



**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

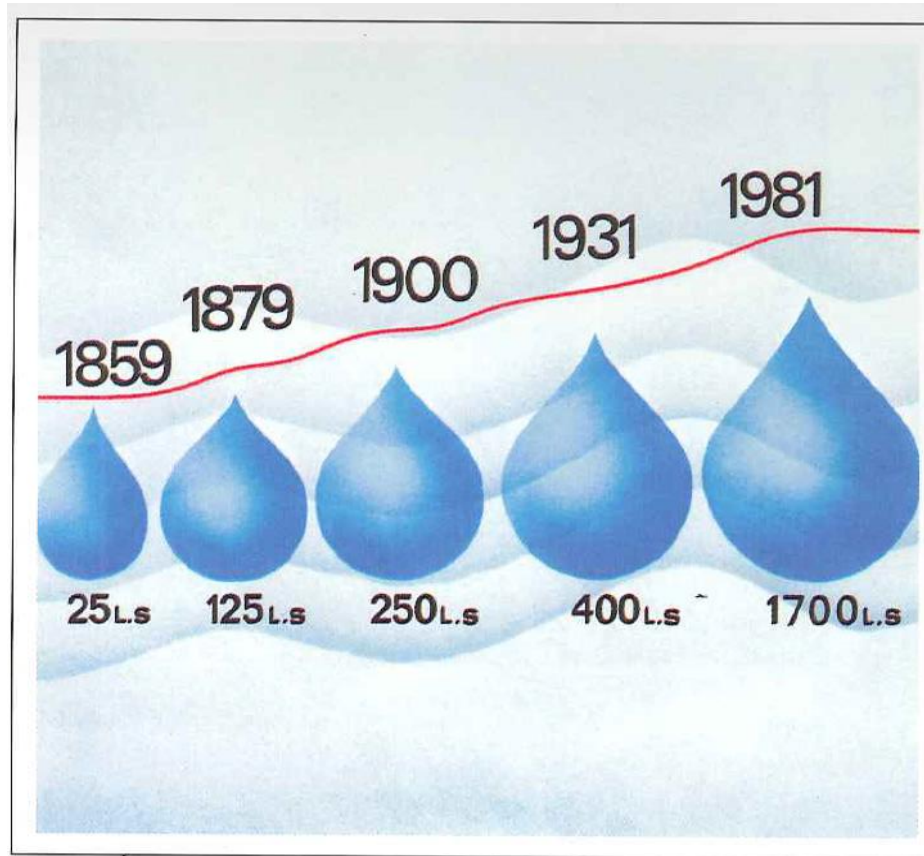
### I. Alimentation en eau de la ville de Montpellier



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

---

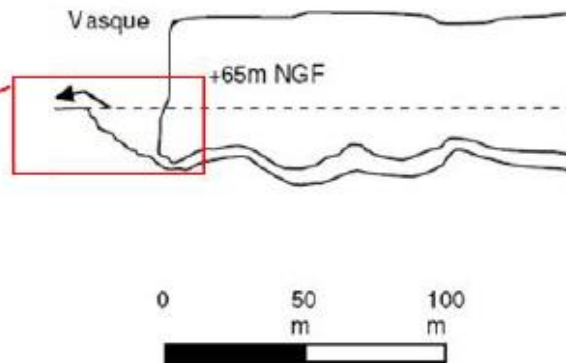


**Débit demandé à la source du Lez**

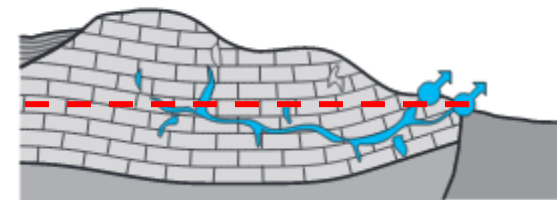
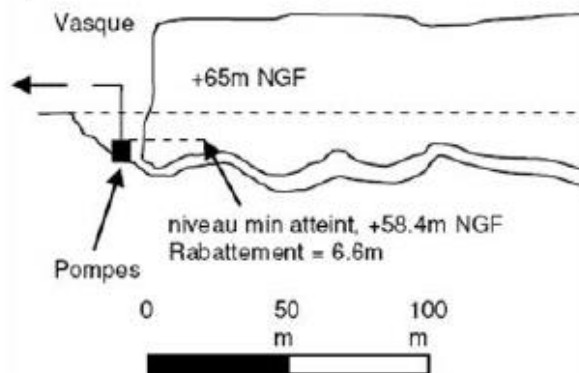
# I. Alimentation en eau de la ville de Montpellier

## *La source karstique du Lez*

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



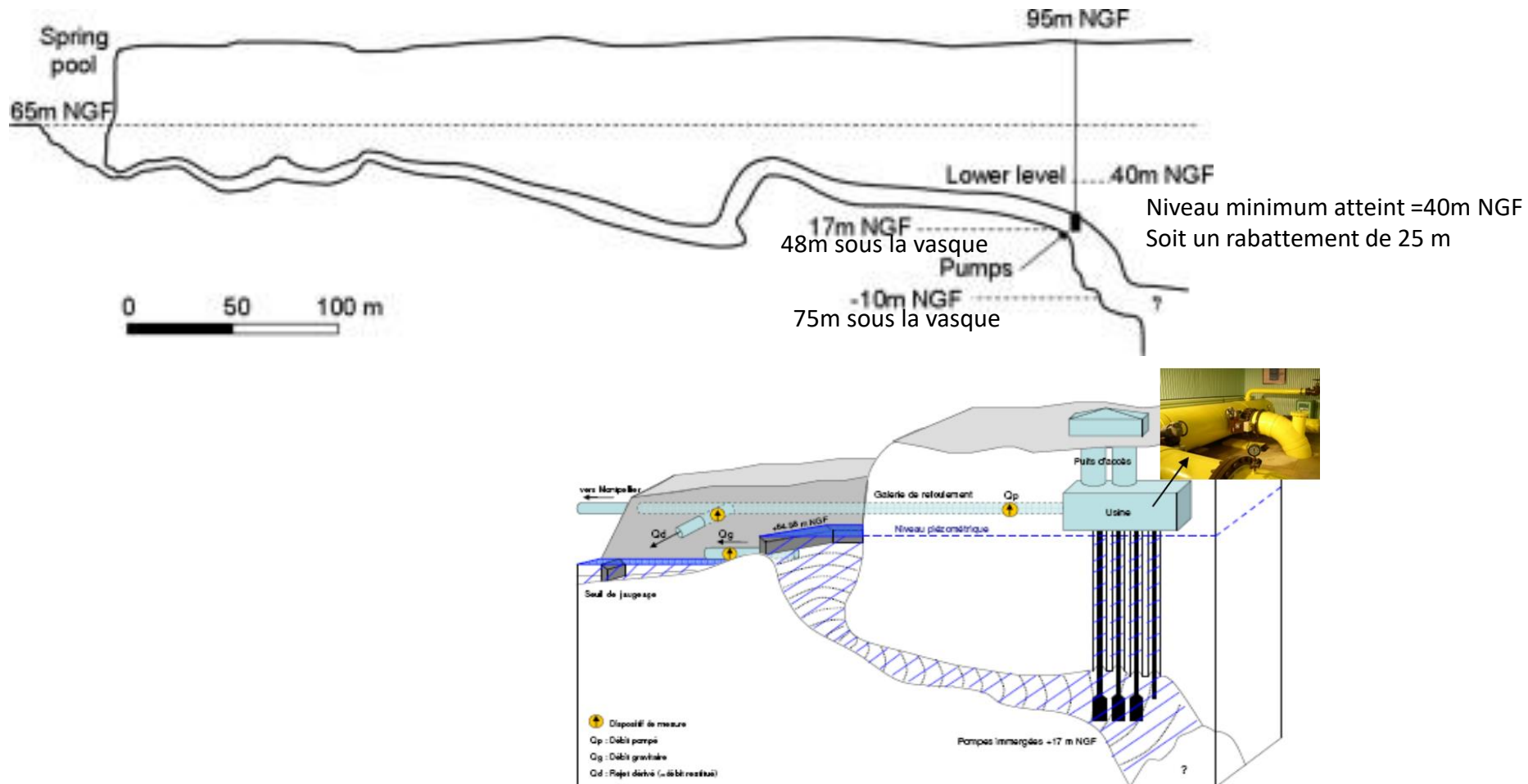
Dispositif de pompage dans la vasque d'émergence de la source du Lez (de 1968 à 1982).



# I. Alimentation en eau de la ville de Montpellier

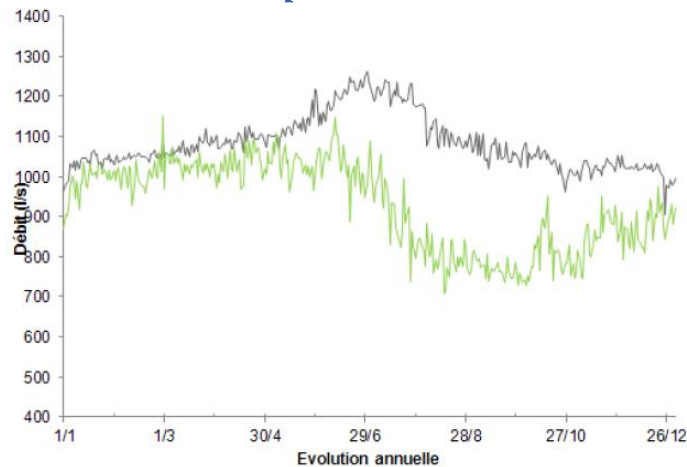
## *La source karstique du Lez*

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

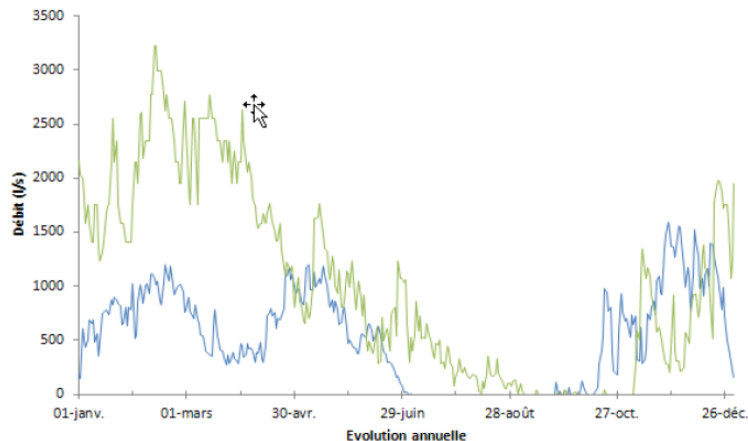


# I. Alimentation en eau de la ville de Montpellier

## *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 1m<sup>2</sup> 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?



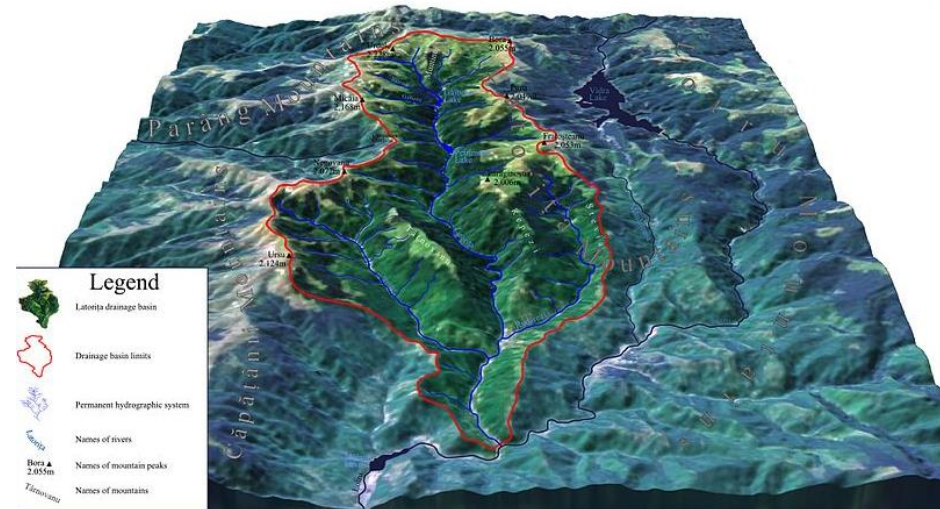
## II. Les précipitations

### 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.)



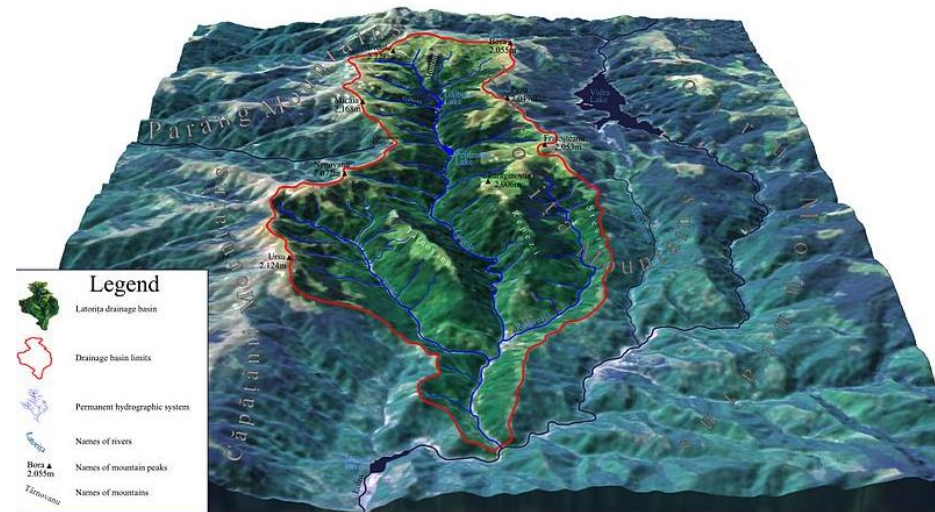
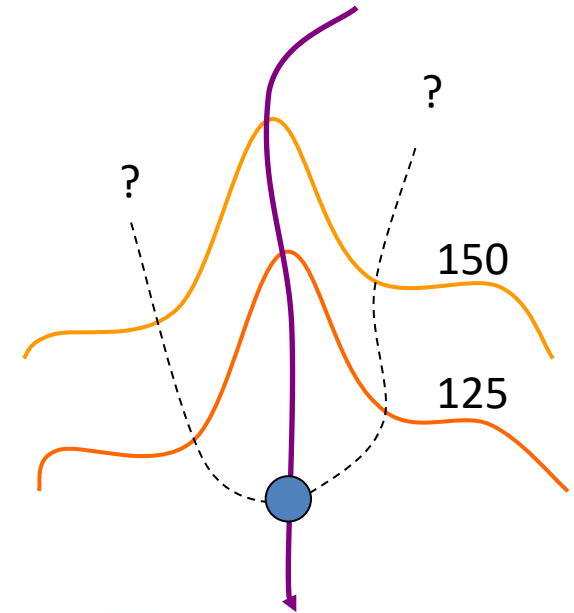


