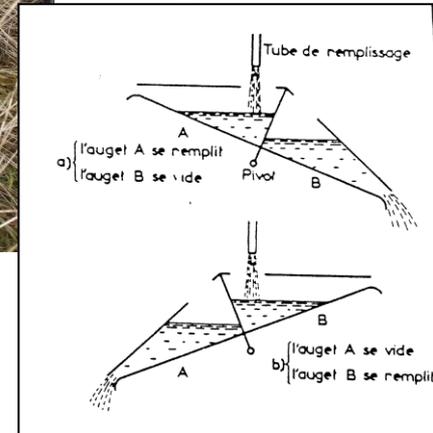
Il mesure la quantité d'eau totale précipitée entre 2 relevés (les précipitations peuvent être solides ou liquides)

La précision de la mesure est au mieux de 0.1 mm

II. Les précipitations

2. Mesures - Au sol

- Pluviographe (auget basculant) :



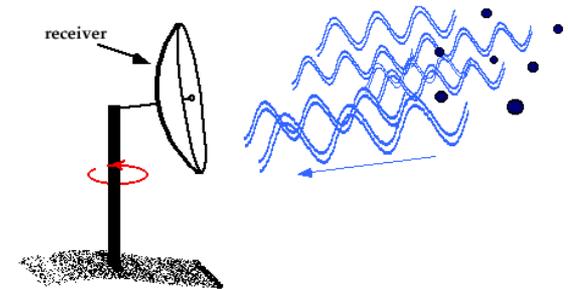
1 basculement \leftrightarrow 20g eau
 $S=1000 \text{ cm}^2 \leftrightarrow 0.2 \text{ mm}$

- Mesure de l'instant du basculement \Rightarrow Cumul de pluie=f(t)

II. Les précipitations

2. Mesures - Indirecte

- Le radar météo :
 - Emission d'un faisceau d'ondes électromagnétiques dont une partie est rétro-diffusée par les hydrométéores.
 - Mesure de la puissance de l'onde rétrodiffusée (quelques μW)
 - Relation Marshall-Palmer:
Lie la réflectivité mesurée à l'intensité de pluie $\Rightarrow I$ (mm/h) par pixel
 - RECALER LES MESURES RADAR PAR RAPPORT AUX MESURES 'SOL'



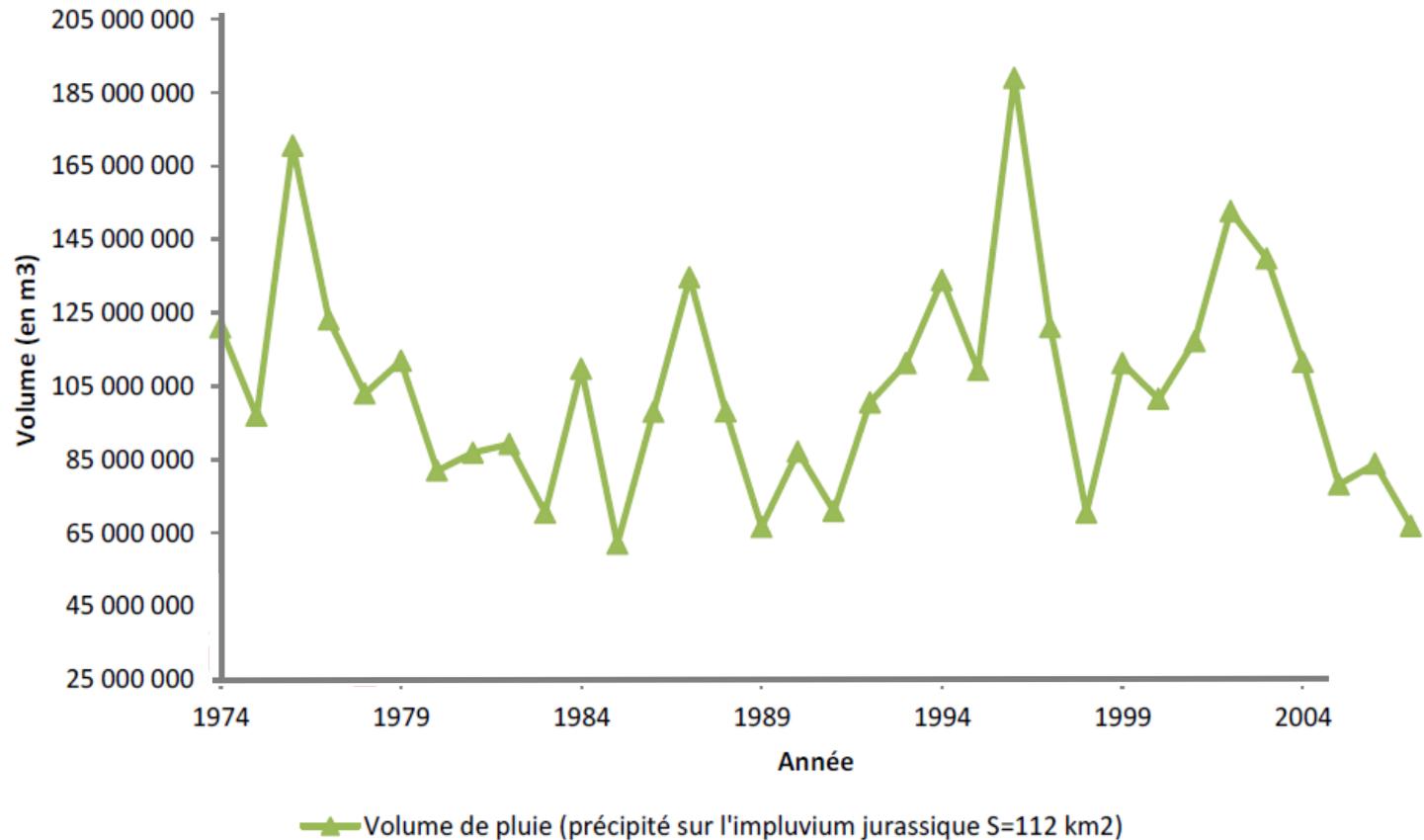
II. Les précipitations

2. Mesures - Réseau de mesure sur le BV du Lez



II. Les précipitations

2. Mesures - Réseau de mesure sur le BV du Lez

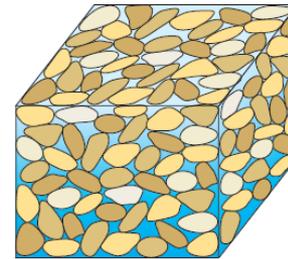


III. Le réservoir souterrain

- Au sens strict : Formation géologique possédant une **porosité** et une **perméabilité** suffisante pour assurer le stockage et la circulation de l'eau souterraine.

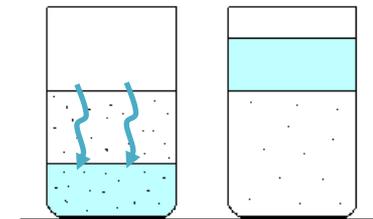
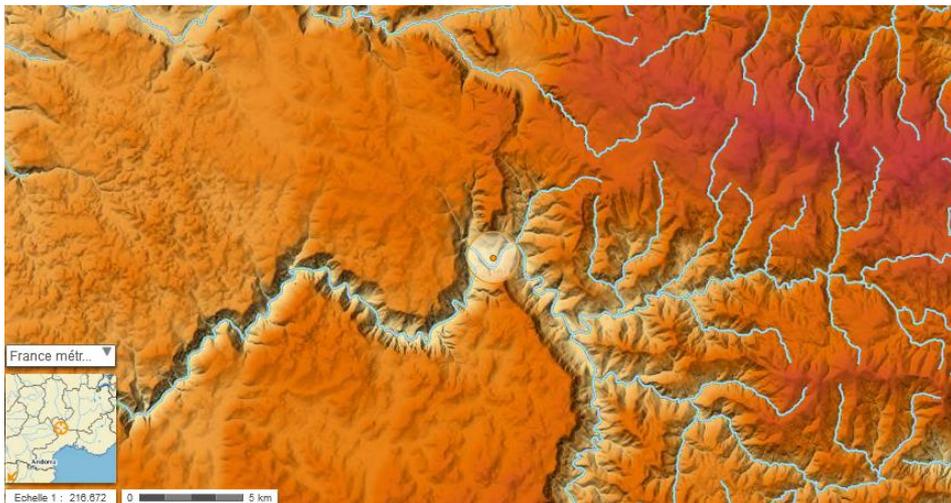
Stockage: **porosité** (n) + écoulements: **perméabilité** (K)

- **porosité** : Quantité de vide contenu dans un matériau



A. Well-sorted sand

- **perméabilité** : Aptitude d'un matériau à se laisser traverser par un fluide



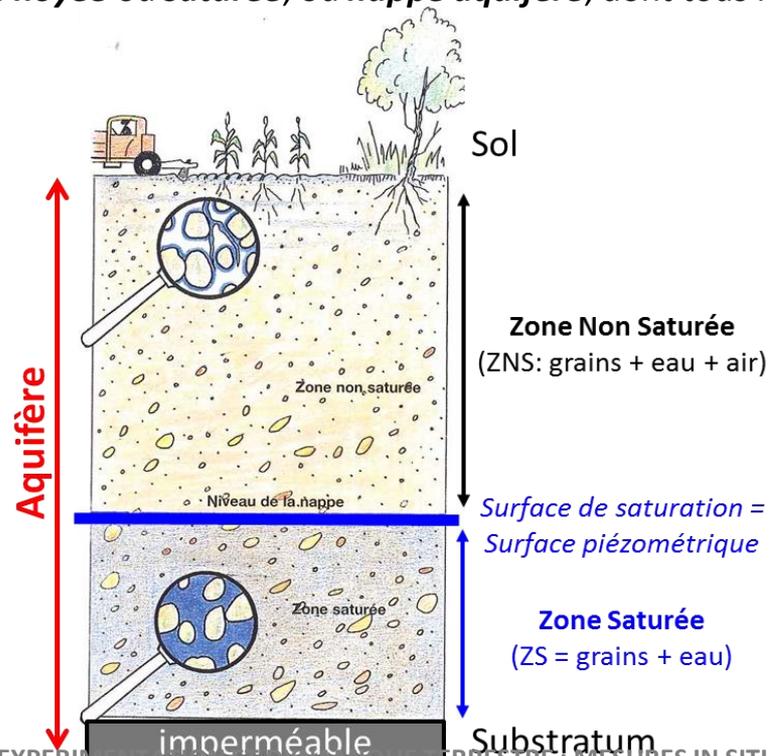
sable **Écoulement** argile

Mesurable	pratiquement nul
Formation hydrogéologique	
Perméable	semi-perm. imperméable

Conséquence de la perméabilité des roches sur le réseau hydrographique

III. Le réservoir souterrain

- Au sens strict : Formation géologique possédant une **porosité** et une **perméabilité** suffisante pour assurer le stockage et la circulation de l'eau souterraine.
- Aspect économique : l'aquifère doit posséder une **capacité de stockage** intéressante, dont les **réserves** peuvent être exploitées.
- Un aquifère (libre) est constitué:
 - (1) d'une **zone non saturée**, ou **zone d'infiltration**, dont les vides, occupés par de l'air, sont parcourus par de l'eau
 - (2) d'une **zone noyée** ou **saturée**, ou **nappe aquifère**, dont tous les vides sont remplis d'eau.

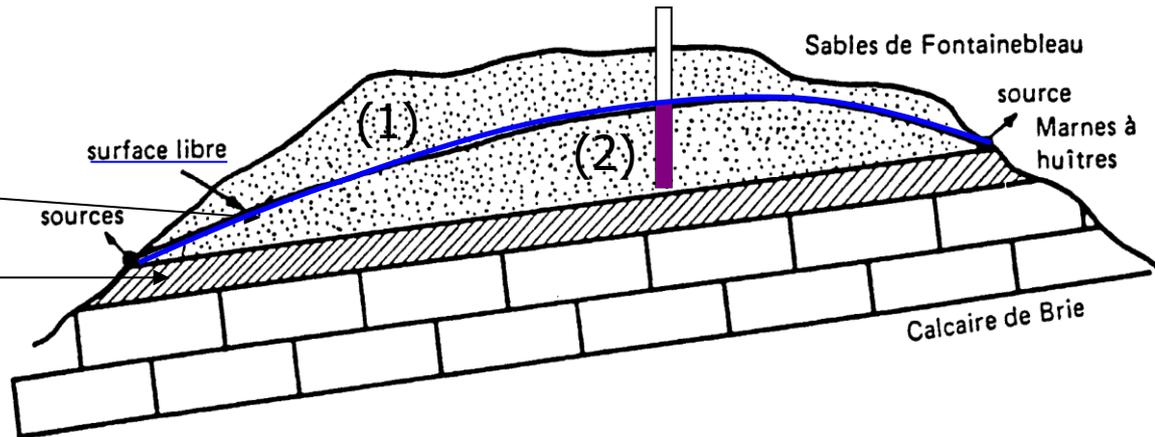


III. Le réservoir souterrain

- Au sens strict : Formation géologique possédant une **porosité** et une **perméabilité** suffisante pour assurer le stockage et la circulation de l'eau souterraine.
- Aspect économique : l'aquifère doit posséder une **capacité de stockage** intéressante, dont les **réserves** peuvent être exploitées.
- Un aquifère (libre) est constitué:
 - (1) d'une **zone non saturée**, ou **zone d'infiltration**, dont les vides, occupés par de l'air, sont parcourus par de l'eau
 - (2) d'une **zone noyée** ou **saturée**, ou **nappe aquifère**, dont tous les vides sont remplis d'eau.

