

2 mai 2022 – 15.30

## Réunion Publique d'Information

Point d'étape sur les acquisitions hydrogéologiques, hydrogéochimiques et géophysiques sur le versant de La Belotte / Embrun



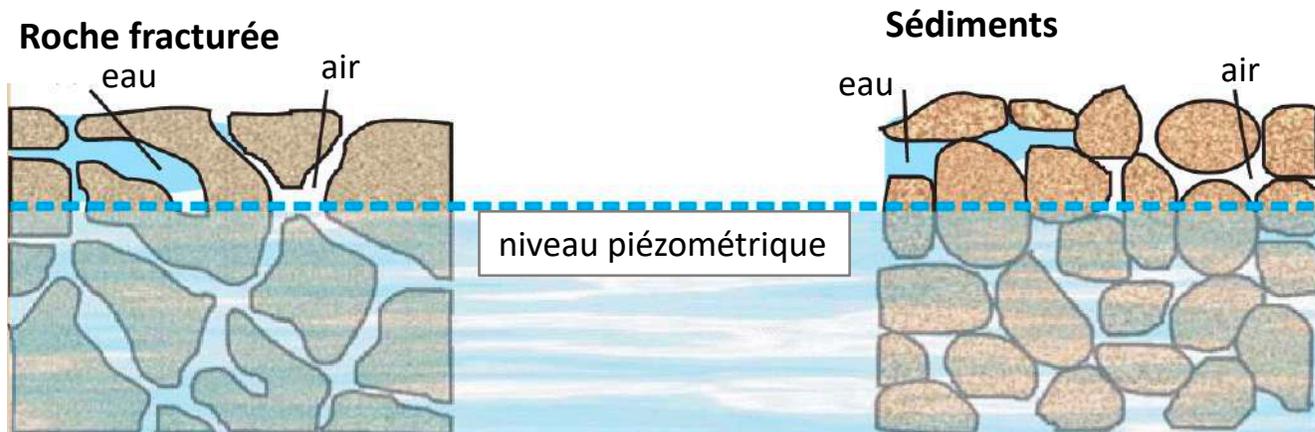
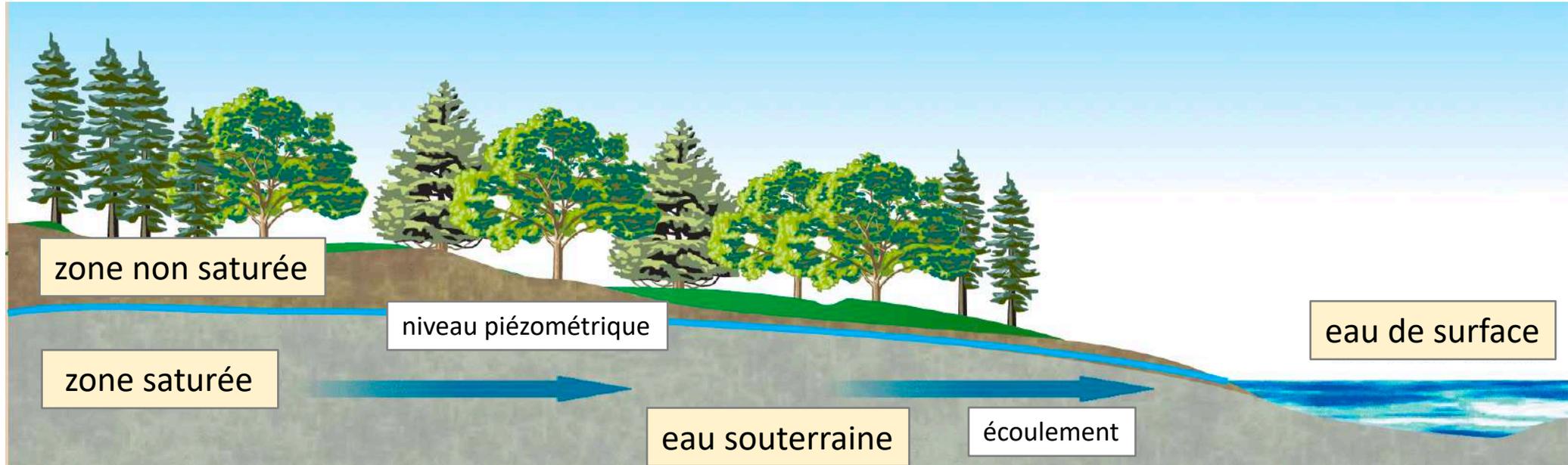
# Cadre de l'étude : Contribuer à la connaissance du phénomène gravitaire