## II. Les précipitations

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

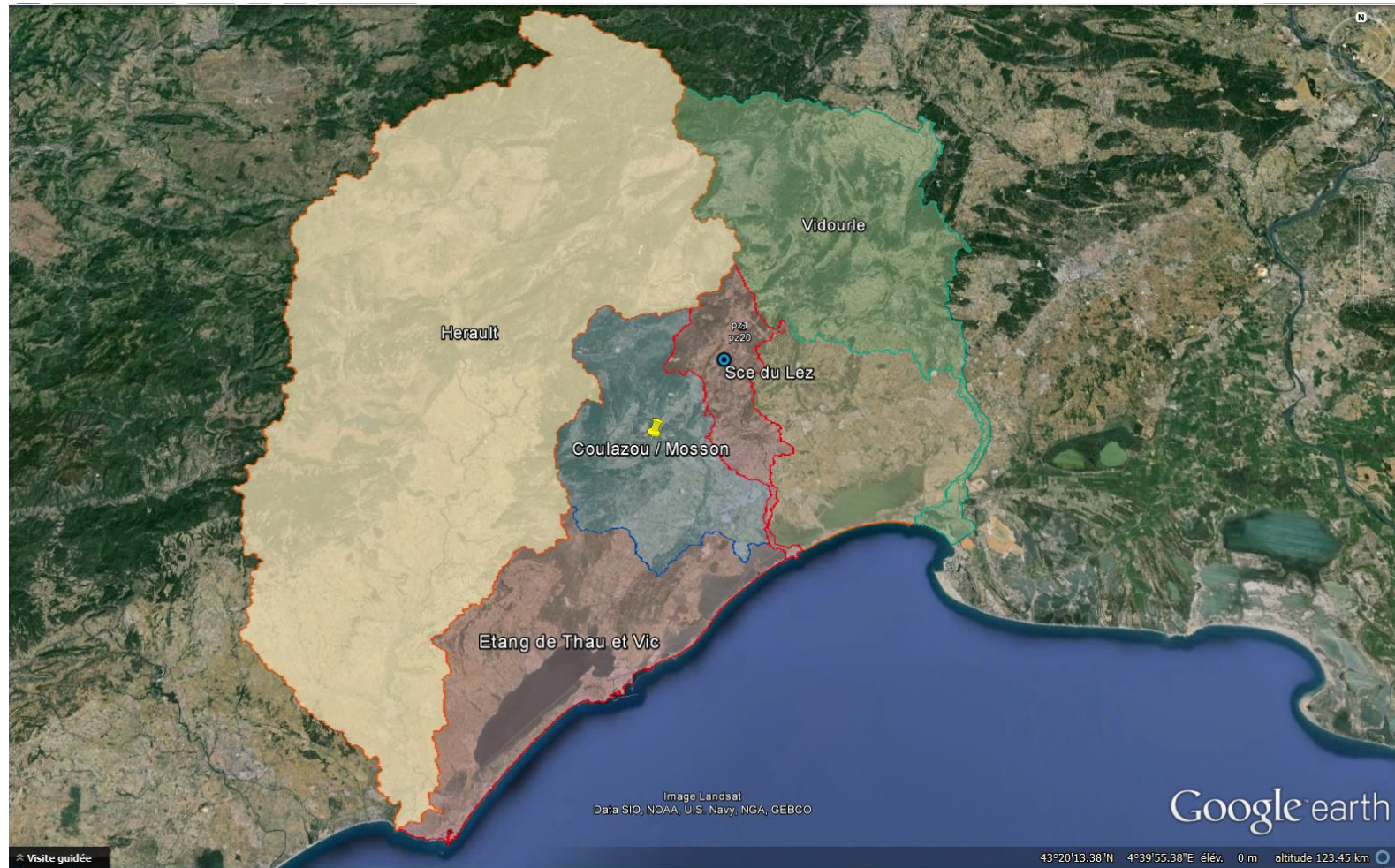
#### Délimitation du bassin-versant

- 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

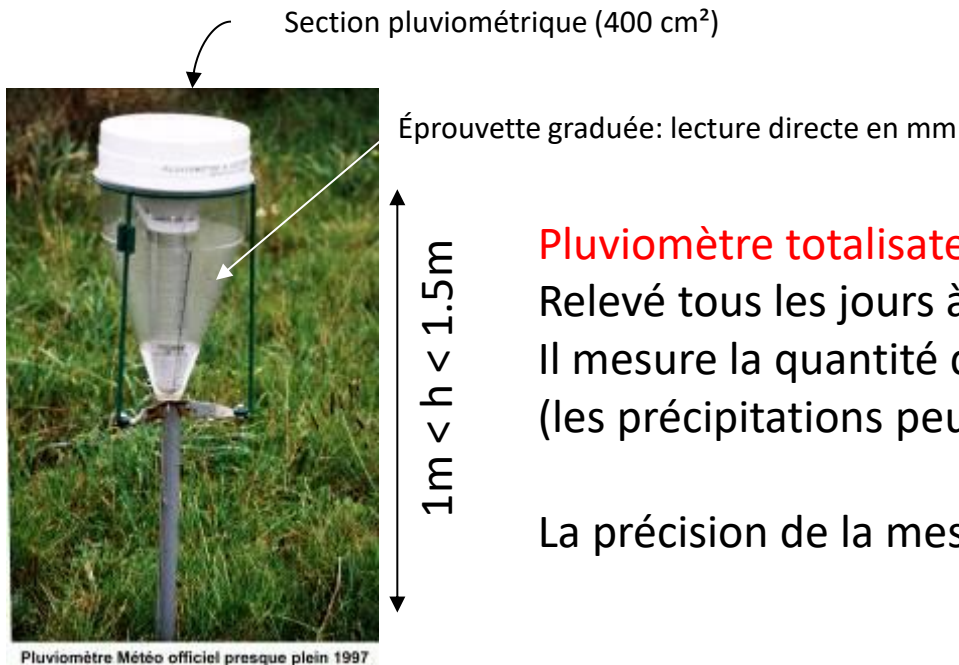
### 1. Interface sol/atmosphère : le Bassin Versant (BV)



## 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)

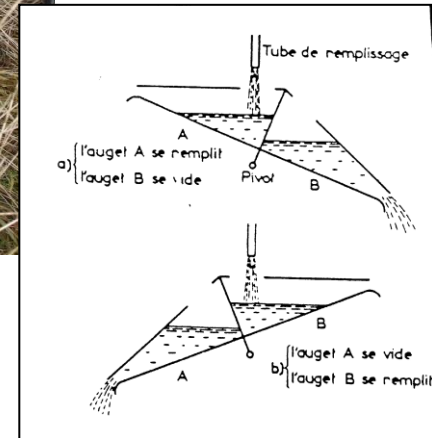
La précision de la mesure est au mieux de 0.1 mm



## II. Les précipitations

### 2. Mesures - Au sol

- Pluviographe (auget basculant) :



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

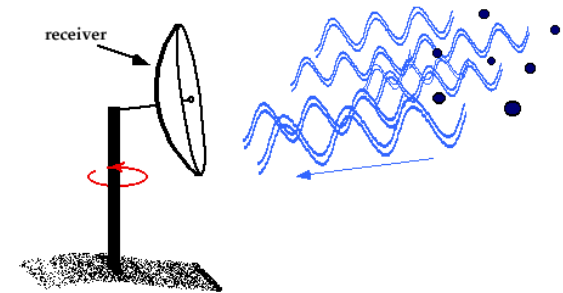
- Mesure de l'instant du basculement  $\Rightarrow$  Cumul de pluie=f(t)

## 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  $\mu\text{W}$ )
  - 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

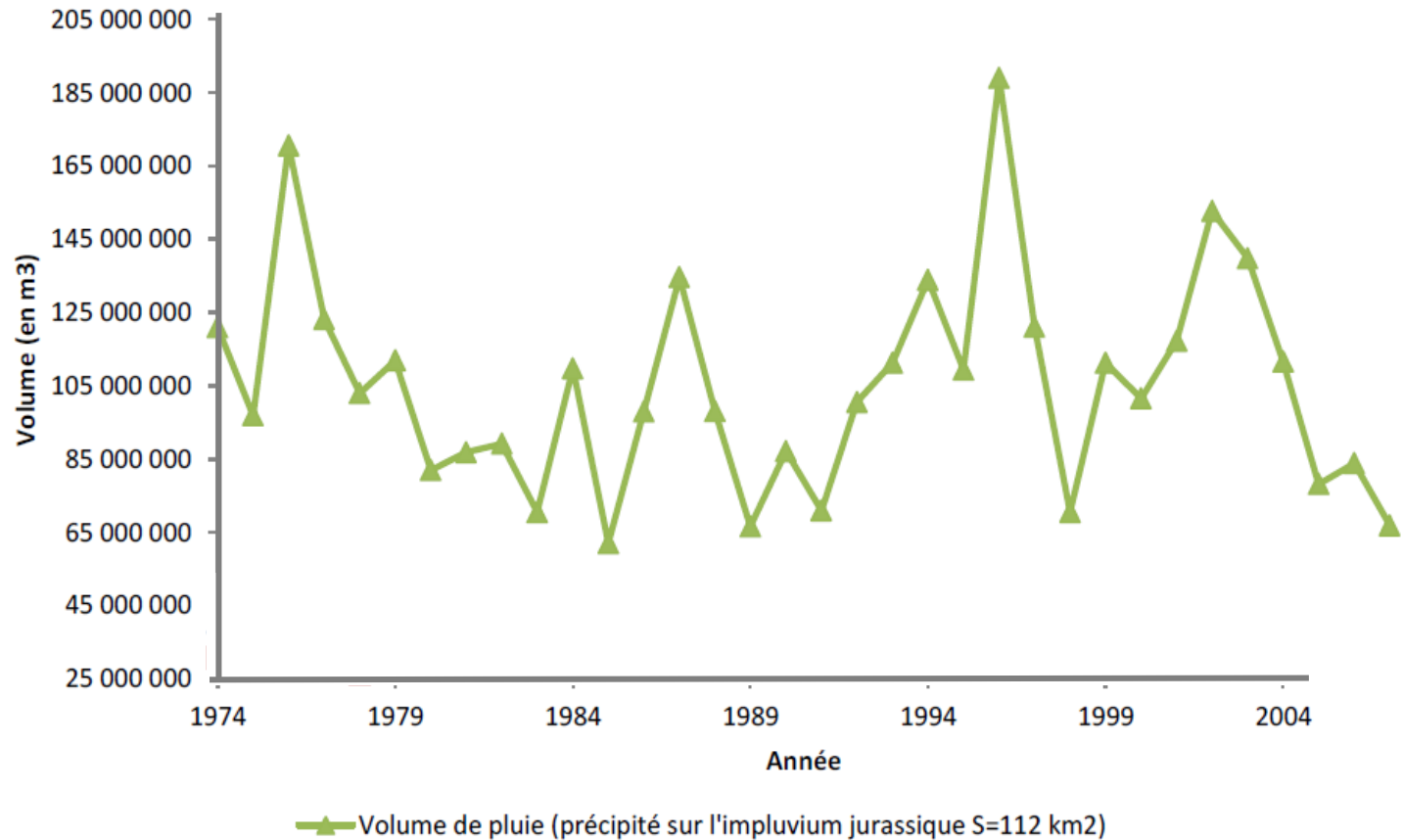
### 2. Mesures - Réseau de mesure sur le BV du Lez





## II. Les précipitations

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

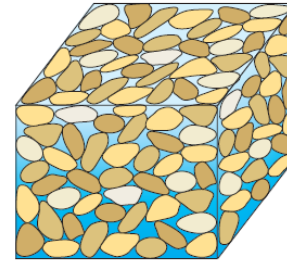


# III. Le réservoir souterrain

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

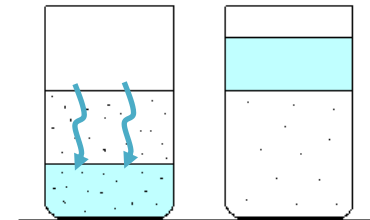
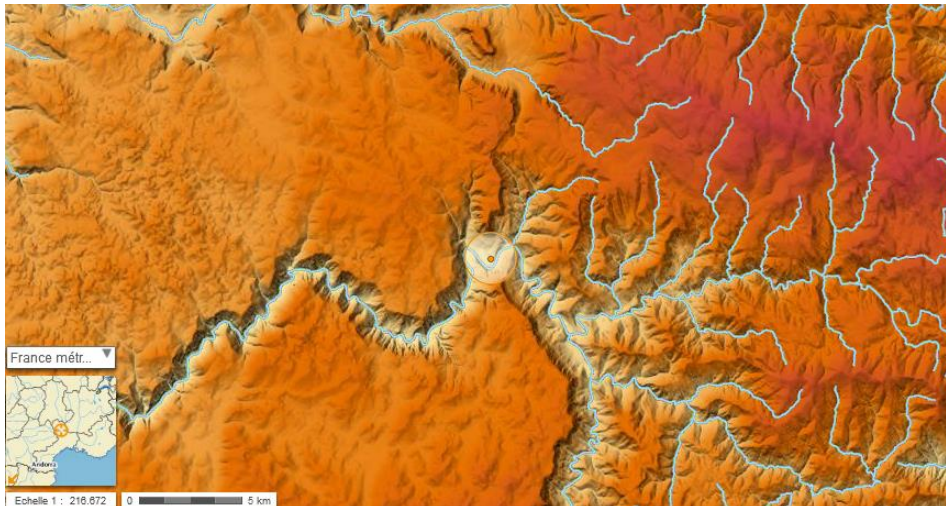
Stockage: **porosité** (n) + écoulements: **perméabilité** (K)

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



A. Well-sorted sand

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



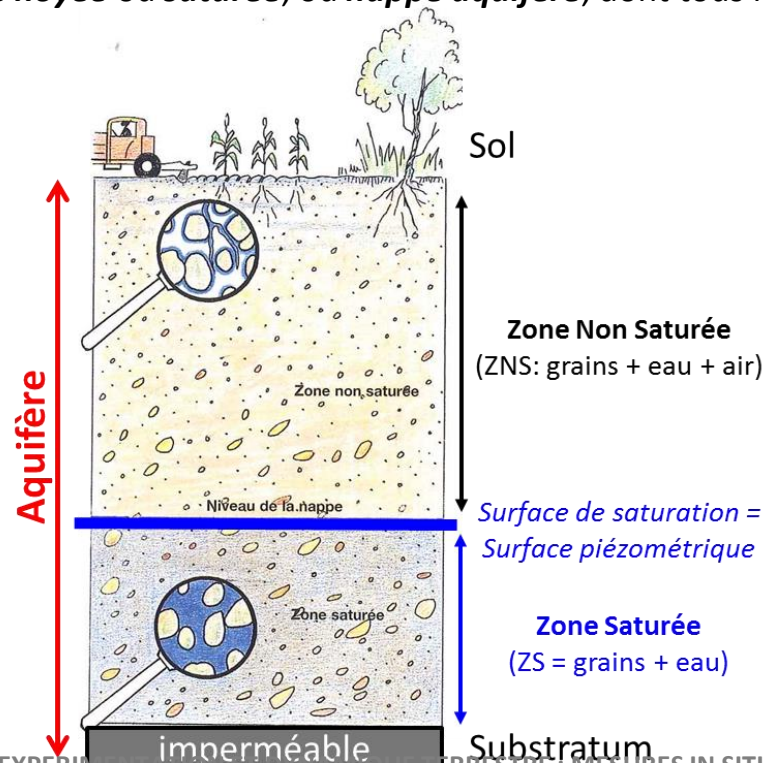
sable **Écoulement** argile

Mesurable	pratiquement nul
<b>Formation hydrogéologique</b>	
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.