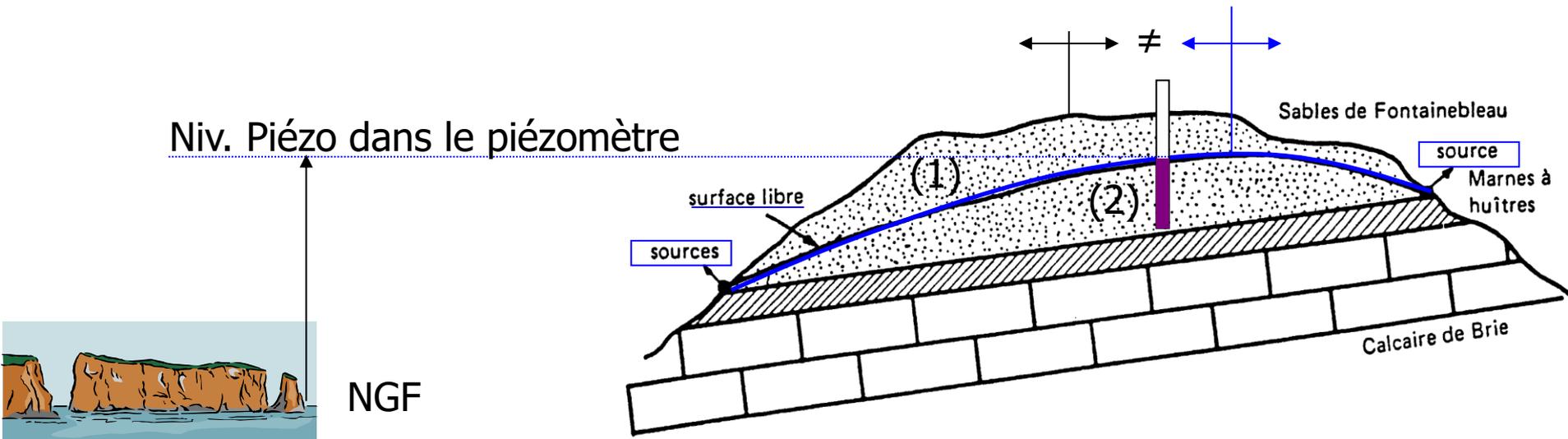
Cas d'une nappe libre dans les sables de Fontainebleau
perméabilité + stockage

Mur imperméable



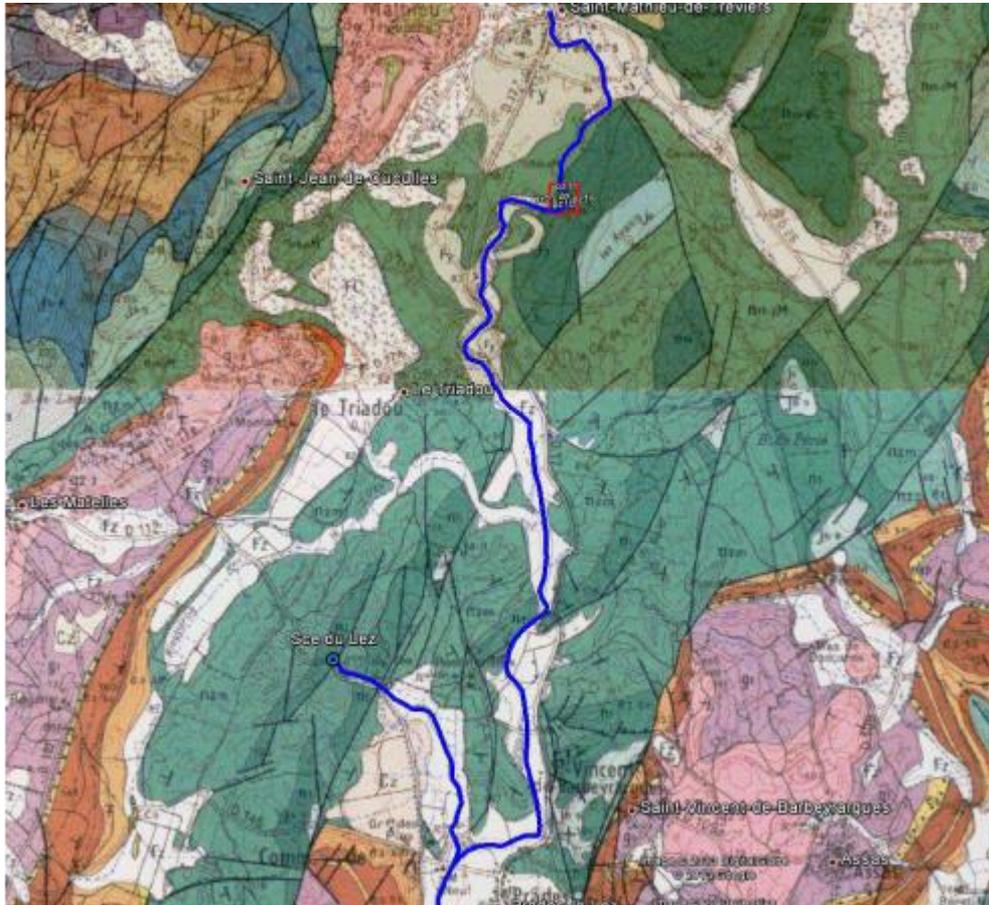
III. Le réservoir souterrain

- La zone d'infiltration (1) est séparée de la zone saturée (2) par la **surface de la nappe**, dont on mesure le **niveau piézométrique**.
- Ce niveau varie en fonction de l'alimentation par l'infiltration et de la vidange naturelle, par les sources ou au profit d'autres aquifères, et de la vidange artificielle par les **prélèvements** (pompage et drainage).
- Si ce niveau est $>$ sol : artésianisme



III. Le réservoir souterrain

Le système karstique du Lez - Identification du réservoir

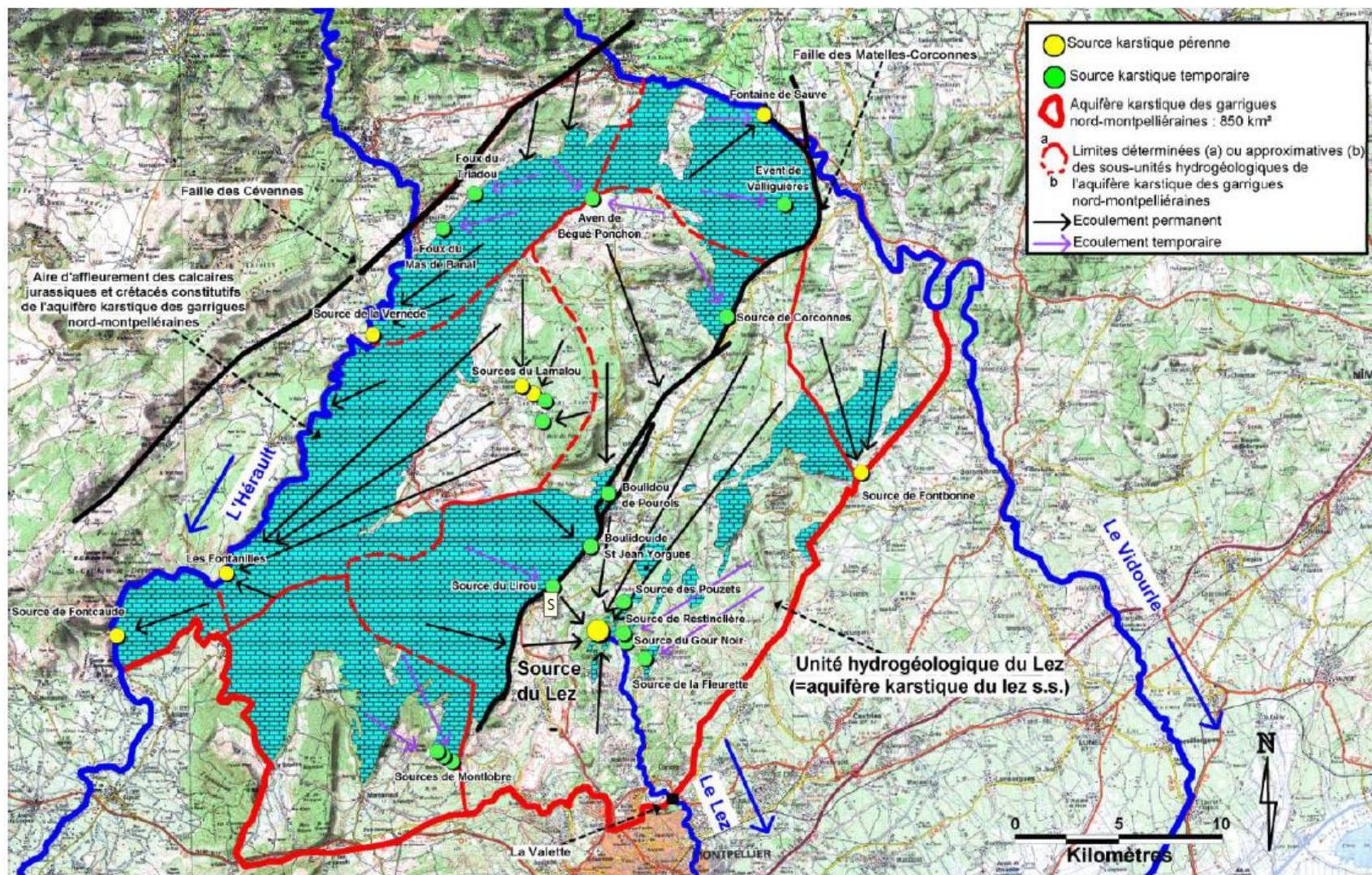


Informations Hydrogéologiques	Facès dominant	Etage dominant	Série
Imperméable	Sables et conglomérats		Quaternaire
Aquifère	Calcaires à Planorbis	Lutécien	Eocène
Imperméable	Argiles		
Lacune de sédimentation			
Imperméable - Toit de l'aquifère principal	Marno-calcaires	Valanginien	Crétacé inférieur
	calcaires	Berriasien	
Perméable - Aquifère principal	calcaires		Jurassique supérieur
Imperméable - Mur de l'aquifère principal	Marnes bleues Calcaires marneux	Callovo-Oxfordien	