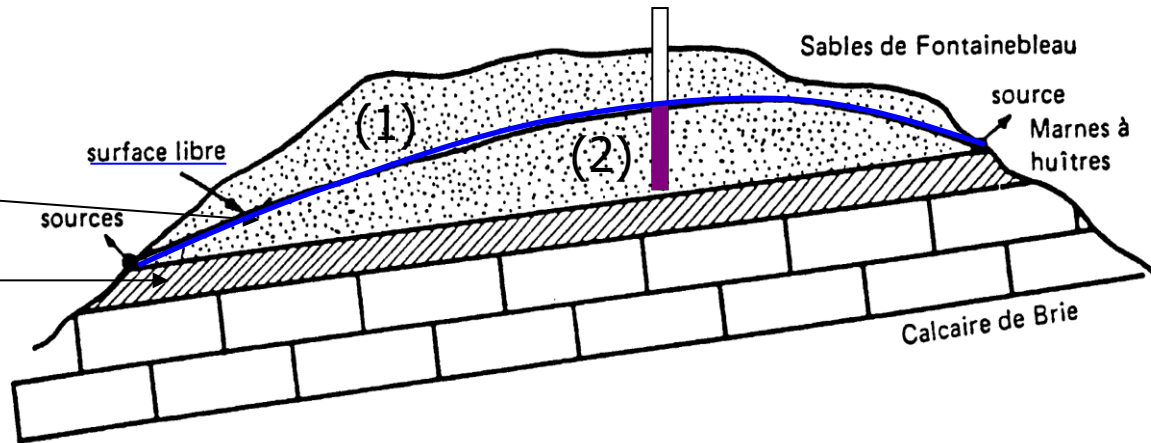


### III. Le réservoir souterrain

- 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.

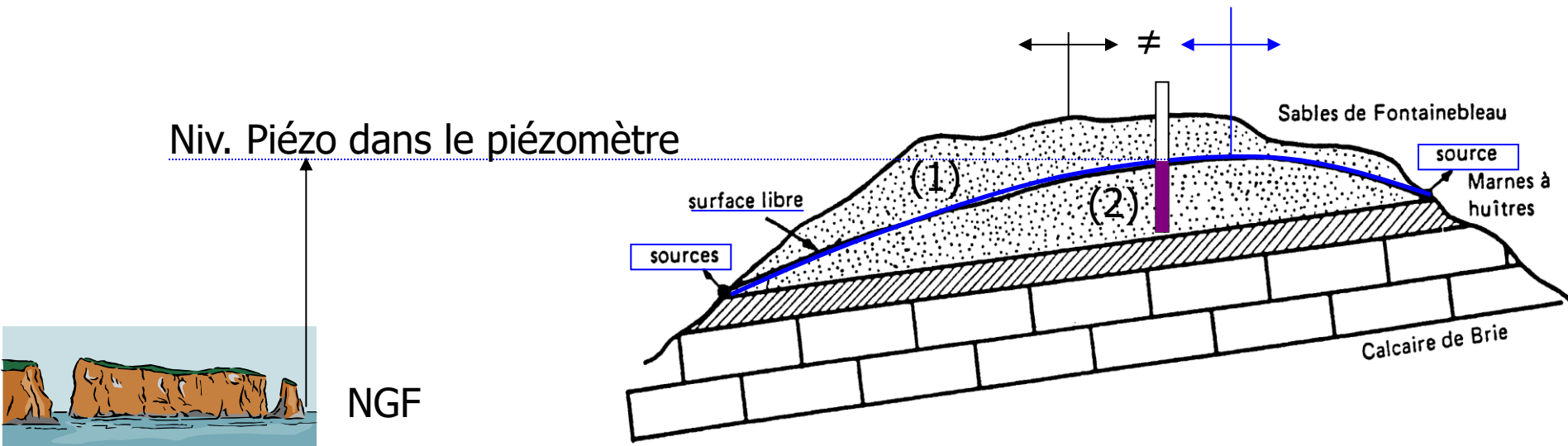
Cas d'une nappe libre dans les sables de Fontainebleau  
perméabilité + stockage

Mur imperméable



### III. Le réservoir souterrain

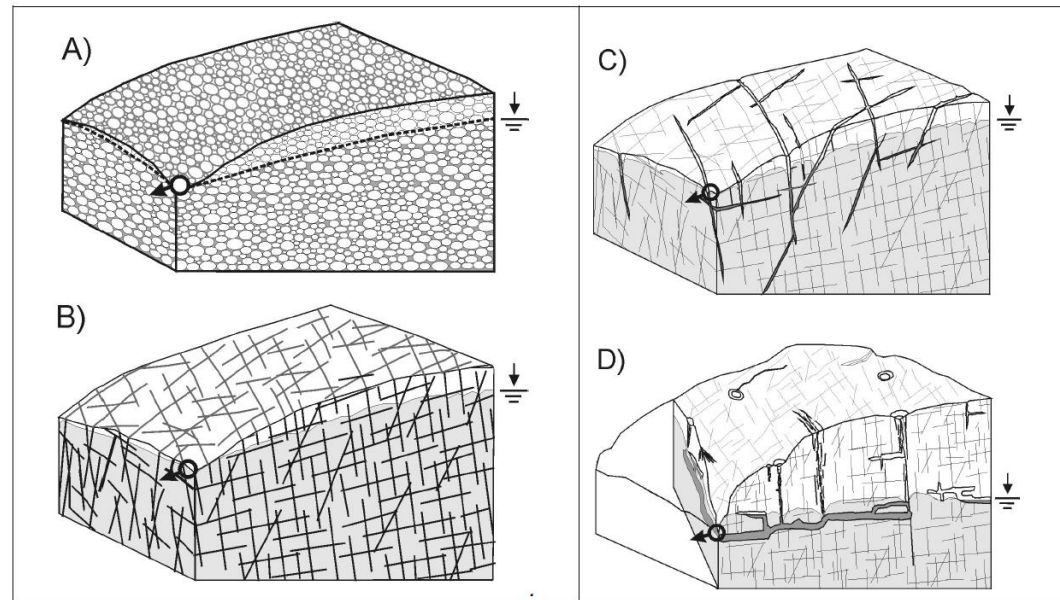
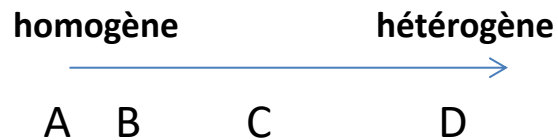
- La zone d'infiltration (1) est séparée de la zone saturée (2) par la **surface de la nappe**, dont on mesure le **niveau piézométrique**.
- Ce niveau varie en fonction de l'alimentation par l'infiltration et de la vidange naturelle, par les sources ou au profit d'autres aquifères, et de la vidange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



# III. Le réservoir souterrain

- Aquifère = réservoir + conducteur d'eau
- Aquifère = « contenant » ; Nappe = « contenu »
- Réservoir caractérisé par
  - Lithologie (Sables, calcaires...)
  - Structure (épaisseur, fracturation...)
  - Paramètres hydrodynamiques (emmagasinement, perméabilité...)

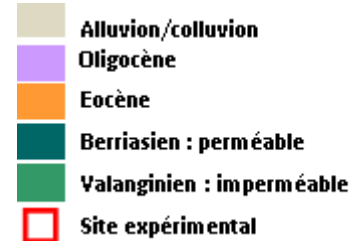
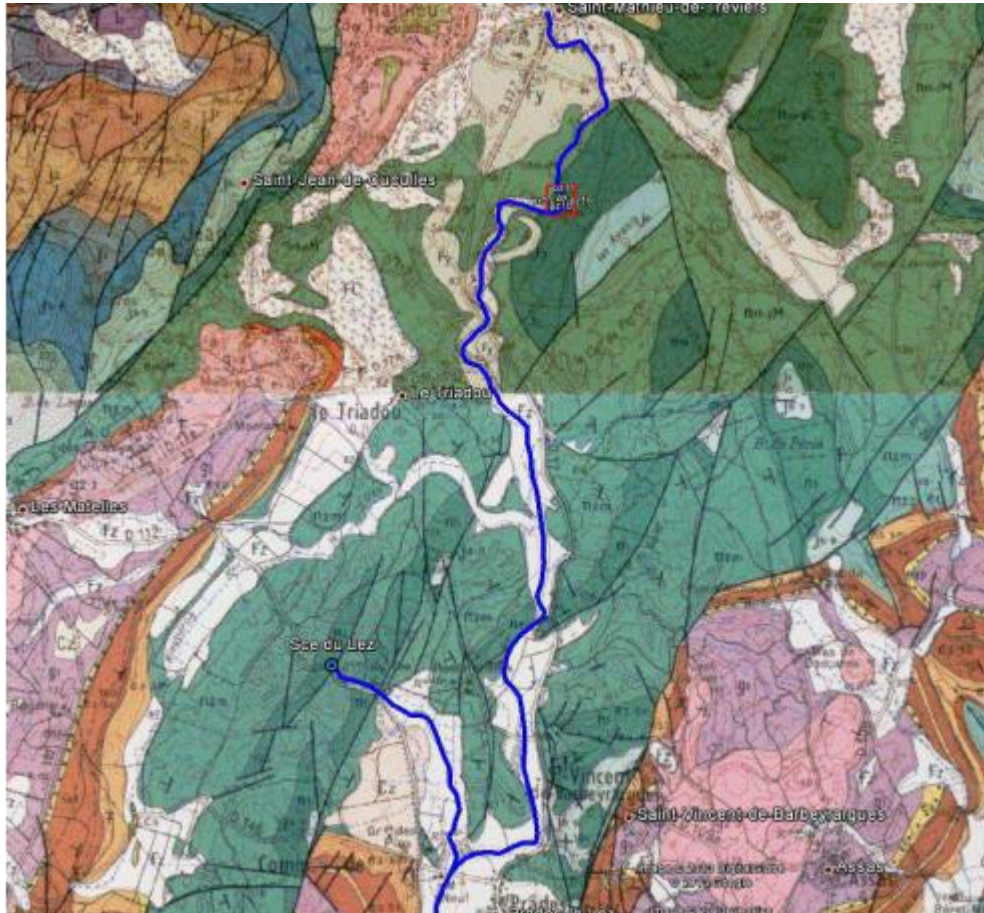
- Aquifères
  - homogènes (continus):  
circulation lente et régulière
  - hétérogènes (discontinus):  
circulation rapide et irrégulière





# III. Le réservoir souterrain

## Le système karstique du Lez - Identification du réservoir



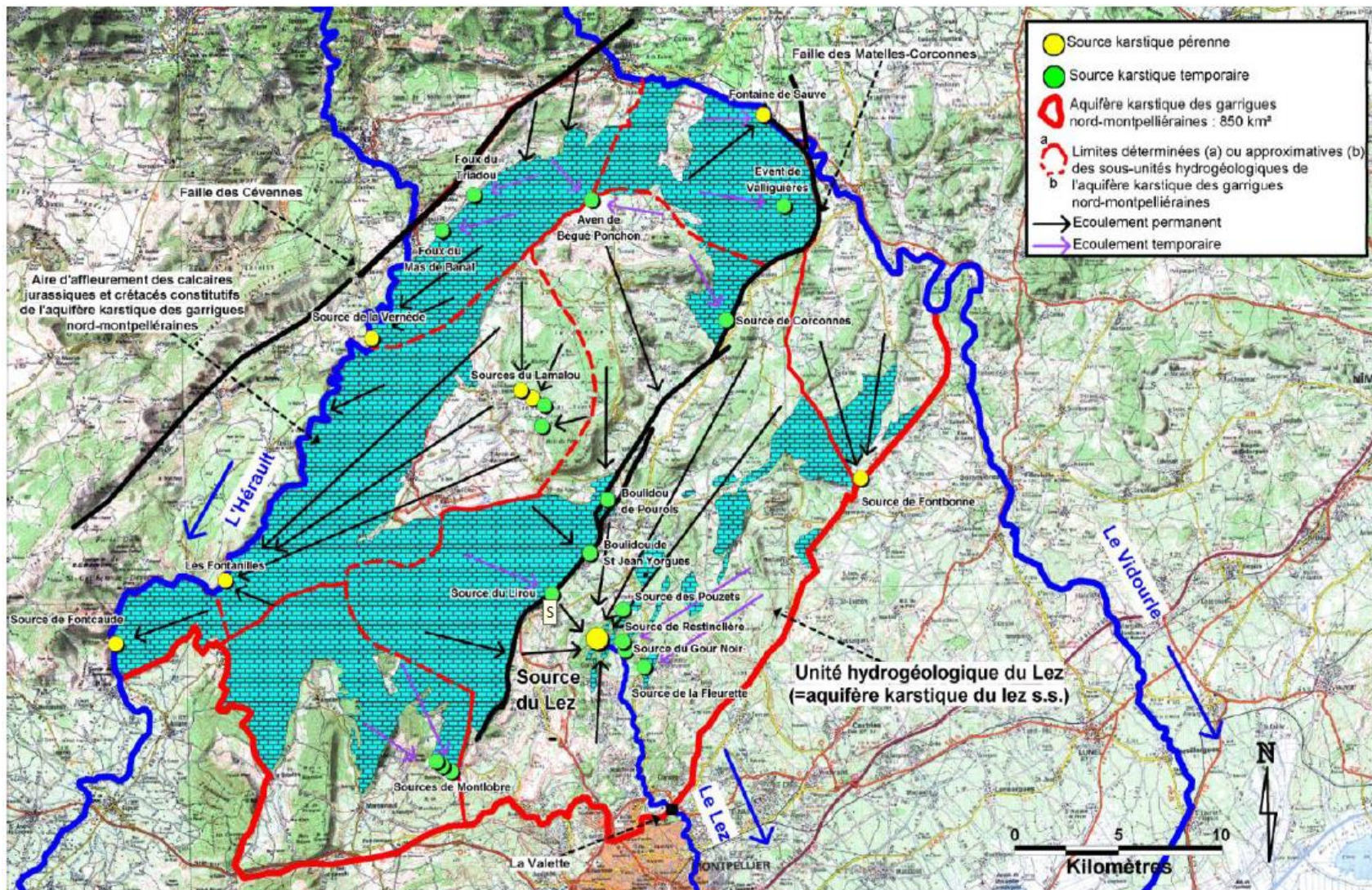
Informations Hydrogéologiques	Facès dominant	Etage dominant	Série
Imperméable	Sables et conglomérats		Quaternaire
Aquifère	Calcaires à Planorbis	Lutécien	Eocène
Imperméable	Argiles		
Lacune de sédimentation			
Imperméable - Toit de l'aquifère principal	Marno-calcaires	Valanginien	Crétacé inférieur
	calcaires	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