*Comprendre les circulations
Localiser les hétérogénéités ?*

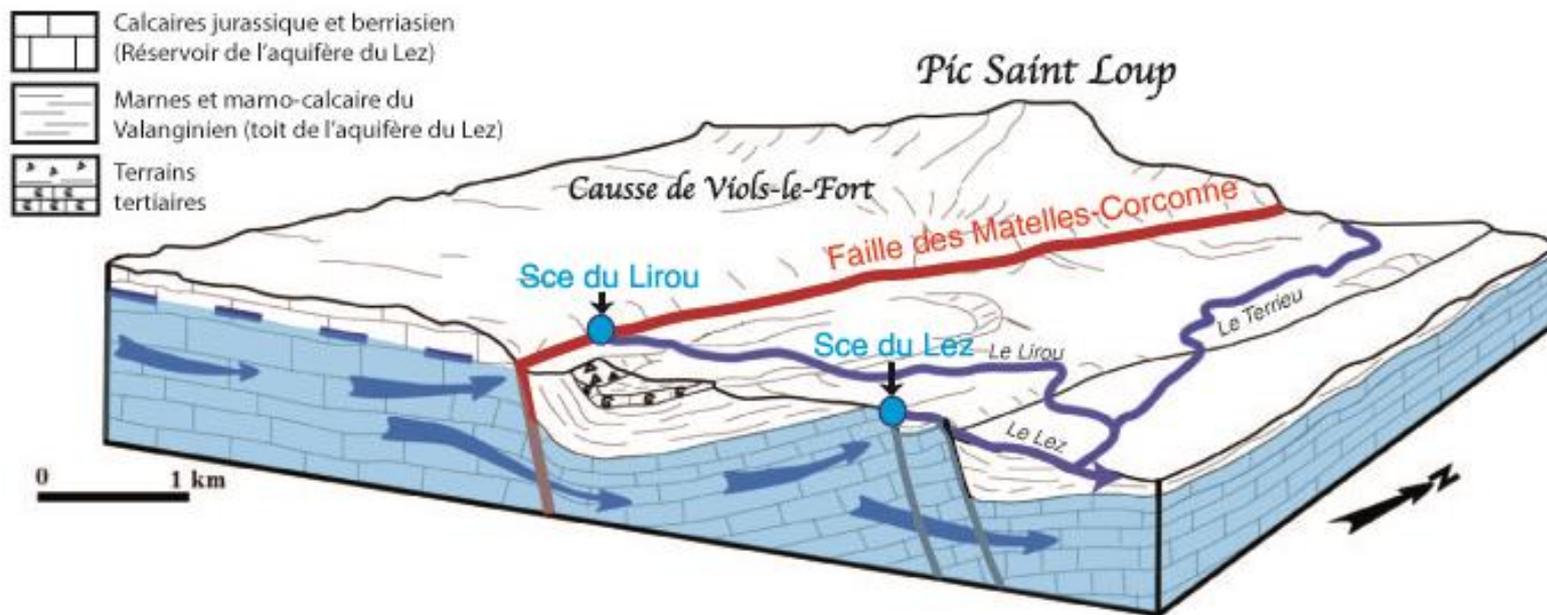
III. Le réservoir souterrain

Le système karstique du Lez - le BV souterrain



III. Le réservoir souterrain

Le système karstique du Lez - le BV souterrain



III. Le réservoir souterrain

1. En surface : Analyse de la fracturation

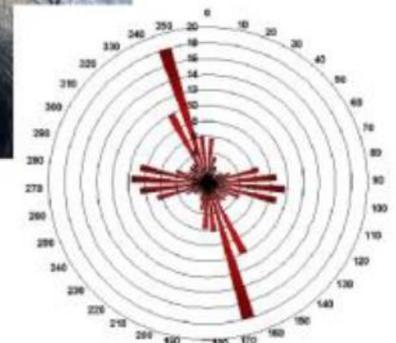
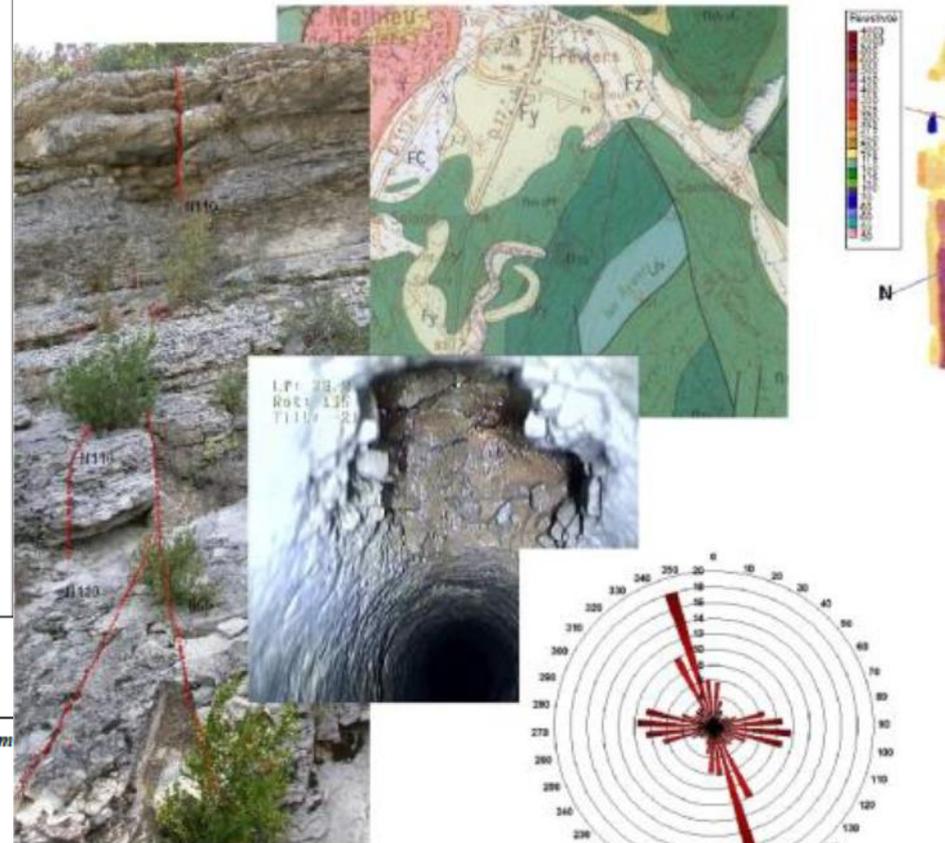
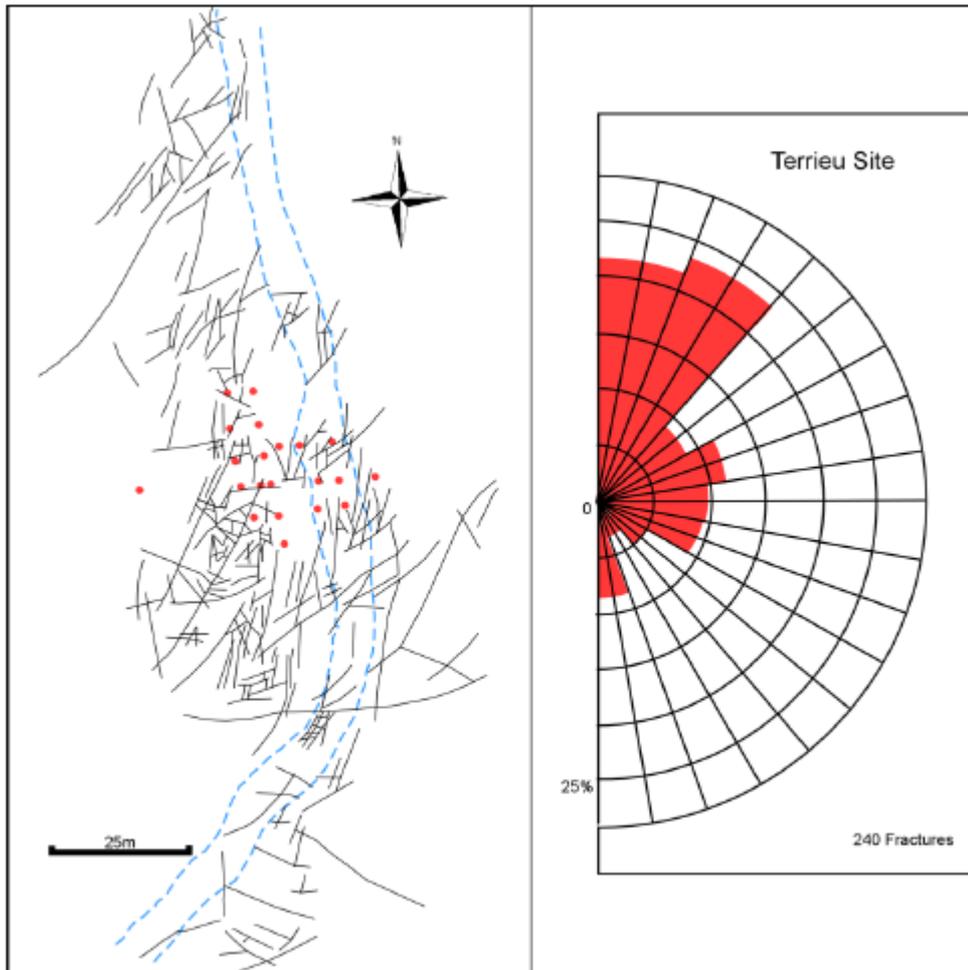


Figure 43: Terrieu experimental field site fracturing map from aerial photography (left), Rose diagram of cumulative fracture length (right) [after Drogue and Grilloit, 1976].

III. Le réservoir souterrain

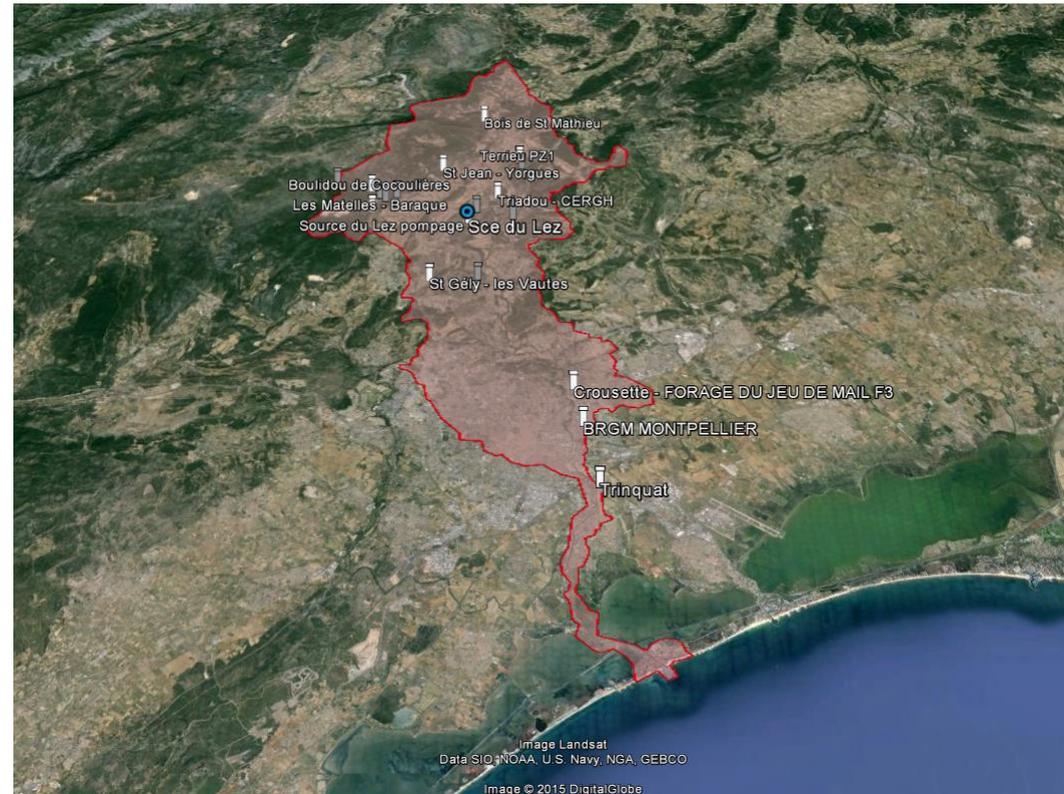
2. En souterrain: le forage



Vue de l'intérieur d'un piézomètres



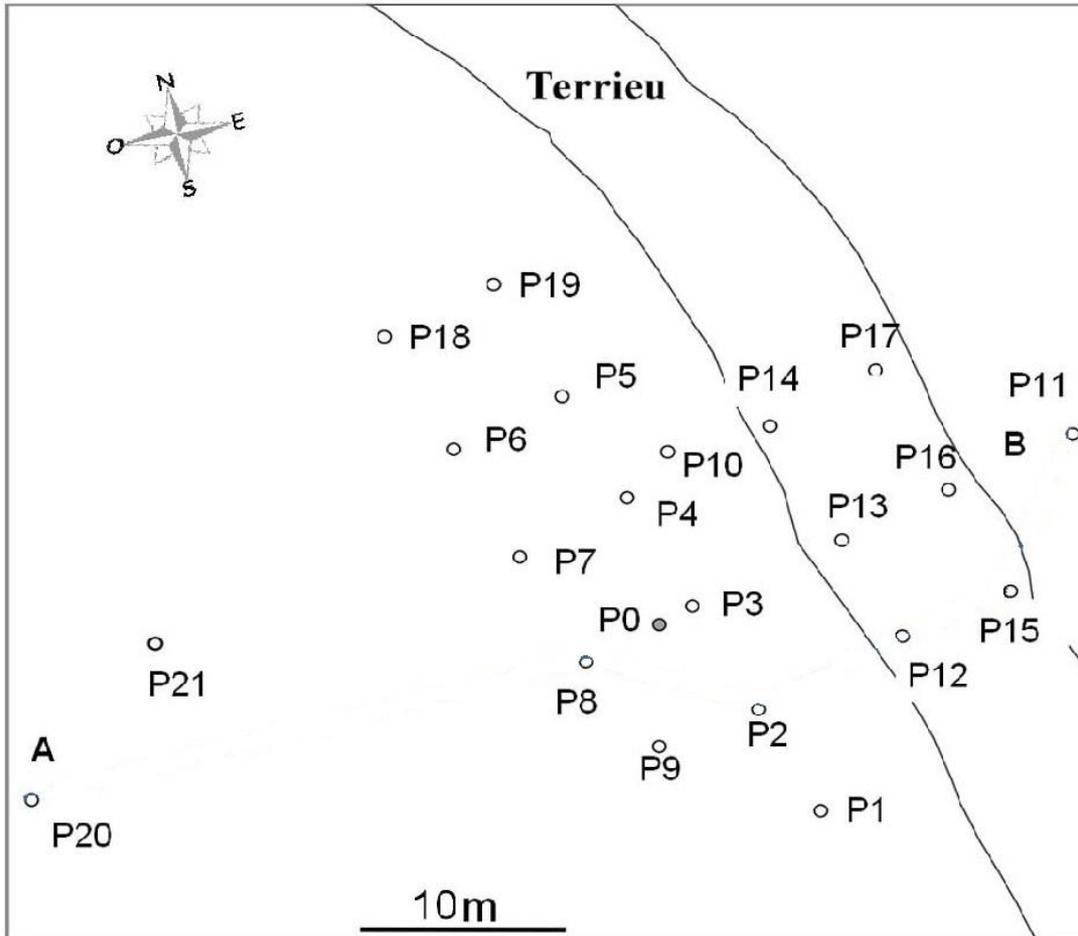
Crépines



III. Le réservoir souterrain

2. En souterrain: site expérimental du Terrieu

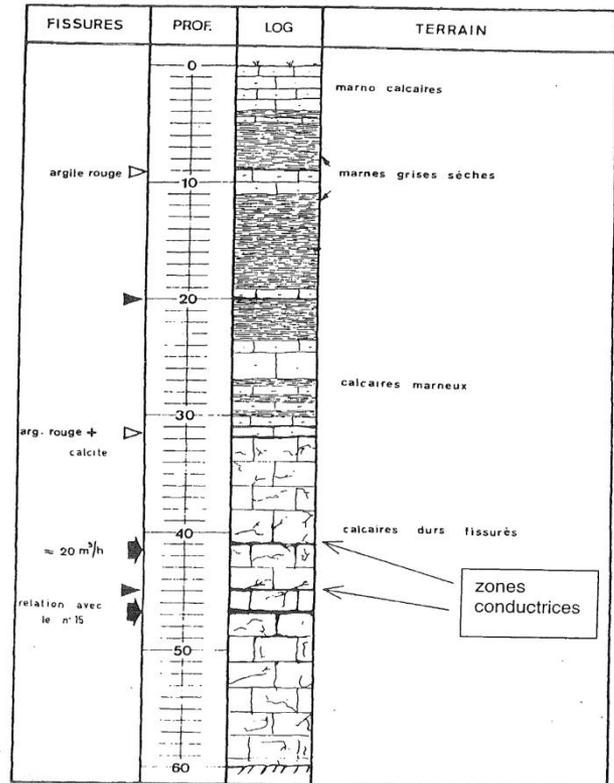
Établissement d'une carte piézométrique (interpolation spatiale) qui renseigne sur les axes de circulation



- ▶ - Fissure: Fentes à caractère caverneux (perte d'air lors du forage).
- ▽ - Niveau humide relevé lors de la perforation.
- ◄ - Venue d'eau; fente en charge.



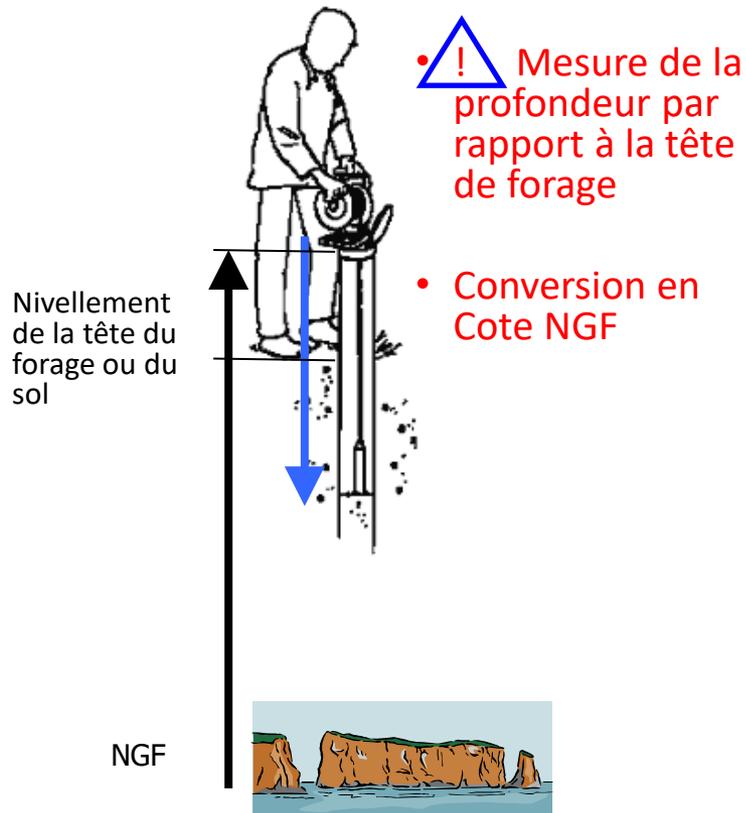
COUPE DU PIEZOMETRE N°8



III. Le réservoir souterrain

2. En souterrain: La piézométrie

- **Objectif:** Mesure du niveau d'eau dans la zone saturée (= toit de la nappe) et détermination du sens et de la direction des écoulements
- **Accès:** le piézomètre
- **Méthode:** Mesure manuelle



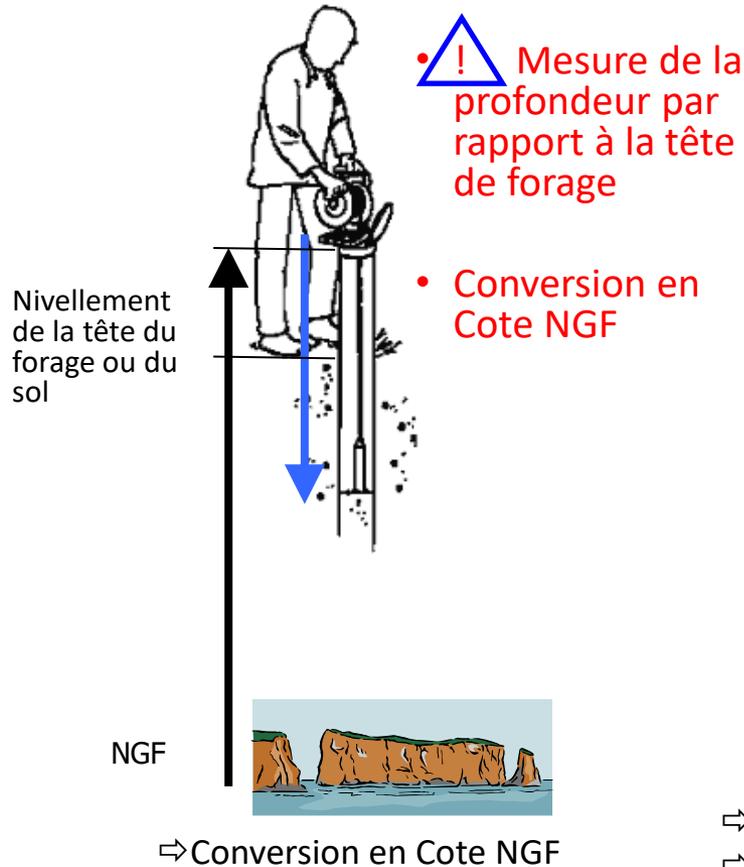
⇒ Conversion en Cote NGF



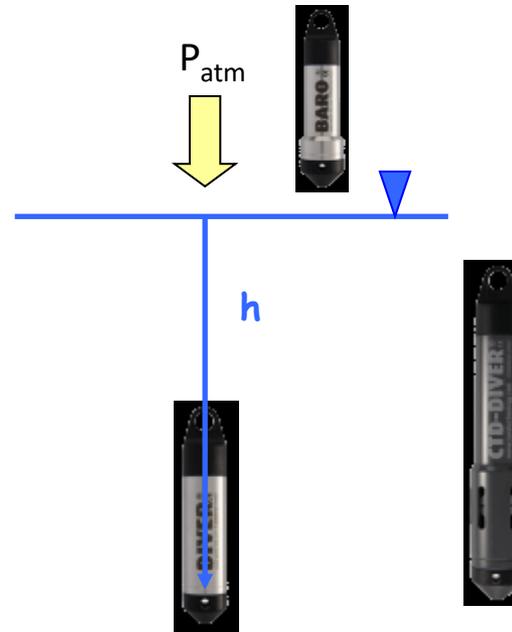
III. Le réservoir souterrain

2. En souterrain: La piézométrie

- **Objectif:** Mesure du niveau d'eau dans la zone saturée (= toit de la nappe) et détermination du sens et de la direction des écoulements
- **Accès:** le piézomètre
- **Méthode:** Mesure manuelle



Mesure en continue



$$P_{mes} = \rho gh + P_{atm}$$

- ⇒ Correction de la P_{atm}
- ⇒ Conversion en Cote NGF



Vue de l'intérieur d'un piézomètres

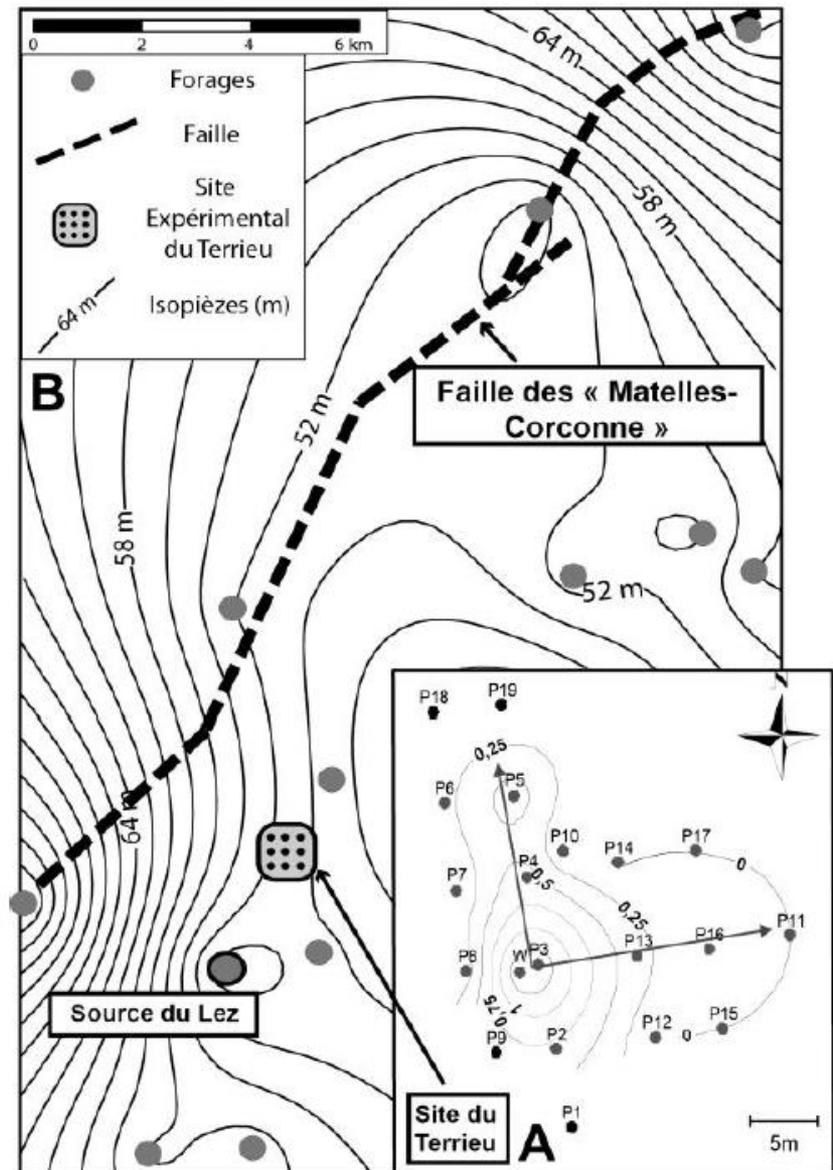
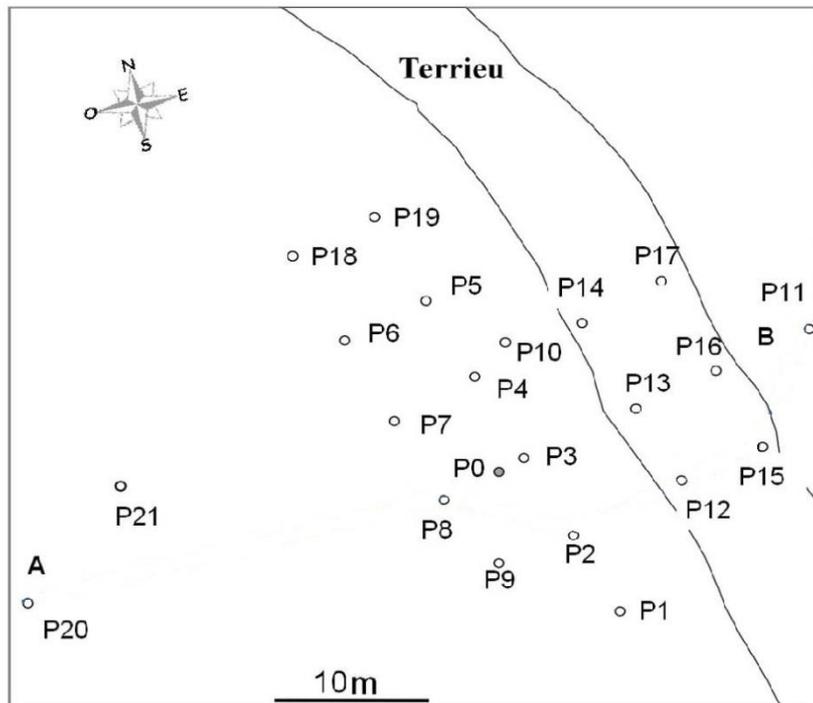


Crépines

III. Le réservoir souterrain

2. En souterrain: La piézométrie

Établissement d'une carte piézométrique (interpolation spatiale) qui renseigne sur les axes de circulation



III. Le réservoir souterrain

2. En souterrain: La diagraphie

Objectif:

Localisation des hétérogénéités et des zones de circulations préférentielles.