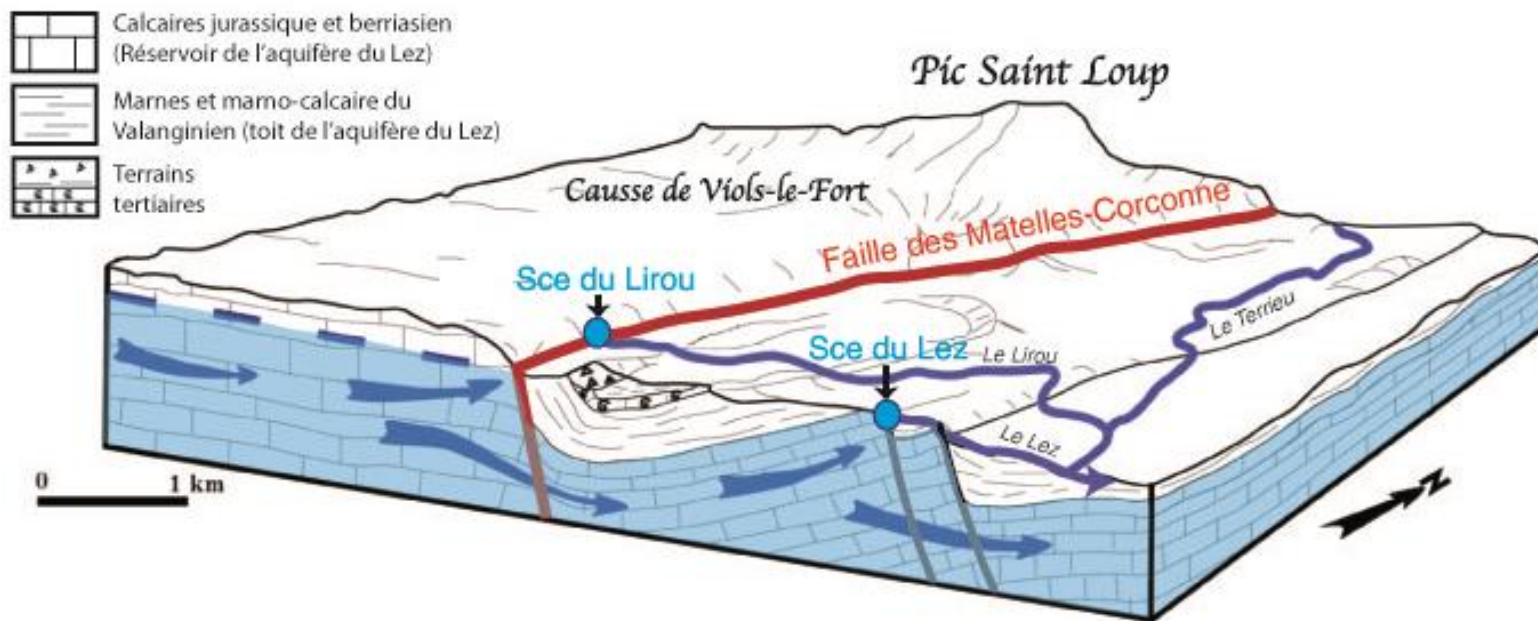
## Le système karstique du Lez - le BV souterrain





### III. Le réservoir souterrain

#### *Le système karstique du Lez - le BV souterrain*



# III. Le réservoir souterrain

## 1. En surface : Analyse de la fracturation

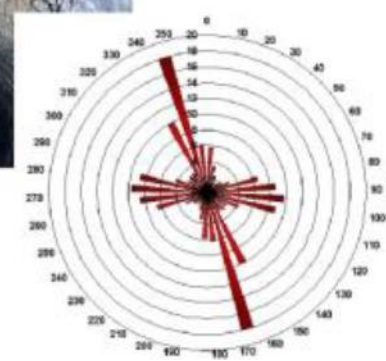
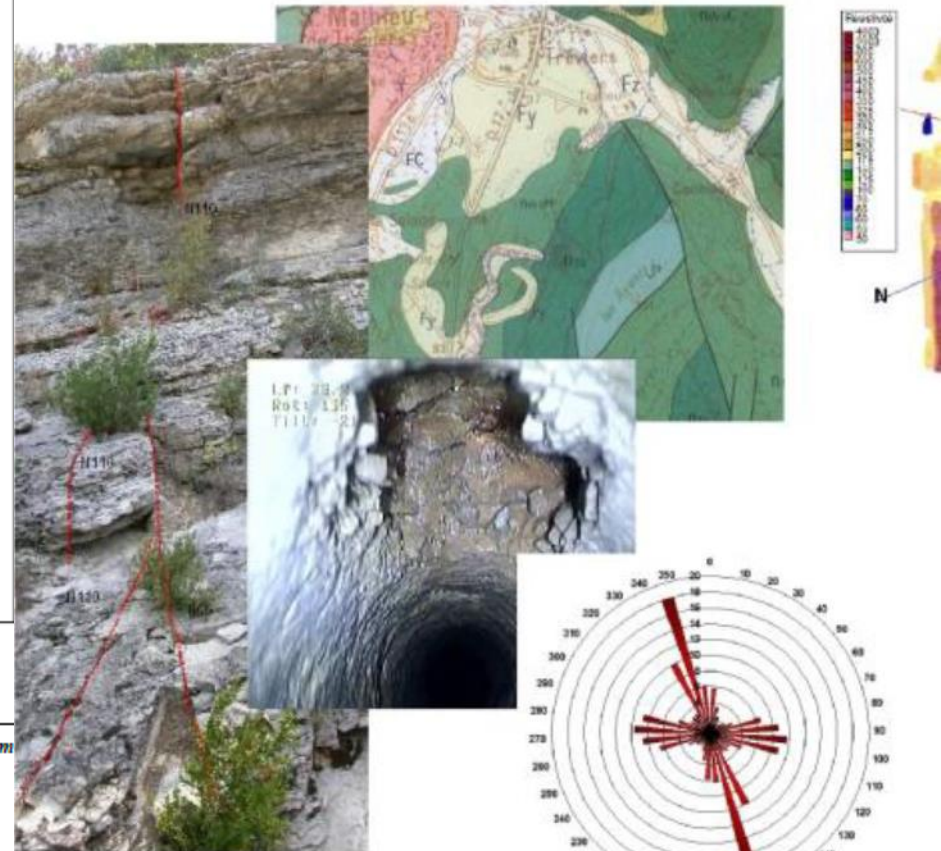
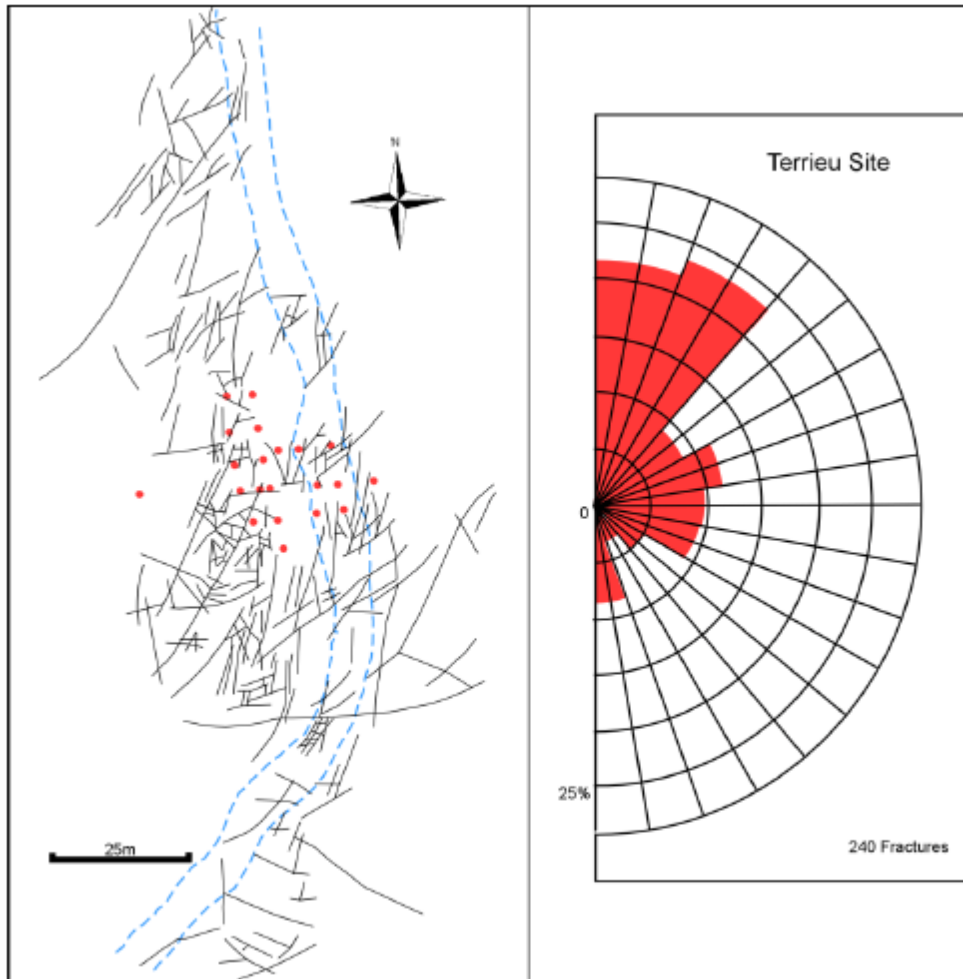


Figure 43: Terrieu experimental field site fracturing map from aerial photography (left), Rose diagram of cumulative fracture length (right) [after Drogue and Grilloit, 1976].



# III. Le réservoir souterrain

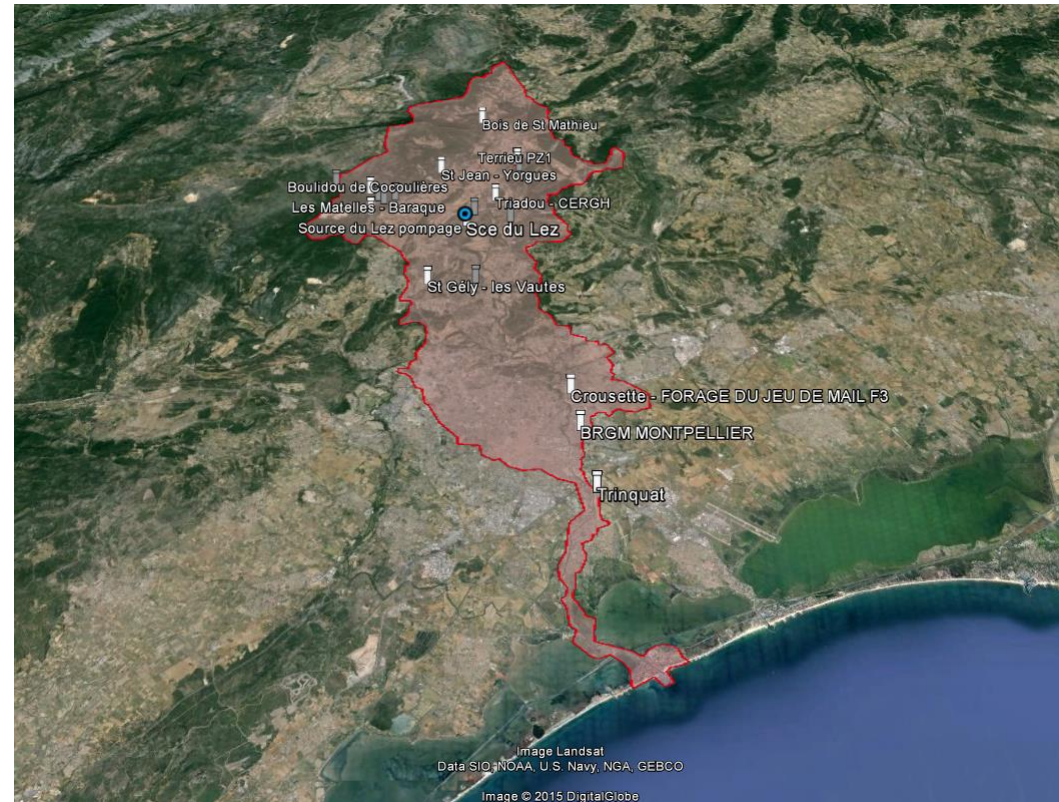
## 2. En souterrain: le forage



Vue de l'intérieur d'un piézomètres



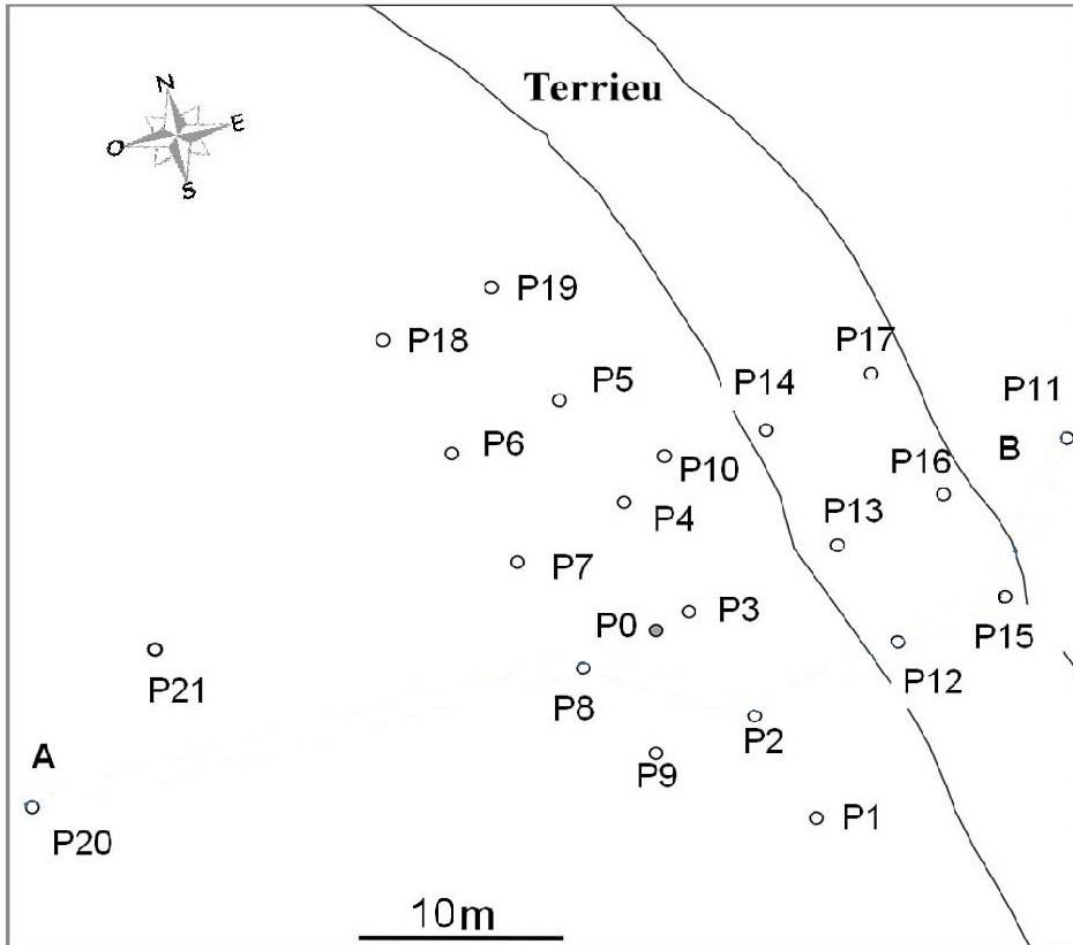
Crépines



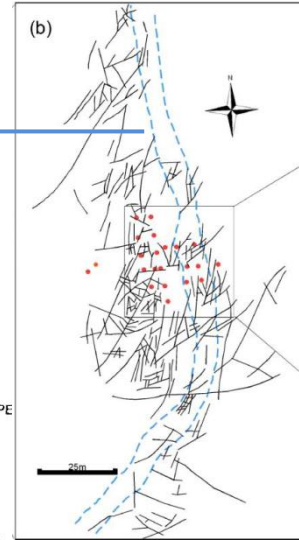
# III. Le réservoir souterrain

## 2. En souterrain: site expérimental du Terrieu

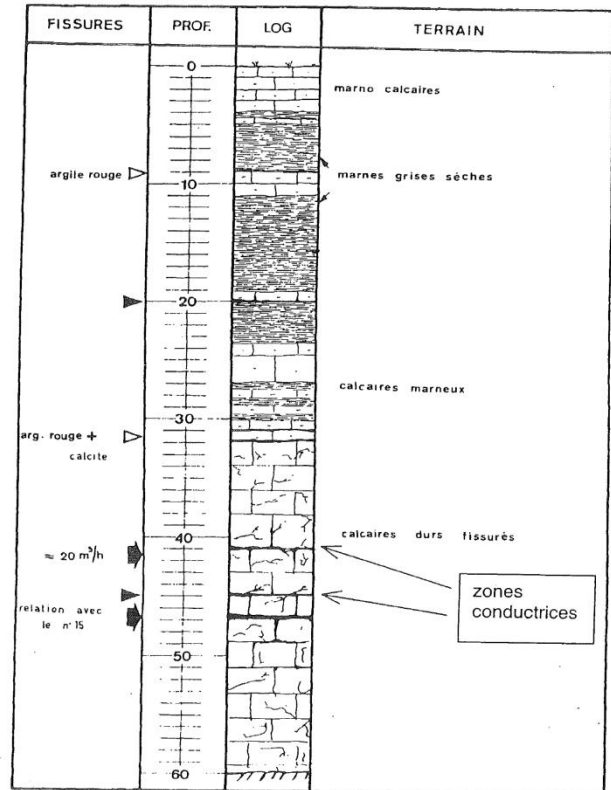
Établissement d'une carte piézométrique (interpolation spatiale) qui renseigne sur les axes de circulation



- ▶ - 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

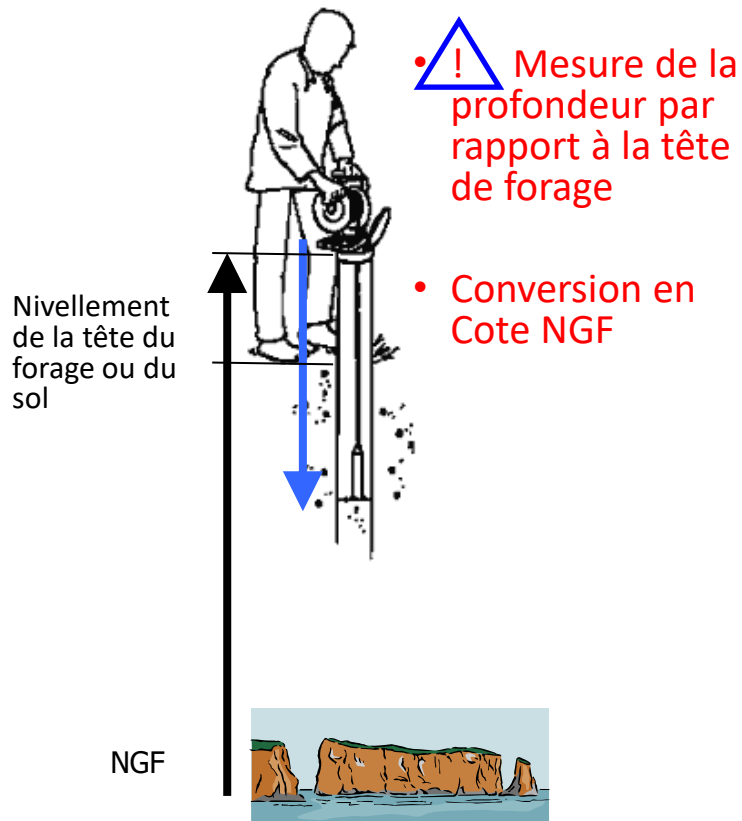




# III. Le réservoir souterrain

## 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



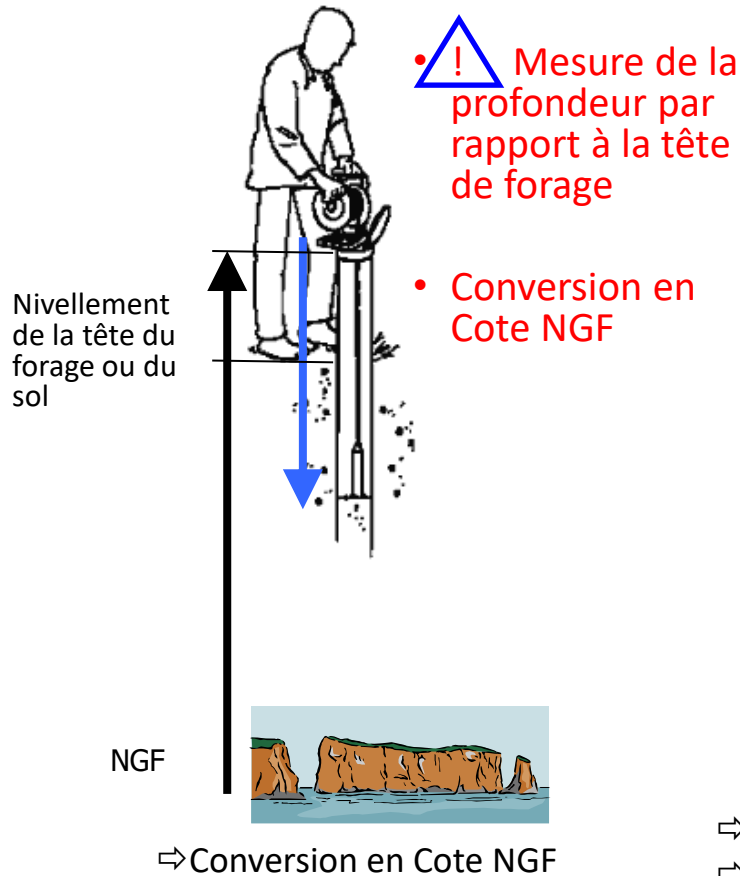
⇒ Conversion en Cote NGF



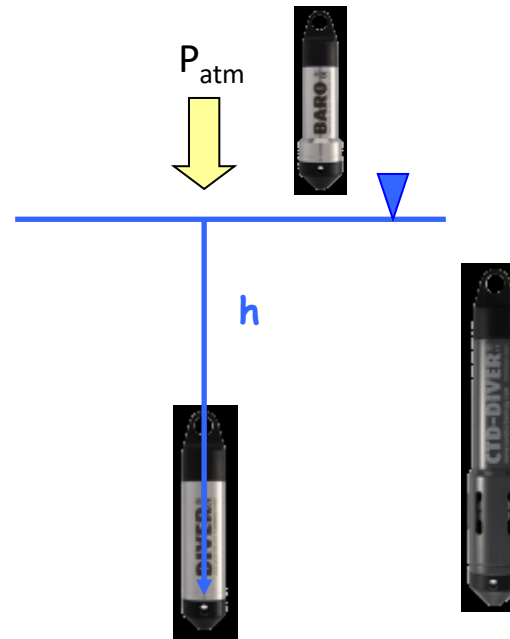
# III. Le réservoir souterrain

## 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

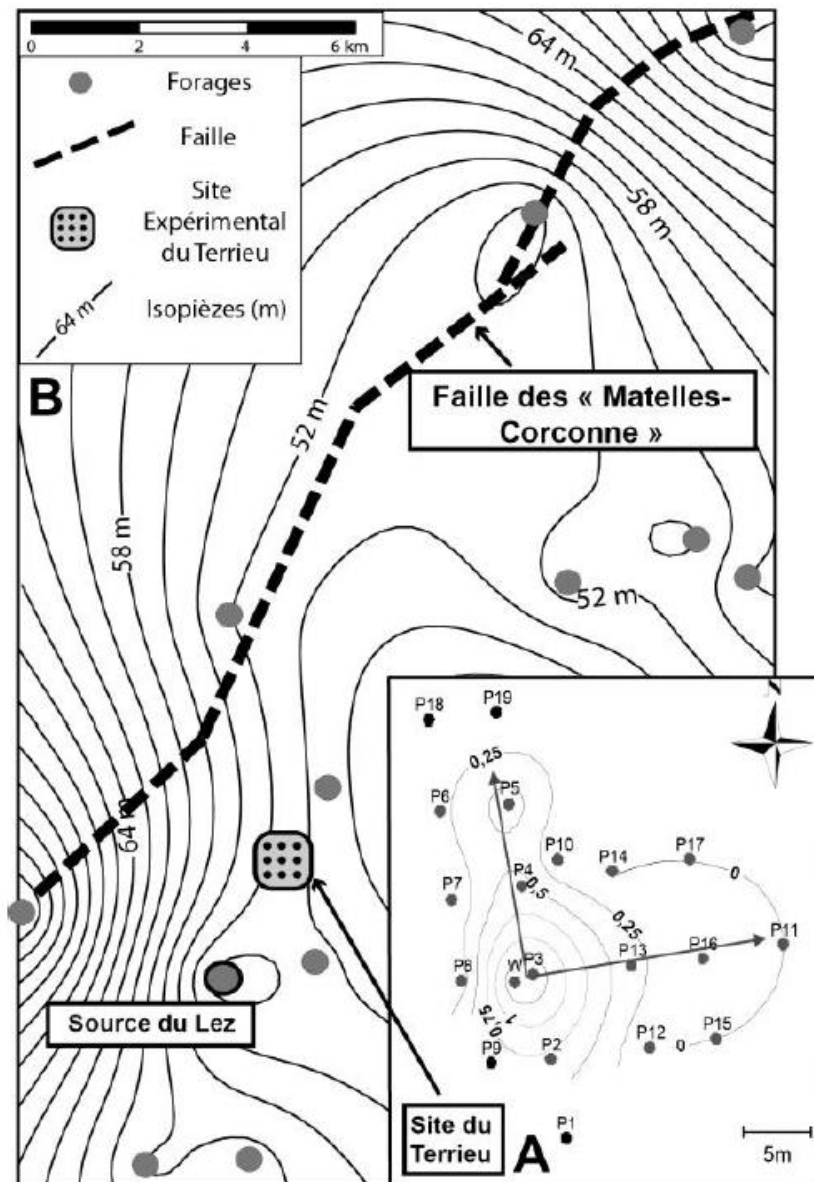
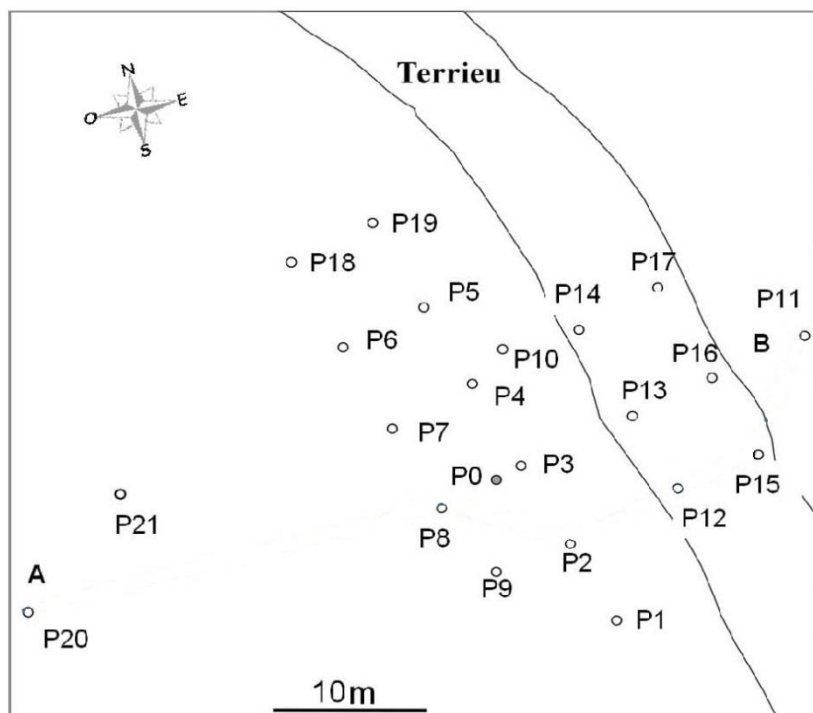


Crépines

# 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 : P<sub>15</sub>, P<sub>9</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>13</sub>, P<sub>11</sub>

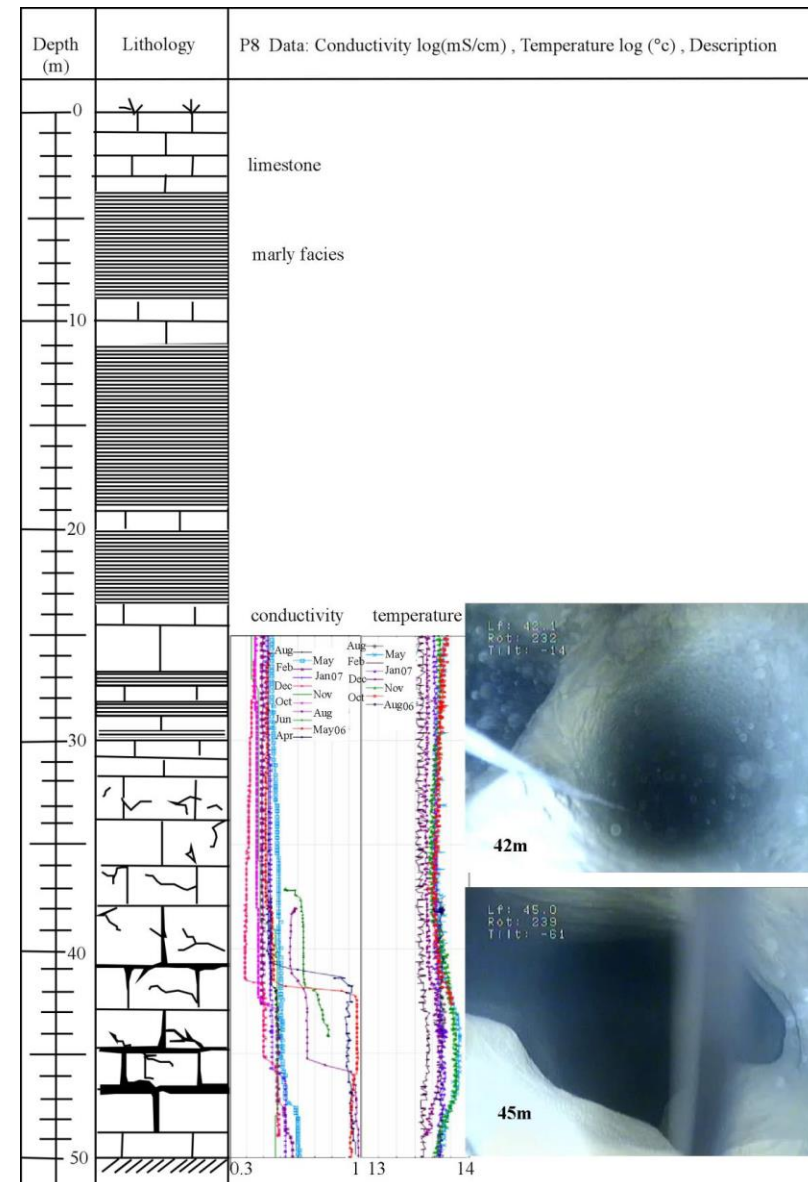
Méthode: Température et conductivité électrique