Forages : P₁₅, P₉, P₂, P₁₃, P₁₁

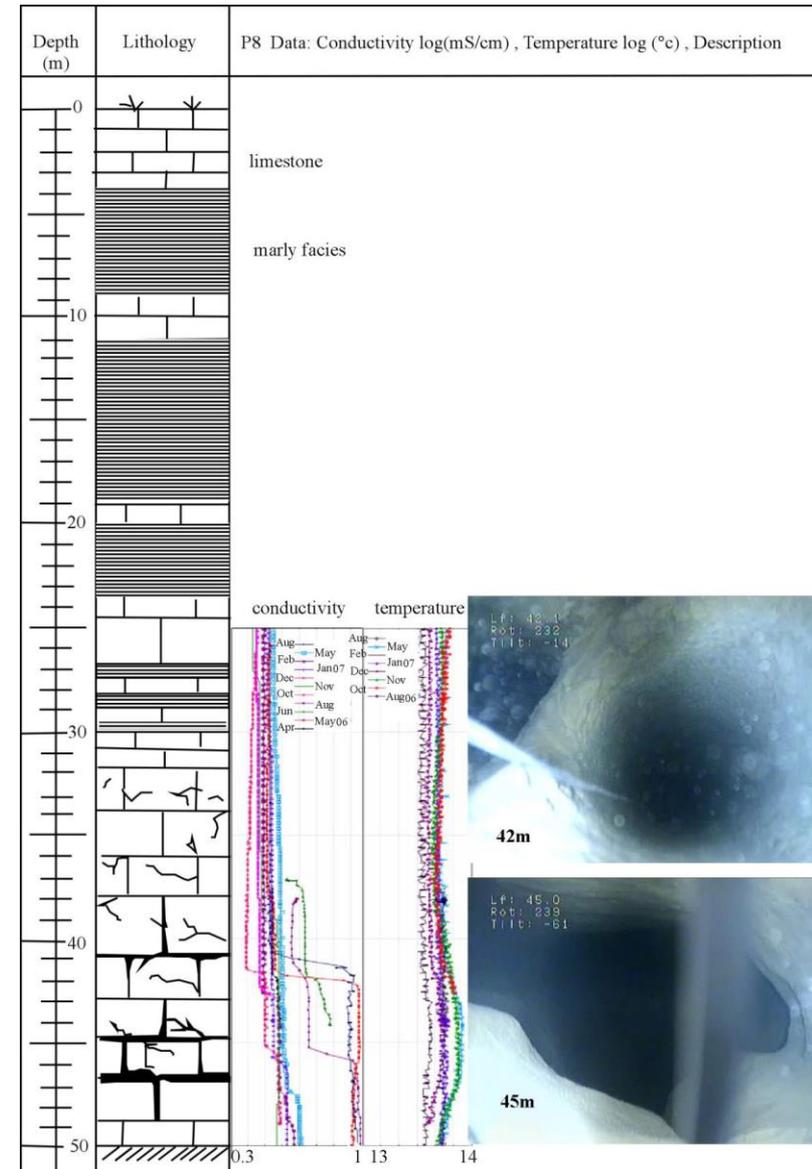
Méthode: Température et conductivité électrique

a) Mesure manuelle

b) CTD en continu (1s)

Mesure de la température et de la conductivité à intervalle régulier (50 cm) depuis le niveau d'eau jusqu'au fond du forage.

Repérer les profondeurs de variations



III. Le réservoir souterrain

2. En souterrain: La vidéo en forage

Objectif: Détection de fractures (localisation, orientation, hauteur, ouverture, degré de calcification ...)

Que peut-on voir:

- Limite entre bancs de stratification (ouvert/fermé)



- Fractures



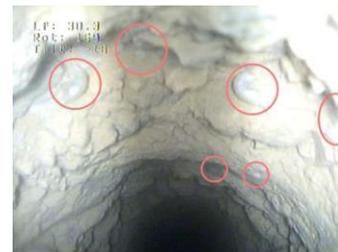
Fracture NS fermée

- Conduits karstiques



- Changements de lithologie

- Des organismes vivants

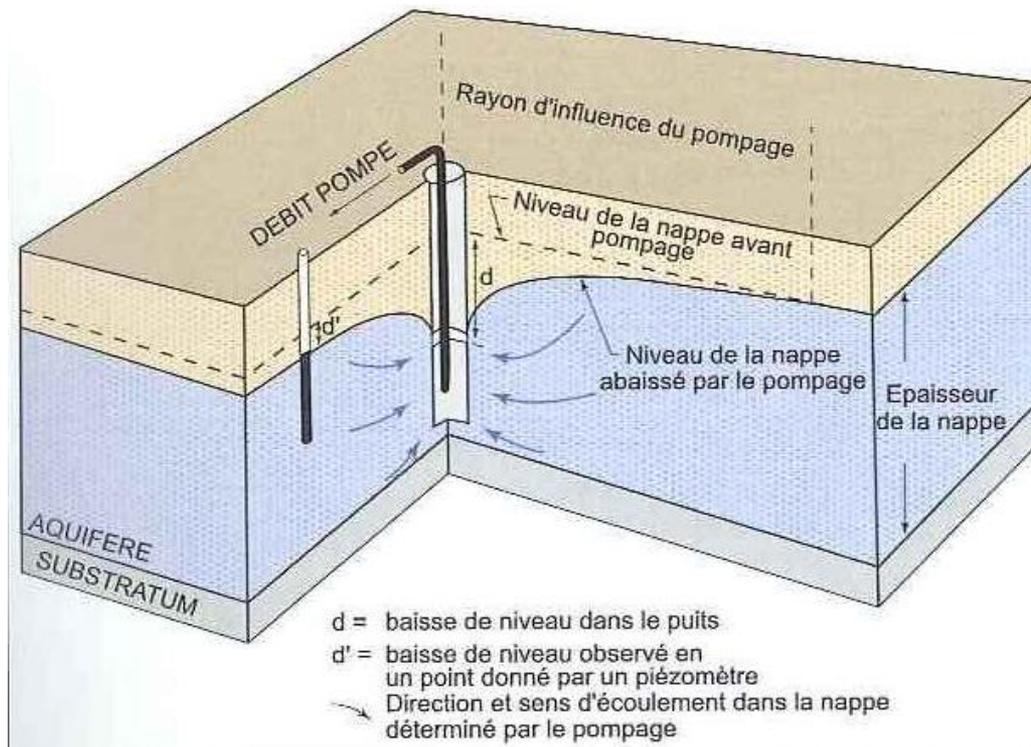


Niveau marneux

III. Le réservoir souterrain

2. En souterrain: Les pompages

Objectif: déterminer indirectement la capacité de la roche à laisser circuler l'eau

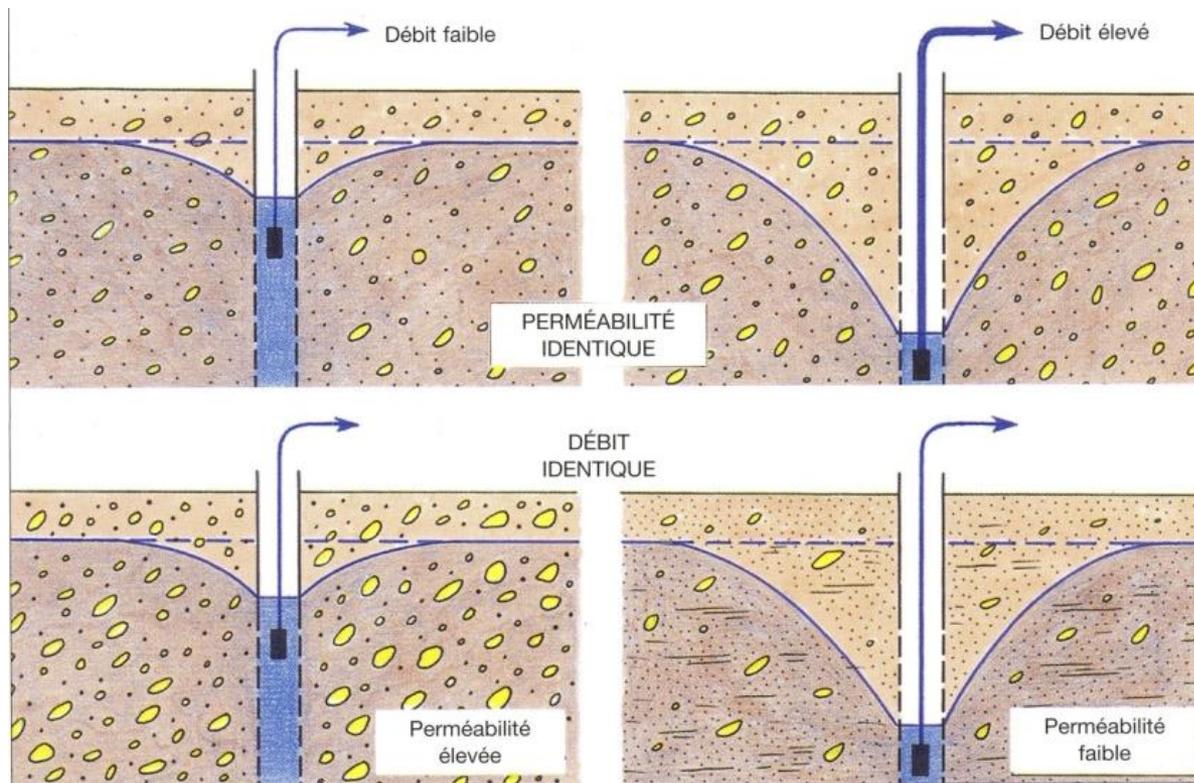


III. Le réservoir souterrain

2. En souterrain: Les pompages

Objectif: déterminer indirectement la capacité de la roche à laisser circuler l'eau

Effet du débit pompé et de la nature du terrain sur le cône de rabattement



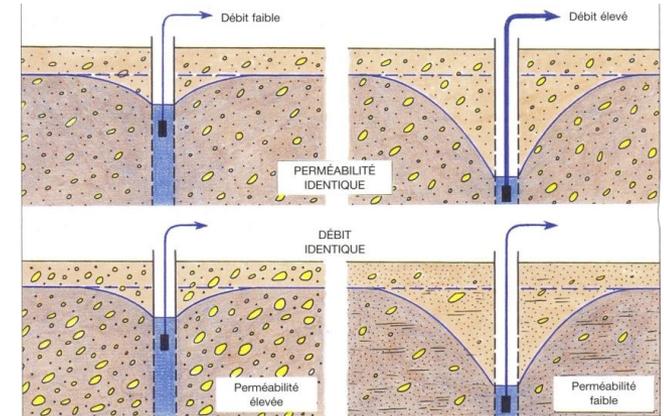
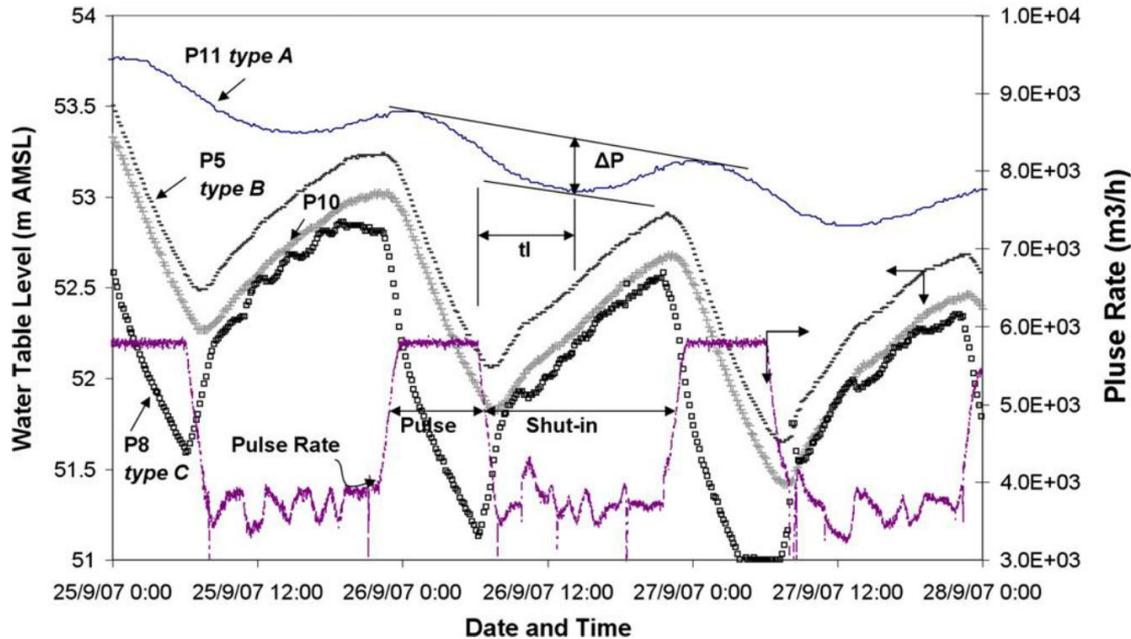
(Collin, 2006)