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



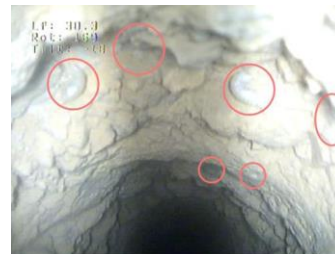
Fracture NS fermée

- Conduits karstiques



- Changements de lithologie

- Des organismes vivants

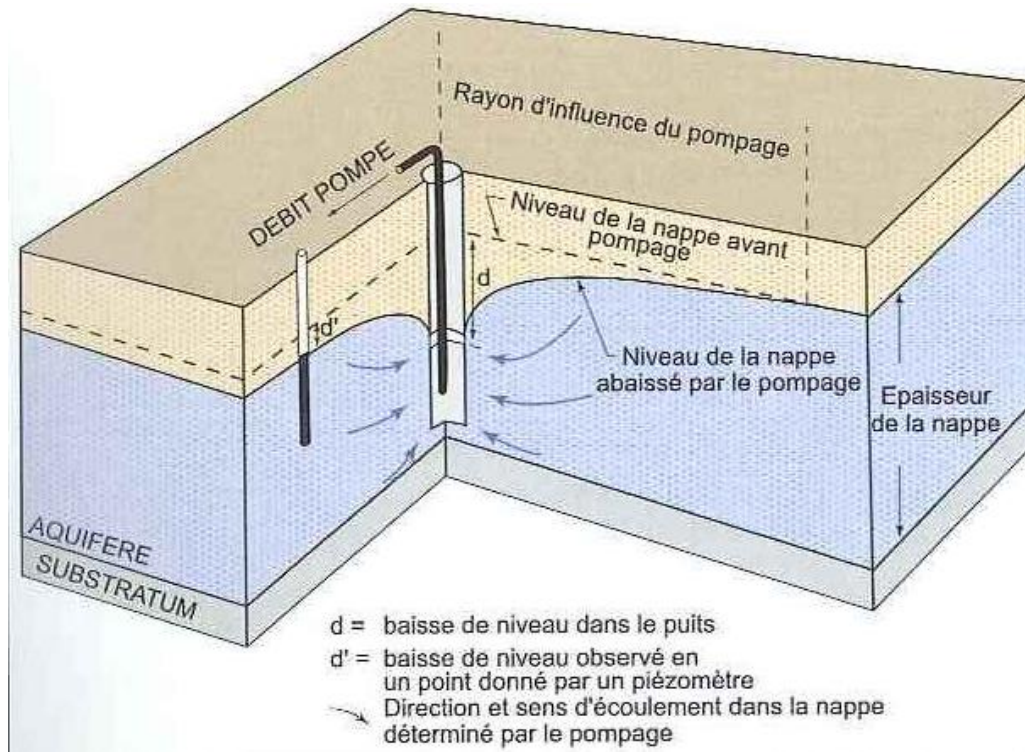


Niveau marneux

# III. Le réservoir souterrain

## 2. En souterrain: Les pompages

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

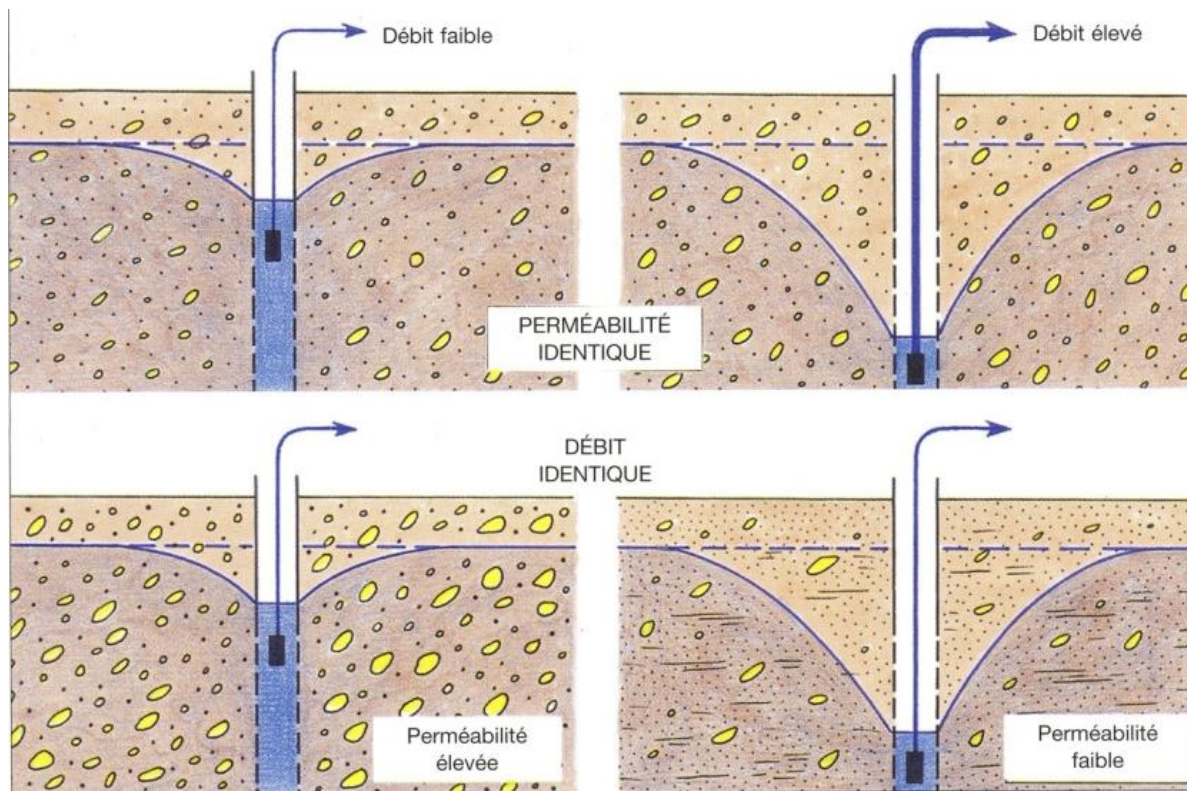


# III. Le réservoir souterrain

## 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)

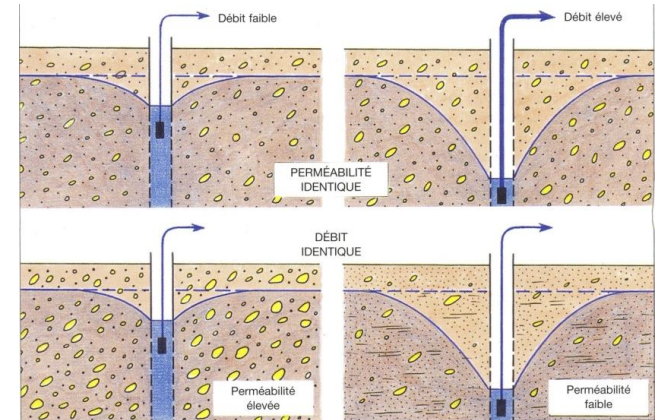
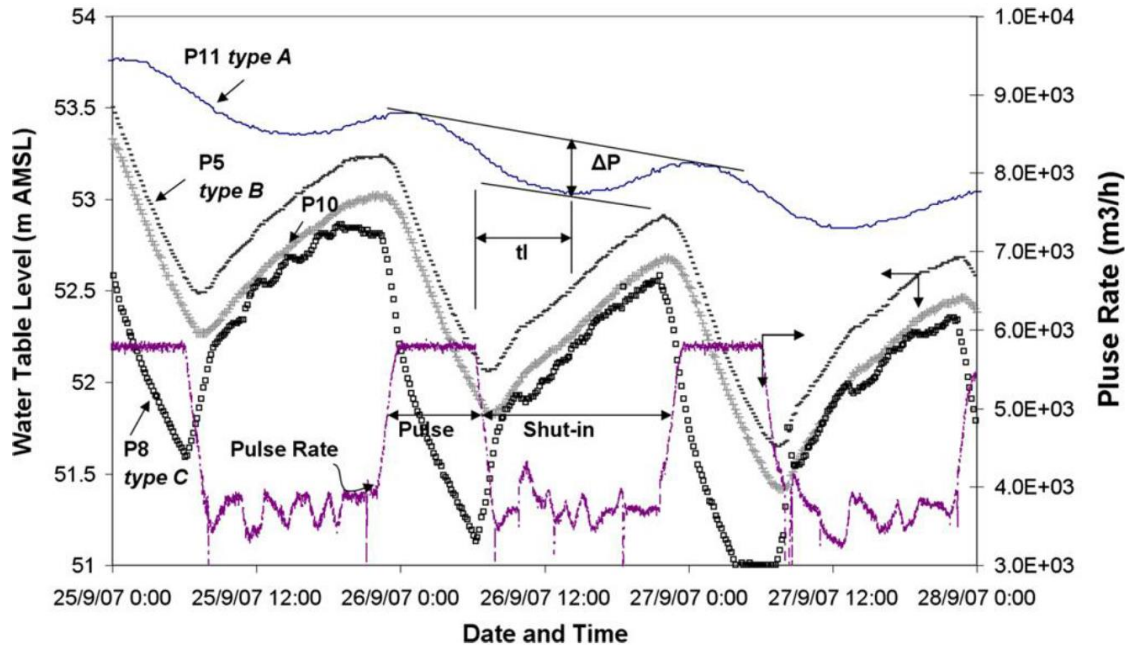


# III. Le réservoir souterrain

## 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

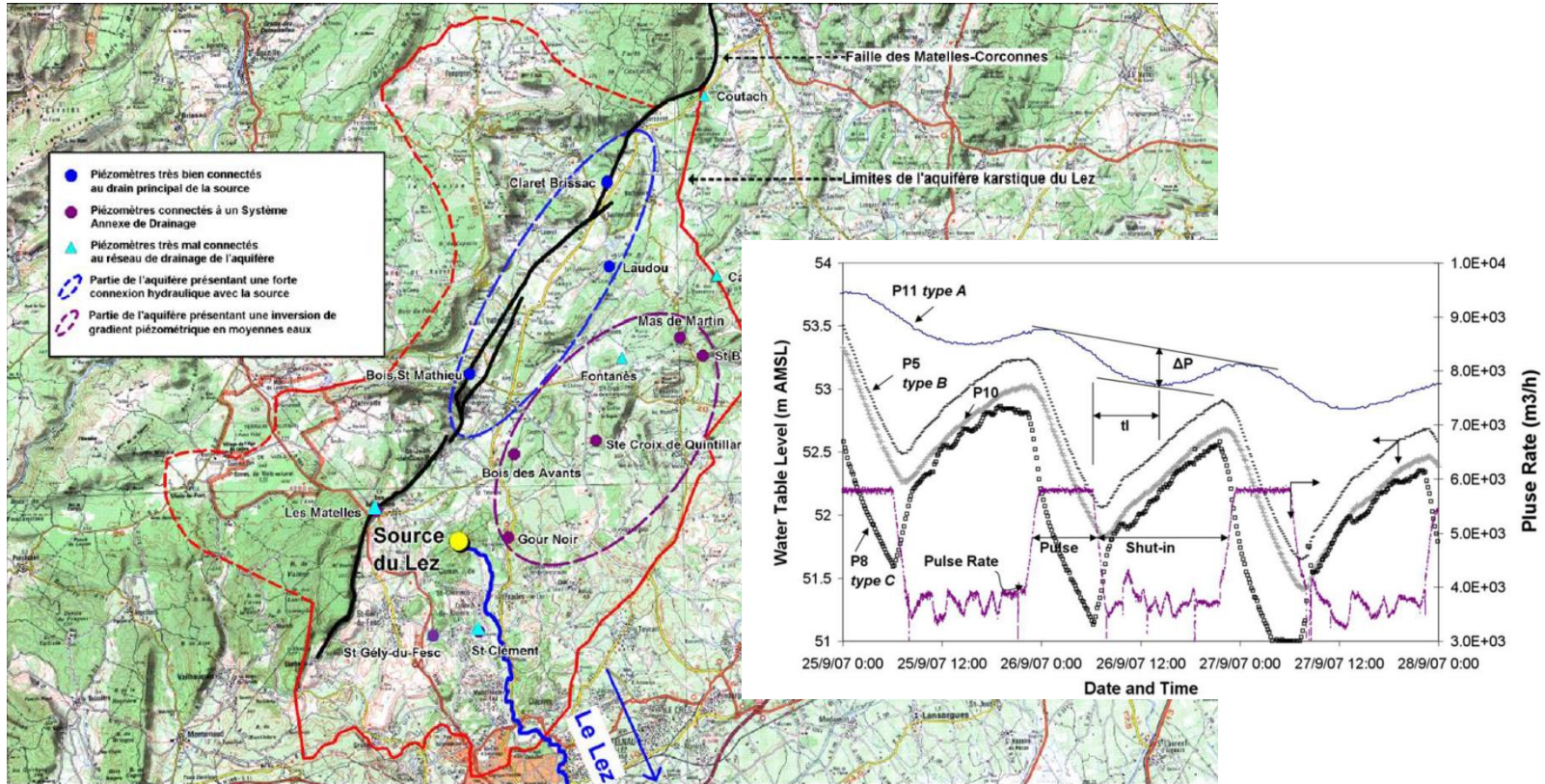
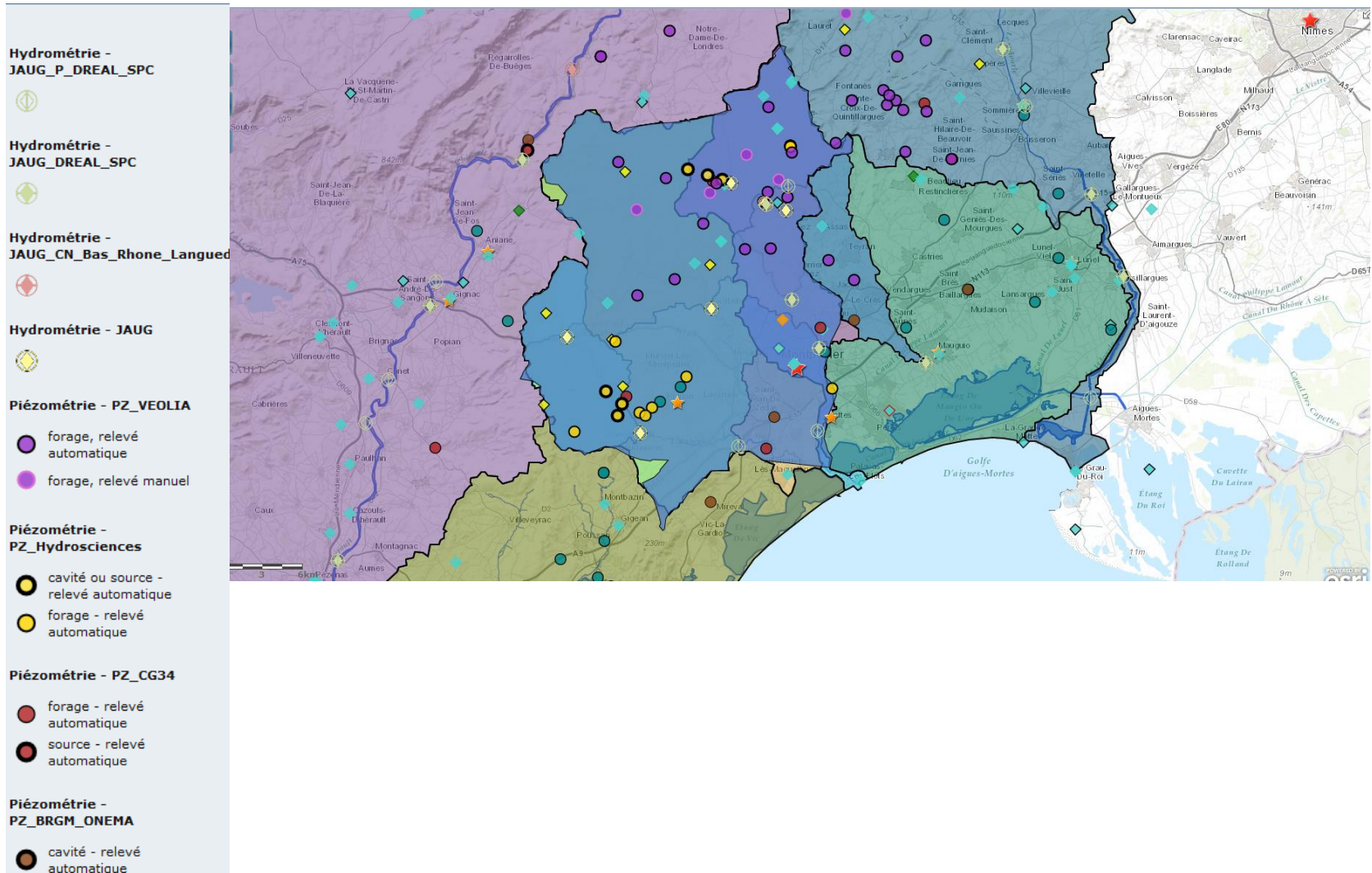