III. Le réservoir souterrain

2. En souterrain: Les pompages

Objectif: déterminer indirectement la capacité de la roche à laisser circuler l'eau

Effet du débit pompé et de la nature du terrain sur le cône de rabattement



(Collin, 2006)

III. Le réservoir souterrain

2. En souterrain: Les pompages

Objectif: déterminer indirectement la capacité de la roche à laisser circuler l'eau

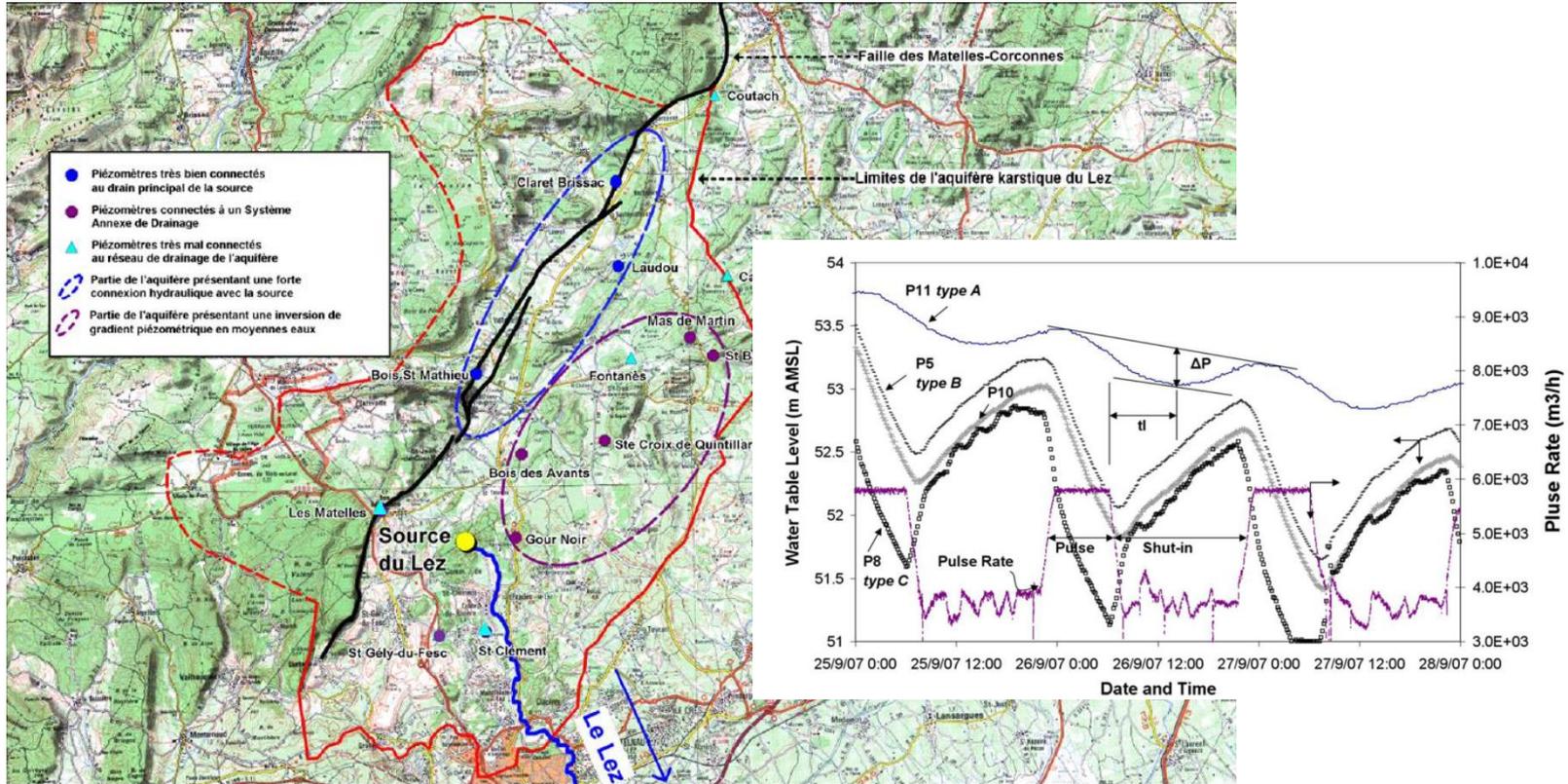
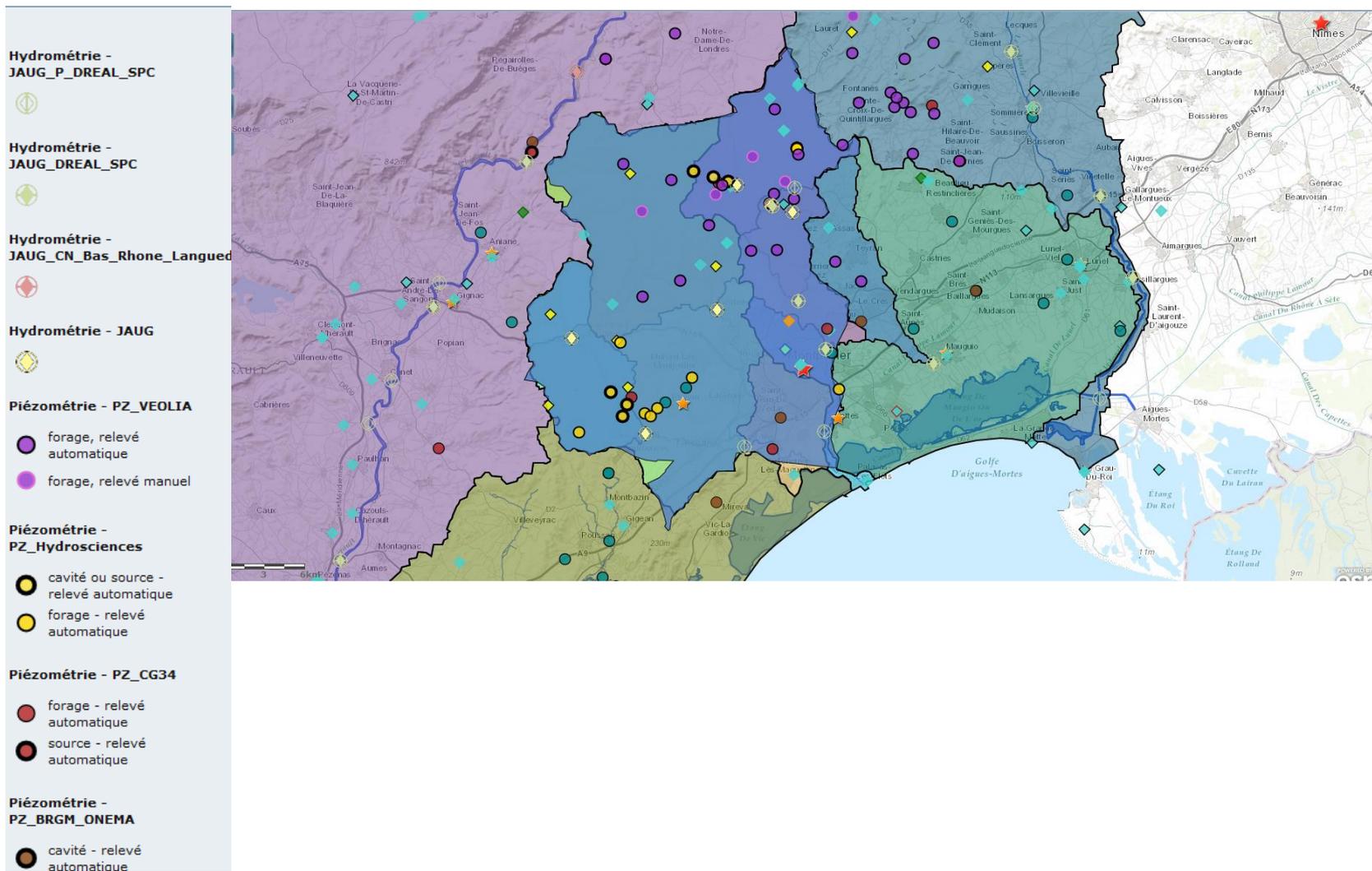


Figure 98 : classification du comportement des piézomètres du Lez en période de sollicitation des réserves (période de tarissement de la source) – modifié d'après Conroux (2007)

IV. Les sorties

- Exutoires naturels (temporaires ou perennes): sources, émergences
- Exutoires artificiels : forages, puits, captages



IV. Les sorties

1. Limnimétrie

En pratique, on ne mesure pas l'évolution du débit mais l'évolution de la hauteur d'eau.

- Mesure de débit ponctuel à H connu = jaugeage
- Association hauteur / débit = courbe de tarage
- Suivi des hauteurs d'eau



(Source du Lez, <http://www.medycyss.org>)

- Echelle limnimétrique
 - Règle ou tige graduée en métal, bois ou pierre permettant la lecture directe de la hauteur d'eau à la station.
 - Précision +/- 5mm
 - Le zéro de l'échelle doit être en dessous du niveau des plus basses eaux connues.
 - En amont d'une section de contrôle : seuil, pont, vallée etc...

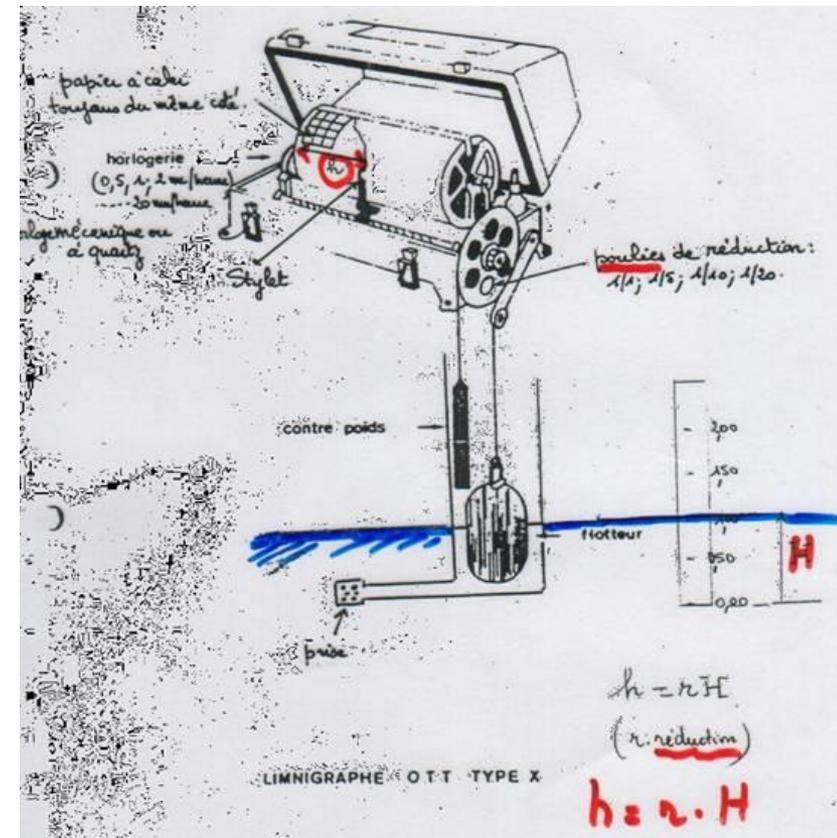
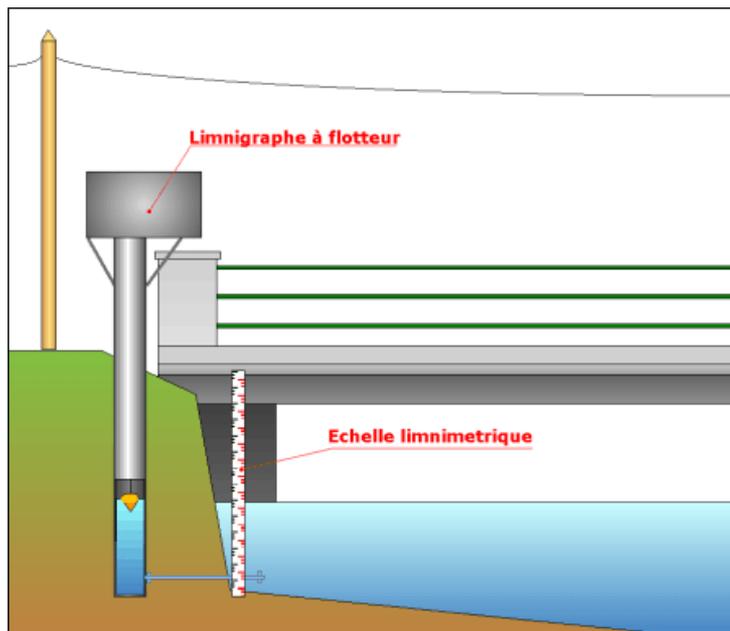
IV. Les débits

1. Limnimétrie

En pratique, on ne mesure pas l'évolution du débit mais l'évolution de la hauteur d'eau.