Figure 98 : classification du comportement des piézomètres du Lez en période de sollicitation des réserves (période de tarissement de la source) – modifié d'après Conroux (2007)

# 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...

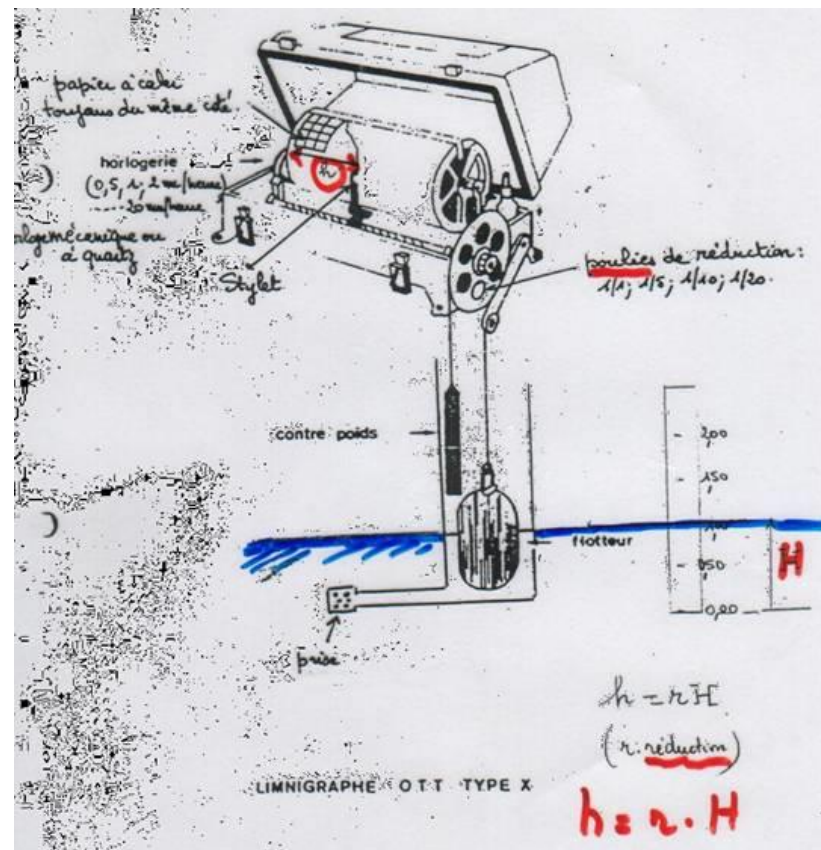
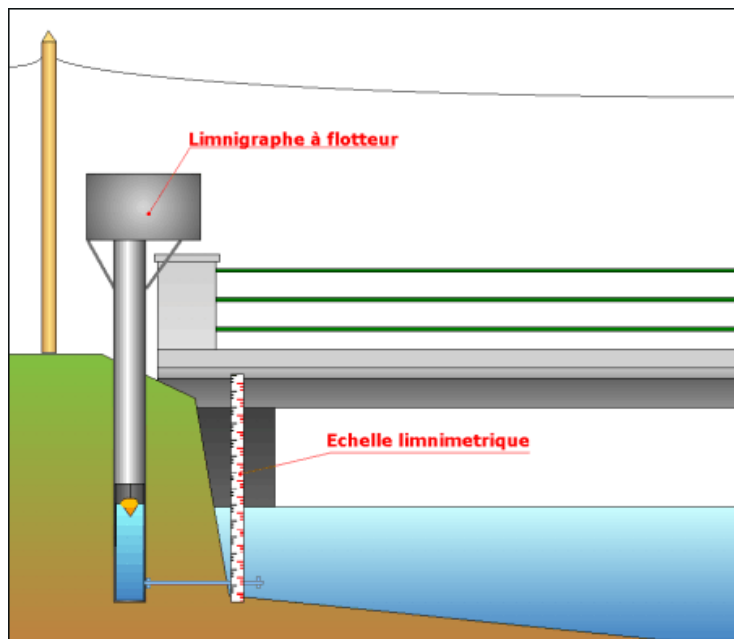
# IV. Les débits

## 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

---

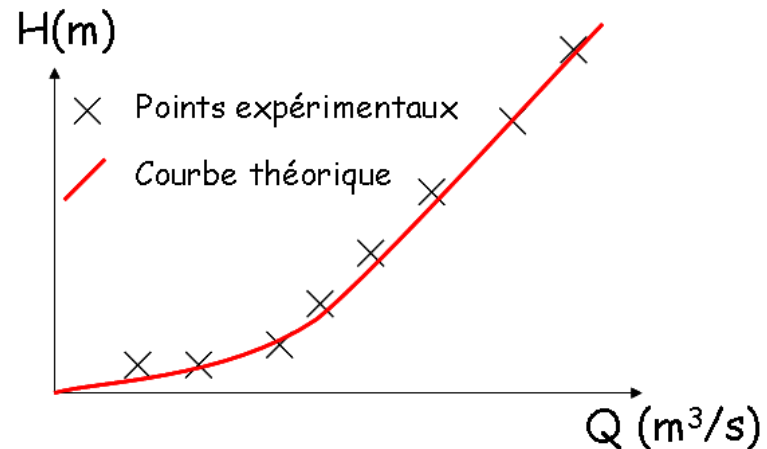
## 1. Limnimétrie

- 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

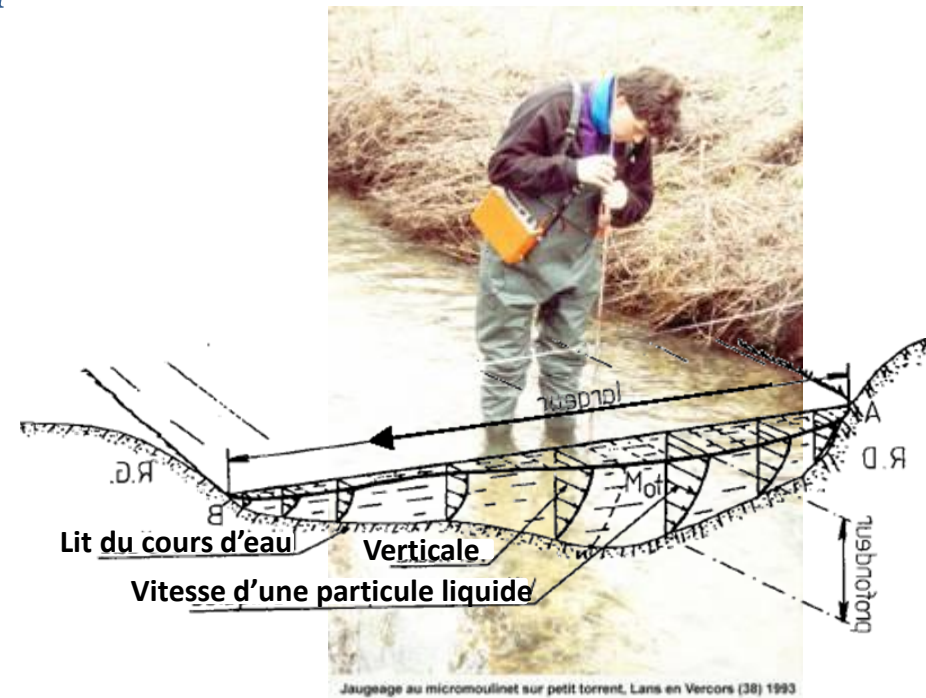
Choix en fonction de :

- 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



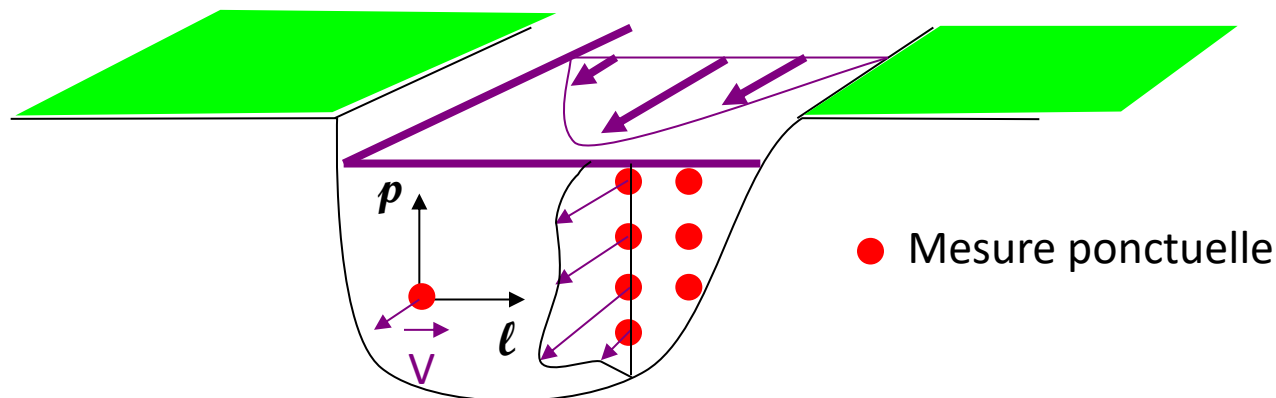
- Profil de vitesse : non uniforme
  - Répartir les points de mesure sur toute la section
  - Plusieurs verticales et plusieurs points par verticale



## IV. Les sorties

### 2. Les jaugeages - exploration du champ de vitesse

- Formulation mathématique



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

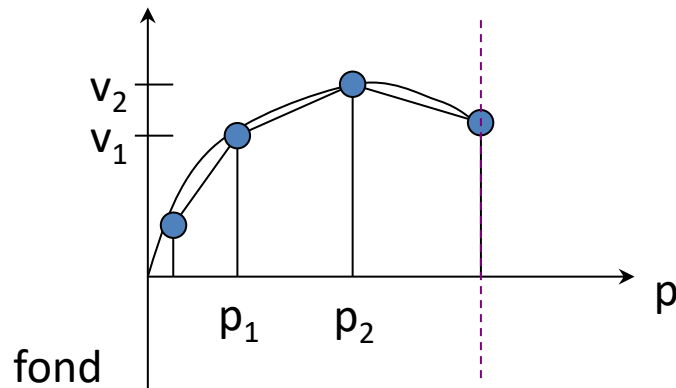


$$Q = \int_{\text{Larg.}} \left( \int_{\text{Prof.}} V(p, l) \cdot dp \right) \cdot dl = V_{\text{moy.}} * S_{\text{mouillée}}$$

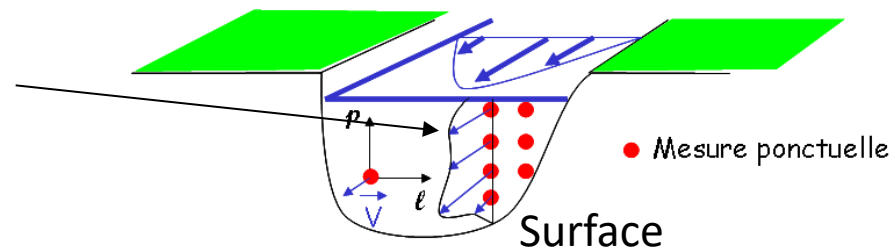
# IV. Les sorties

## 2. Les jaugeages - exploration du champ de vitesse

- Sur une verticale:



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



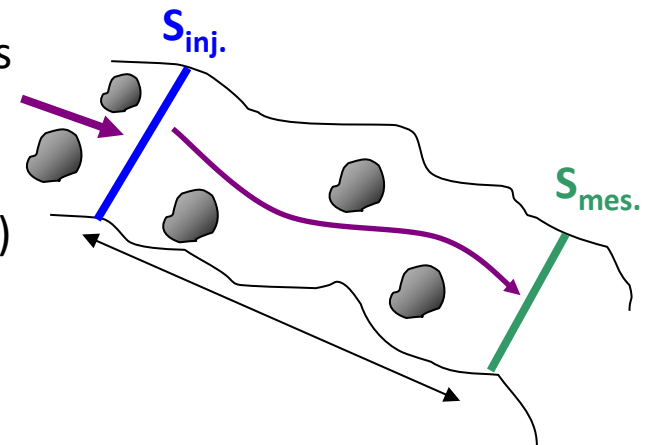
- Deuxième calcul d'intégral  
= intégrale des débit plans en fonction de  $l$   
=> même méthode.
- Difficultés sur le terrain:
  - Comment choisir la section de mesure?
  - Combien de verticales et quelle répartition en fonction de  $l$ ?
  - Combien de points par verticale et quelle répartition en 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<sup>-</sup> ou fluorescence)
  - Conservatif
  - Solubilité forte (faible volume de solution)
  - Non polluant
- Protocole
  - Suivi en continu de la restitution
  - Analyse courbe de restitution