- Mesure de débit ponctuel à H connu = jaugeage
- Association hauteur / débit = courbe de tarage
- Suivi des hauteurs d'eau

- Station de mesure limnimétrique



IV. Les débits

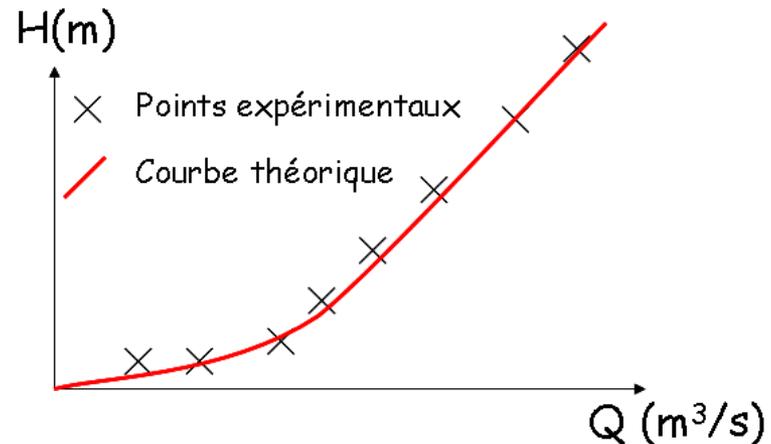
1. Limnimétrie

- Conversion $H \Rightarrow Q$: La Courbe d'étalonnage

Station + Échelle

\Rightarrow Chronique de hauteur

Conversion en débit via
la Courbe de Tarage



Obtention:

- Jaugeage (H, Q) puis interpolation

IV. Les débits

1. Réseau de mesure sur le BV du Lez



IV. Les débits

2. Les jaugeages

- Ensemble des opérations, des mesures et des calculs destinés à déterminer le débit en un point donné d'un cours d'eau ou d'une source.
Ce point est appelé "station de jaugeage".

- Méthodes:
 - Exploration du champ de vitesse sur une section (Moulinet, ultra-sons, champ électromagnétique etc.)
 - Traçage
 - Flotteur
 - Ouvrages calibrés

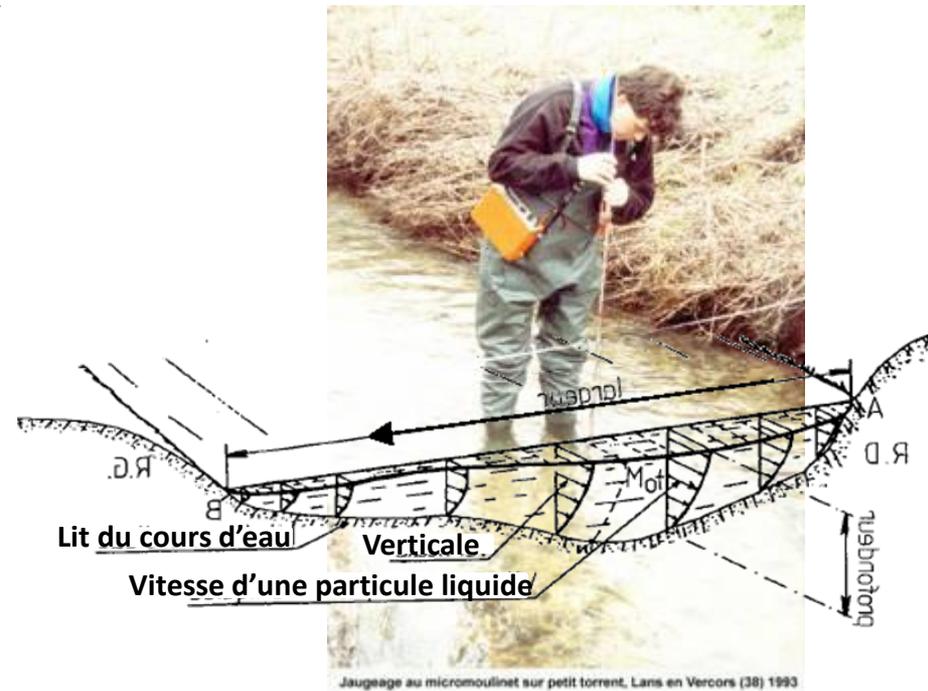
Choix en fonction de :

- La taille du cours d'eau
- La rapidité de la crue
- L'accessibilité du site
- Des moyens financiers...

IV. Les débits

2. Les jaugages - exploration du champ de vitesse

- Le moulinet hydrométrique
 - Moulinet hélicoïdal plongé dans le cours d'eau, face au courant
 - Mesure des vitesses du courant en **de nombreux points sur plusieurs verticales** de la section mouillée, pour calculer la vitesse moyenne.
⇒ calcule de la vitesse moyenne

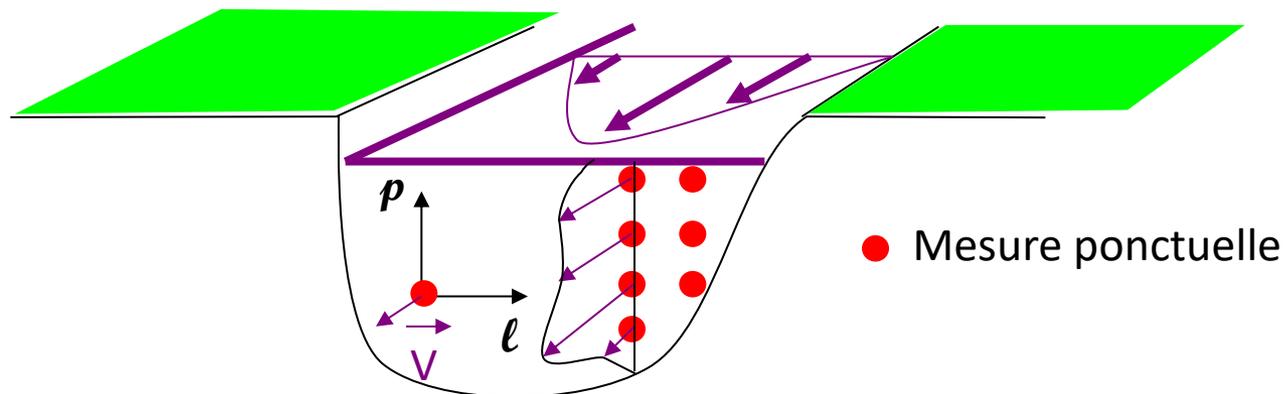


- Profil de vitesse : non uniforme
 - Répartir les points de mesure sur toute la section
 - Plusieurs verticales et plusieurs points par verticale

IV. Les sorties

2. Les jaugeages - exploration du champ de vitesse

- Formulation mathématique



- Méthode : double intégrale
 - Débit plan sur chaque verticale (m^2/s) puis intégration sur la largeur ($\Rightarrow \text{m}^3/\text{s}$)

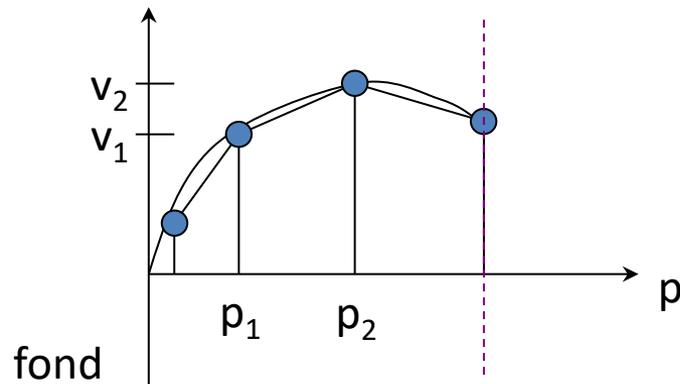


$$Q = \int_{\text{Larg.}} \left(\int_{\text{Prof.}} V(p, l) \cdot dp \right) \cdot dl = V_{\text{moy.}} * S_{\text{mouillée}}$$

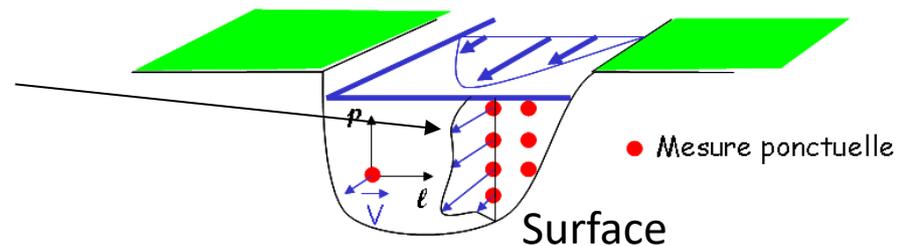
IV. Les sorties

2. Les jaugeages - exploration du champ de vitesse

- Sur une verticale:



- Débit plan $q(\text{m}^2/\text{s}) = \Sigma$ (Aire des trapèzes)

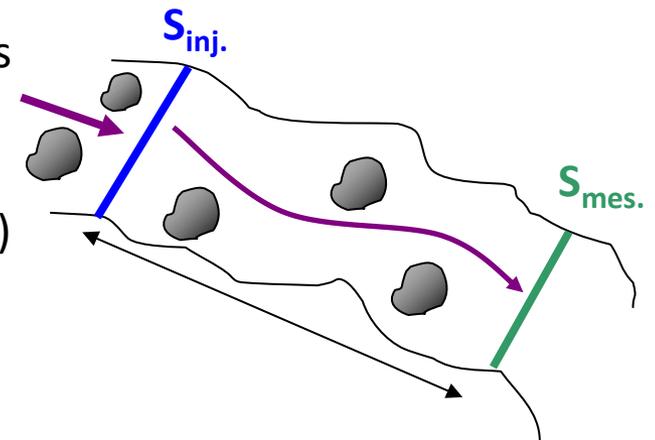


- Deuxième calcul d'intégral
= intégrale des débit plans en fonction de l
=> même méthode.
- Difficultés sur le terrain:
 - Comment choisir la section de mesure?
 - Combien de verticales et quelle répartition en fonction de l ?
 - Combien de points par verticale et quelle répartition en fonction de p ?
 - Pb des jaugeages en condition de crue...

IV. Les sorties

2. Les jaugages - injection de traceur (=« chimique »)

- Principe
 - Injection instantanée : Analyse de l'évolution du panache
 - Conservation de la masse
(Reg. Perm., ni pertes ni apport d'eau ou de traceur)
 - Distance de bon mélange entre les deux sections
- Choix du traceur
 - Facilement mesurable (Cond. e⁻ ou fluorescence)
 - Conservatif
 - Solubilité forte (faible volume de solution)
 - Non polluant
- Protocole
 - Suivi en continu de la restitution
 - Analyse courbe de restitution



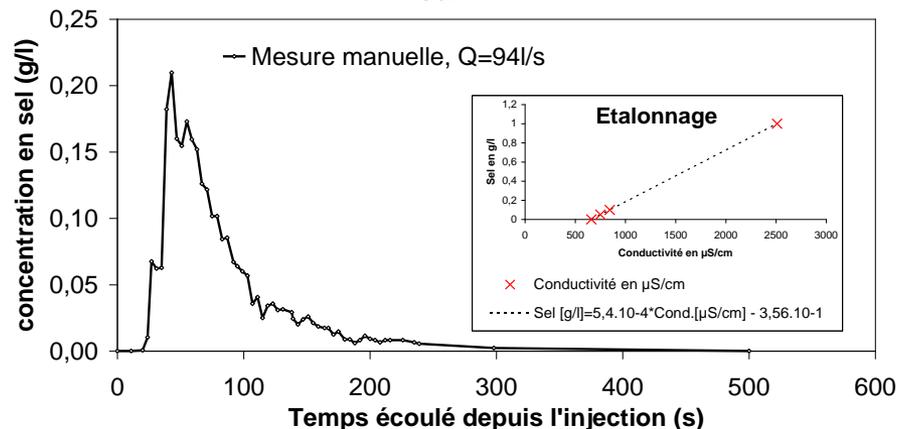
IV. Les sorties

2. Les jaugages - injection de traceur (=« chimique »)

- Protocole
 - Suivi en continu de la restitution
 - Analyse courbe de restitution

$$Q = \frac{m_{\text{injectée}}}{\int_0^T C(t).dt}$$

Courbes de restitution du traceur
Estimation du débit du Lez par traçage instantané au sel