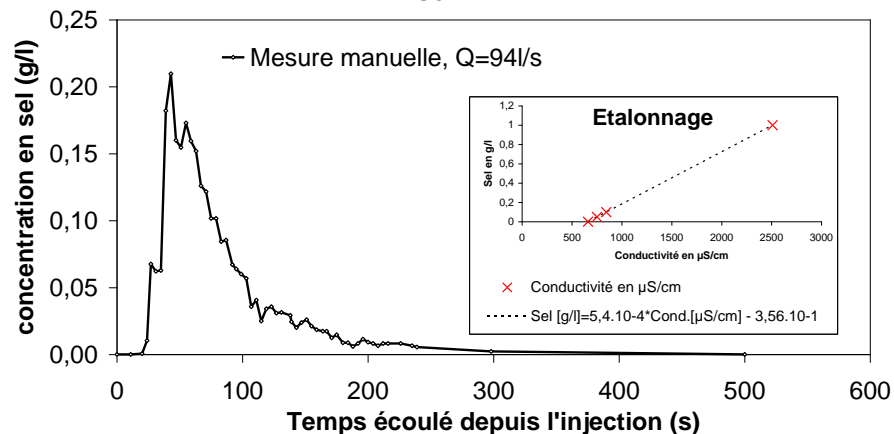
# IV. Les sorties

## 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

---

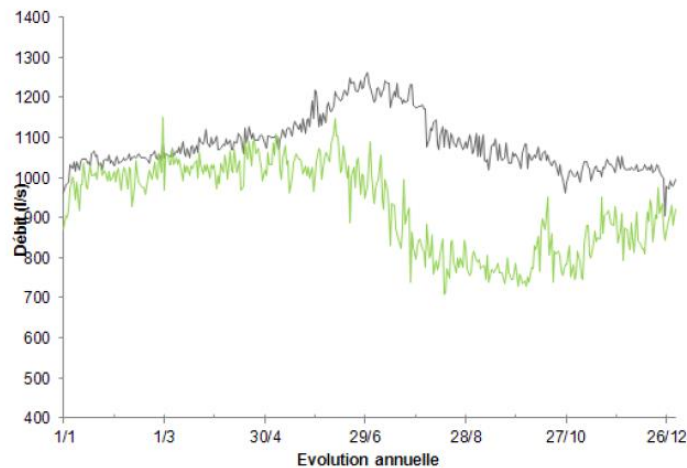
### 2. Les jaugeages - jaugeage au flotteur

- 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

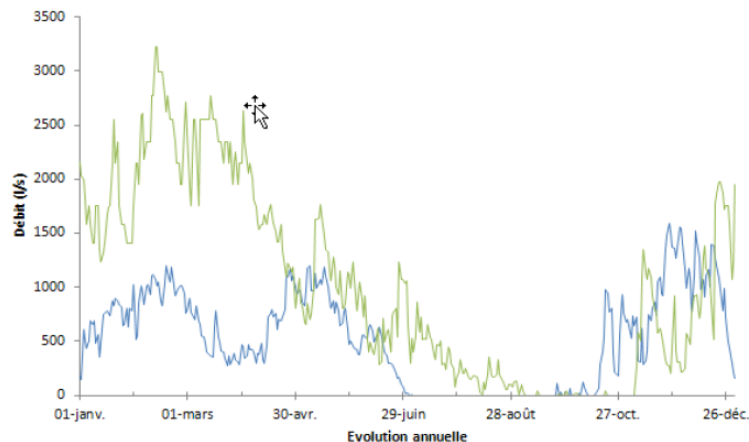


Ex.  $V_{\text{moy}} = 0.8 * V_{\text{surf.}}$   
puis  $Q = V_{\text{moy}} * S_{\text{mouillée}}$

# Bilan Entrée-Sortie sur le système du Lez



Débits de prélèvement à la source du Lez

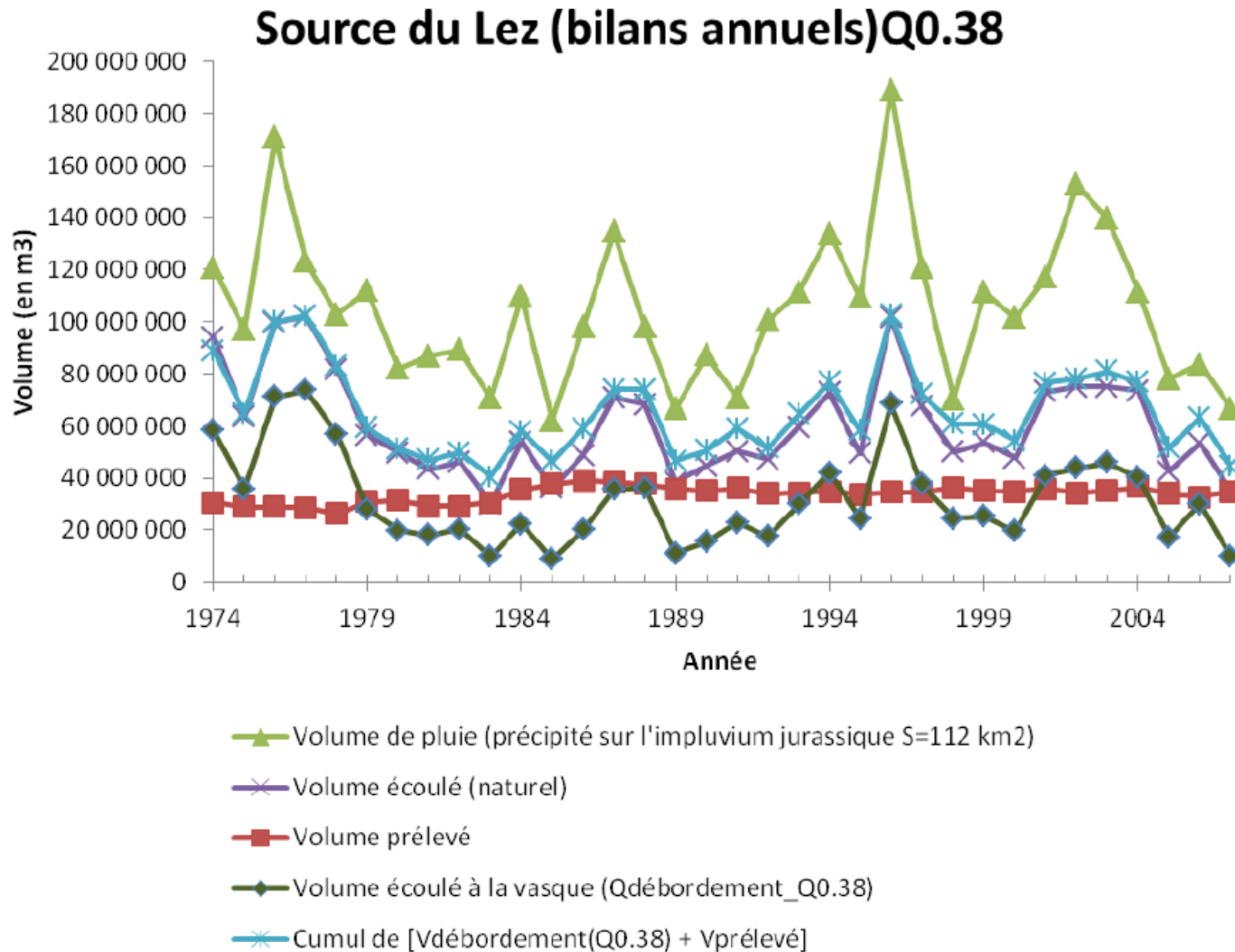


Débits de Débordement à la source du Lez

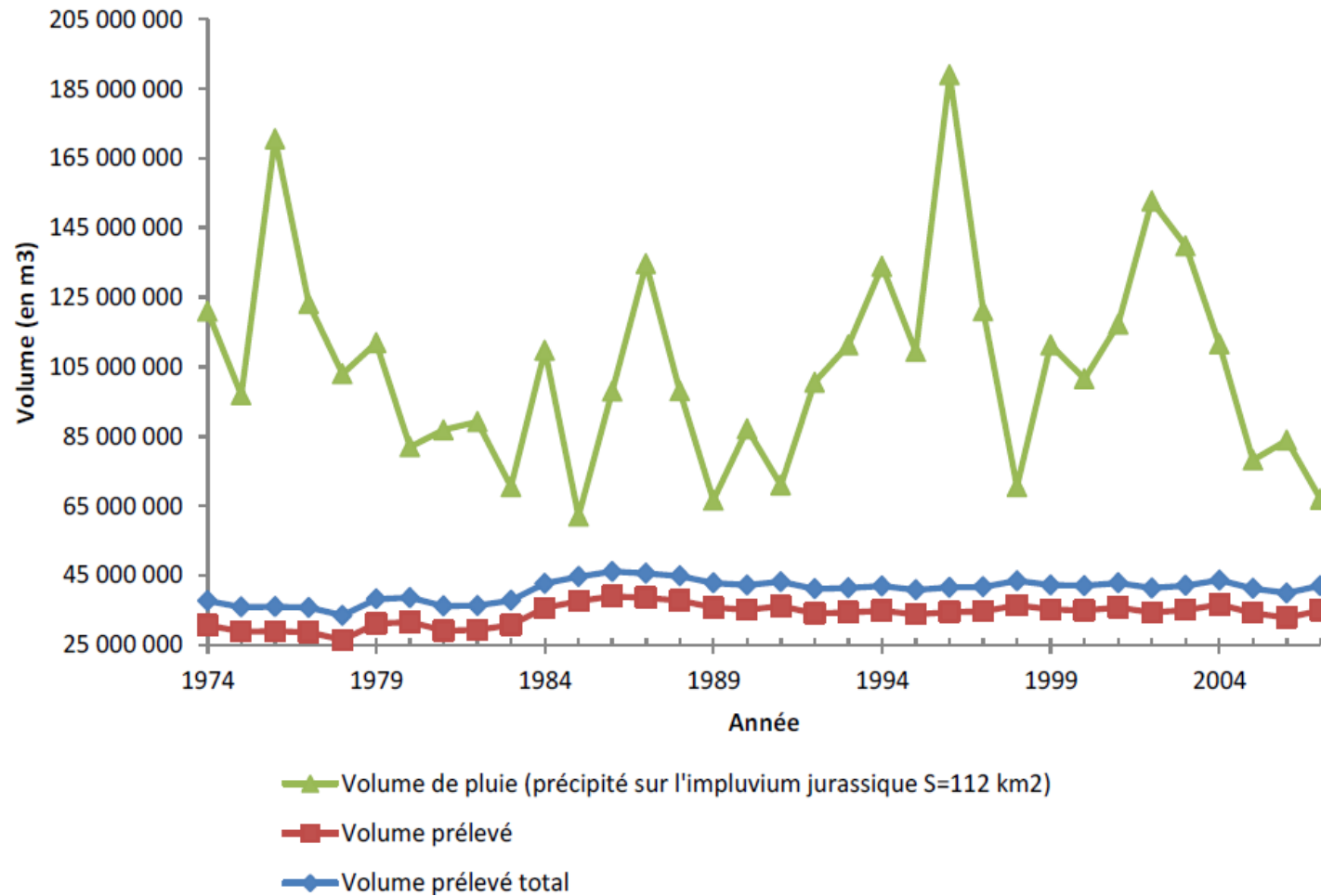
Augmentations des prélèvements après 1982

⇒ 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

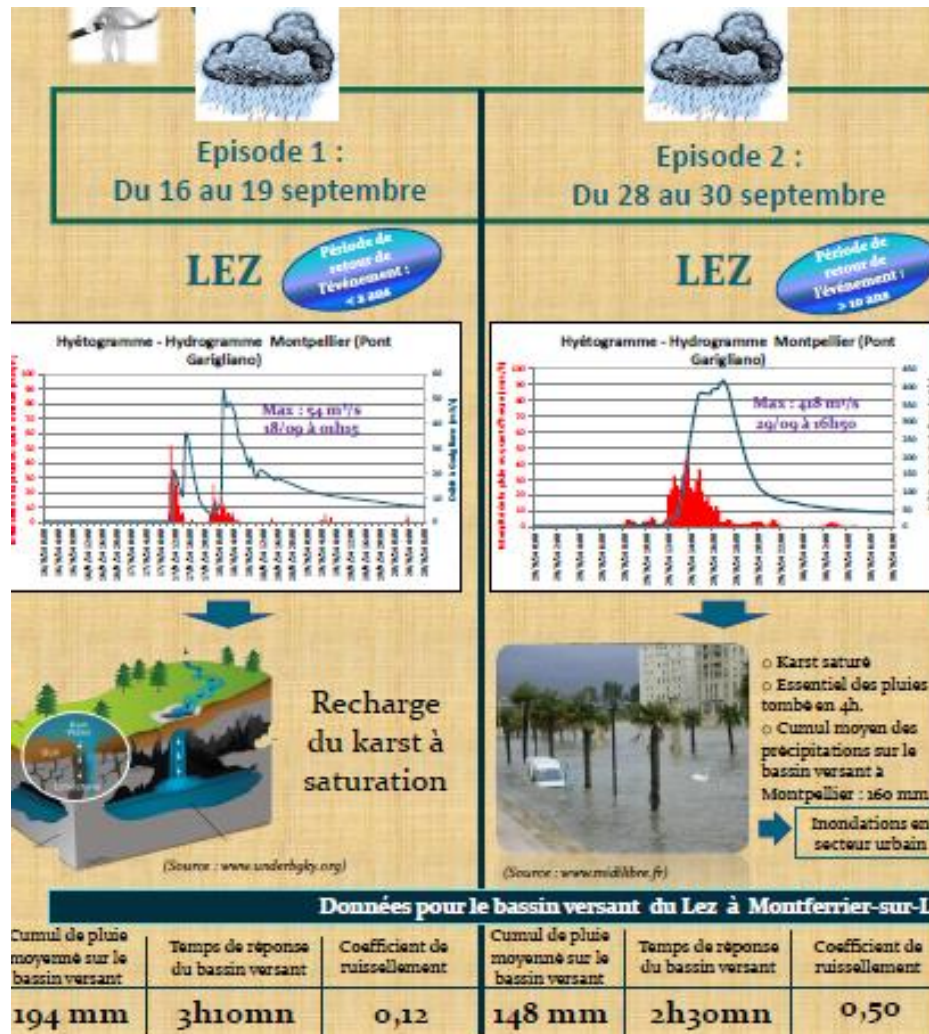


# Bilan Entrée-Sortie sur le système du Lez





# Influence des prélèvements sur les crues



Poster PIFE, Adrien Pialot, 2014

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