IV. Les sorties

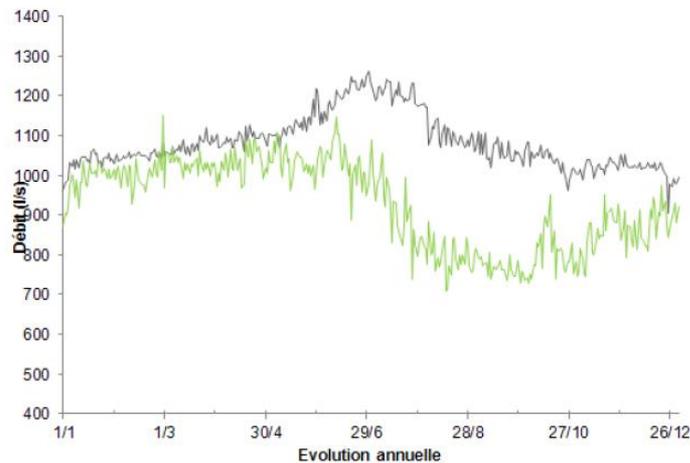
2. Les jaugeages - jaugeage au flotteur

- Estimation rapide des débits de crue
- Vitesse du flotteur
~ Vitesse des premiers cm
- Coefficient pour obtenir la vitesse moyenne
- Nécessite de connaître la section mouillée

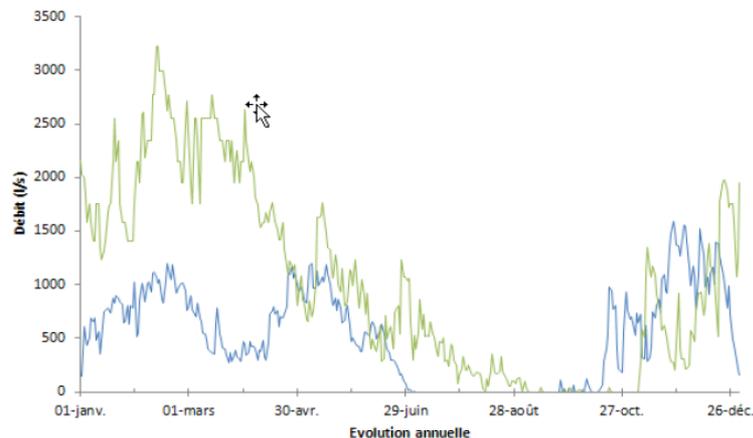


Ex. $V_{\text{moy}} = 0.8 * V_{\text{surf.}}$
puis $Q = V_{\text{moy}} * S_{\text{mouillée}}$

Bilan Entrée-Sortie sur le système du Lez



Débits de prélèvement à la source du Lez

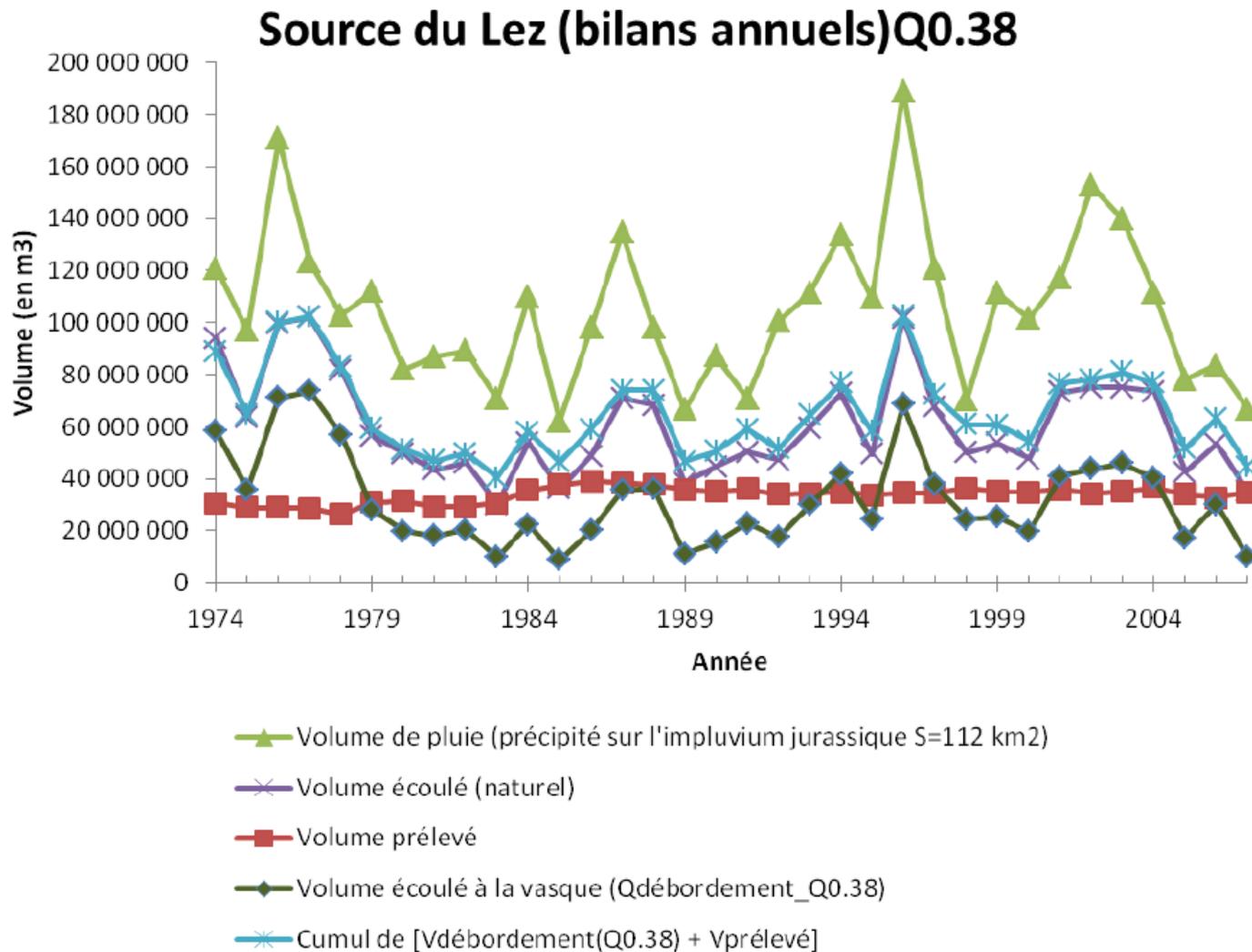


Débits de Débordement à la source du Lez

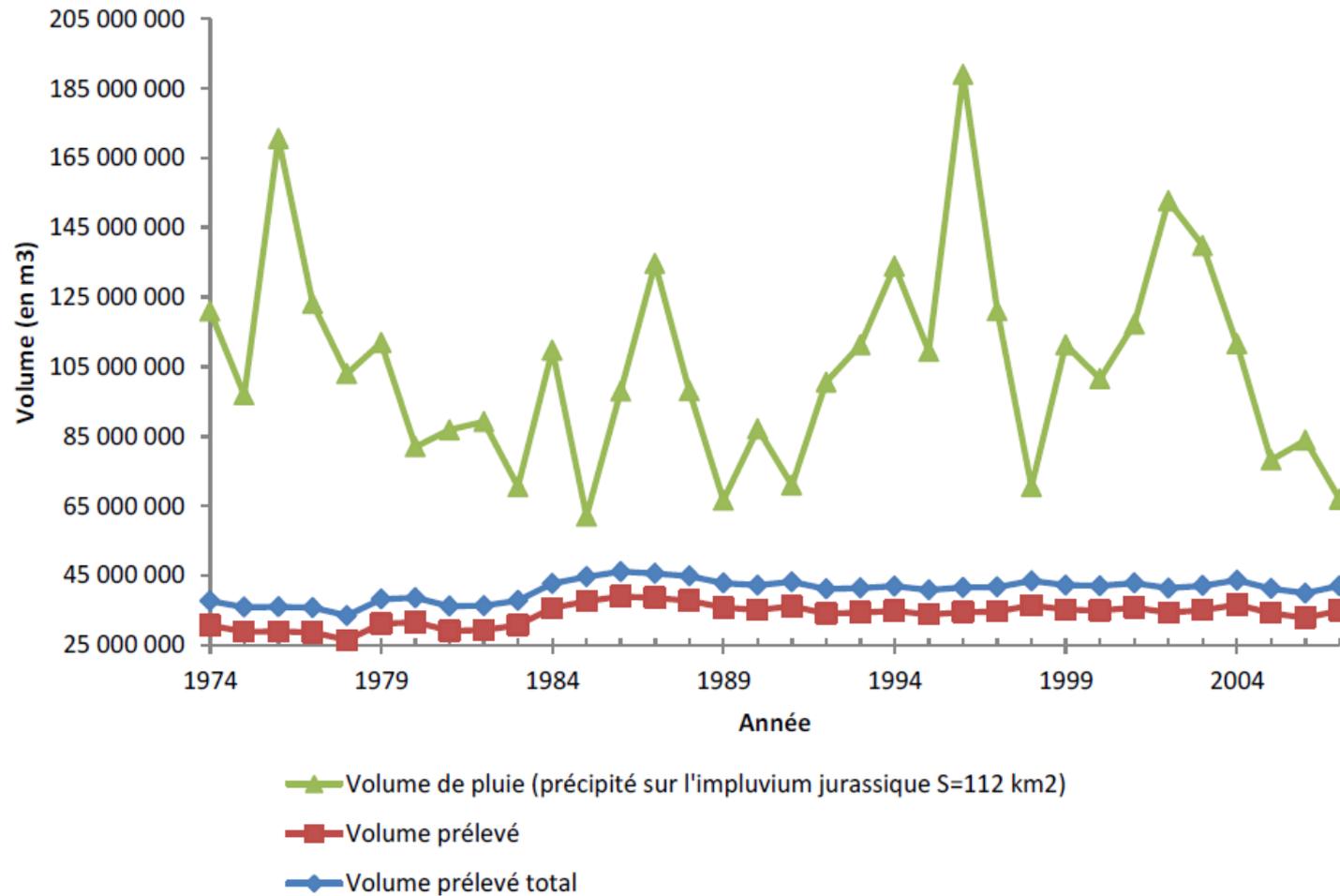
Augmentations des prélèvements après 1982

⇒ Baisse de la fréquence et des volumes de débordements
Risque à long terme d'épuisement des réserves?

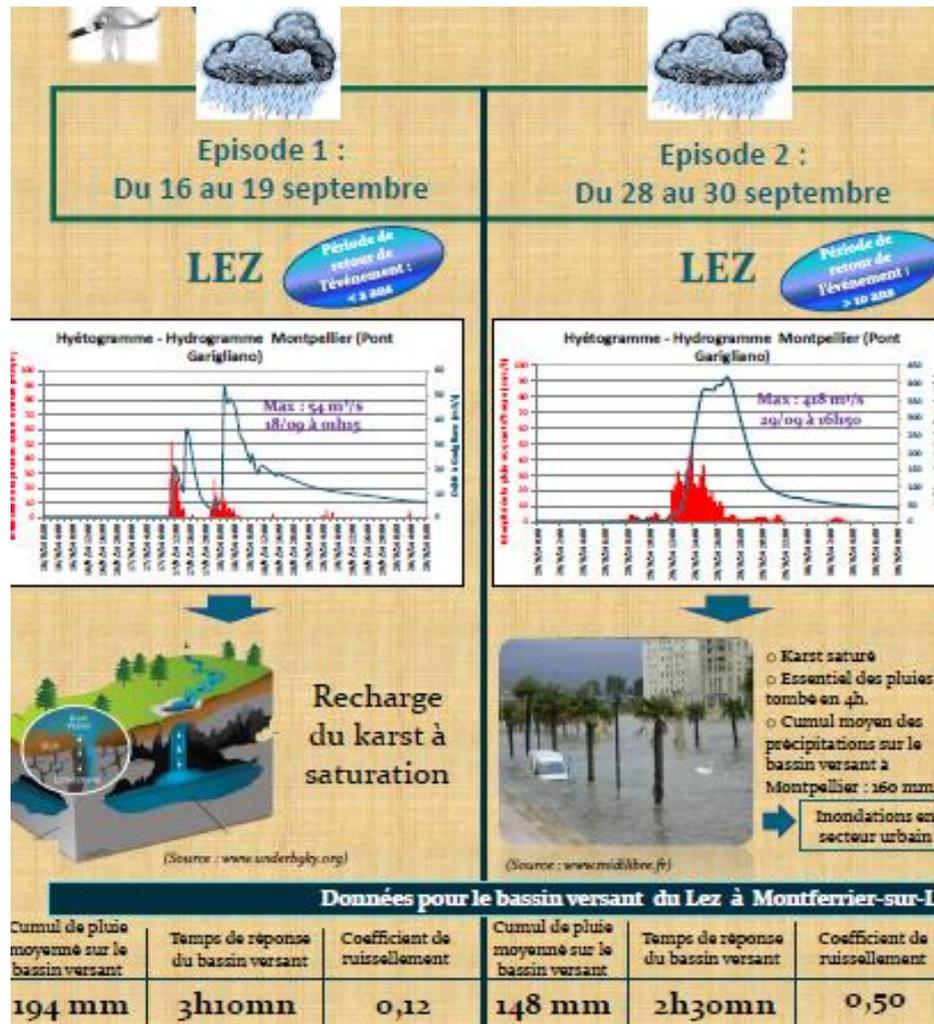
Bilan Entrée-Sortie sur le système du Lez



Bilan Entrée-Sortie sur le système du Lez



Influence des prélèvements sur les crues



Poster PIFE, Adrien Pialot, 2014

Influence positive de la gestion active du système ⇨ Atténuation des premières crues automnale