- **Analyse des conditions d'écoulement des eaux (origine, circulation, stockage)**
  - Interprétation des chroniques hydrogéologiques (acquises depuis décembre 2017)
  - Acquisition de données hydrochimiques sur le versant (à partir de mai 2021)
- **Elaboration d'un modèle géométrique 3D (profondeur du rocher « sain », présence de discontinuités, etc)**
  - Synthèse des données de forages
  - Acquisition de données géophysiques aéroportées (drone) et sol (magnétisme, sismique, électrique)
  - Acquisition de données géophysique en forage (diagraphies, à partir de mai 2022)
- **Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique 3D des écoulements**
  - Modèle calibré sur les observations actuelles (nécessité de chroniques sur des cycles hydrologiques pluri-annuels)
  - Modèle utilisé pour des scénarios d'évolution (planification des travaux, suivi de l'efficacité des travaux)

→ Opérations réalisées dans le cadre de missions mandatées par la Commune d'Embrun et l'Etat (DDT65, ONF-RTM05)  
→ Plusieurs phases d'acquisition de données et d'interprétation

# Un peu de pédagogie : l'eau souterraine dans un versant

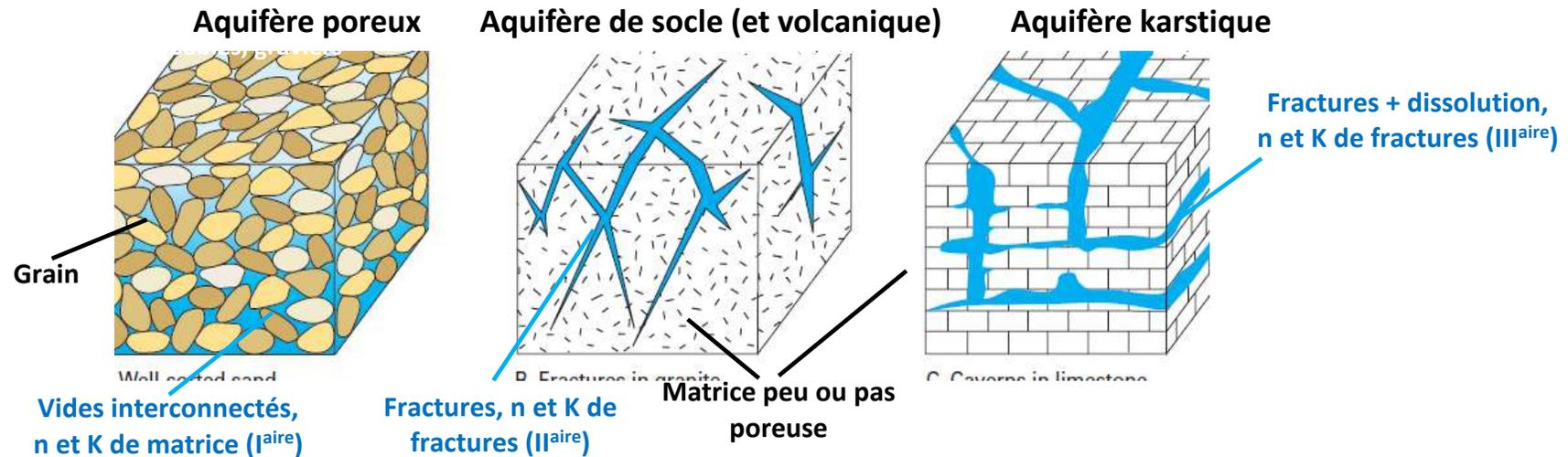
L'eau souterraine circule (plus ou moins vite) et est stockée (plus ou moins longtemps) dans un réservoir



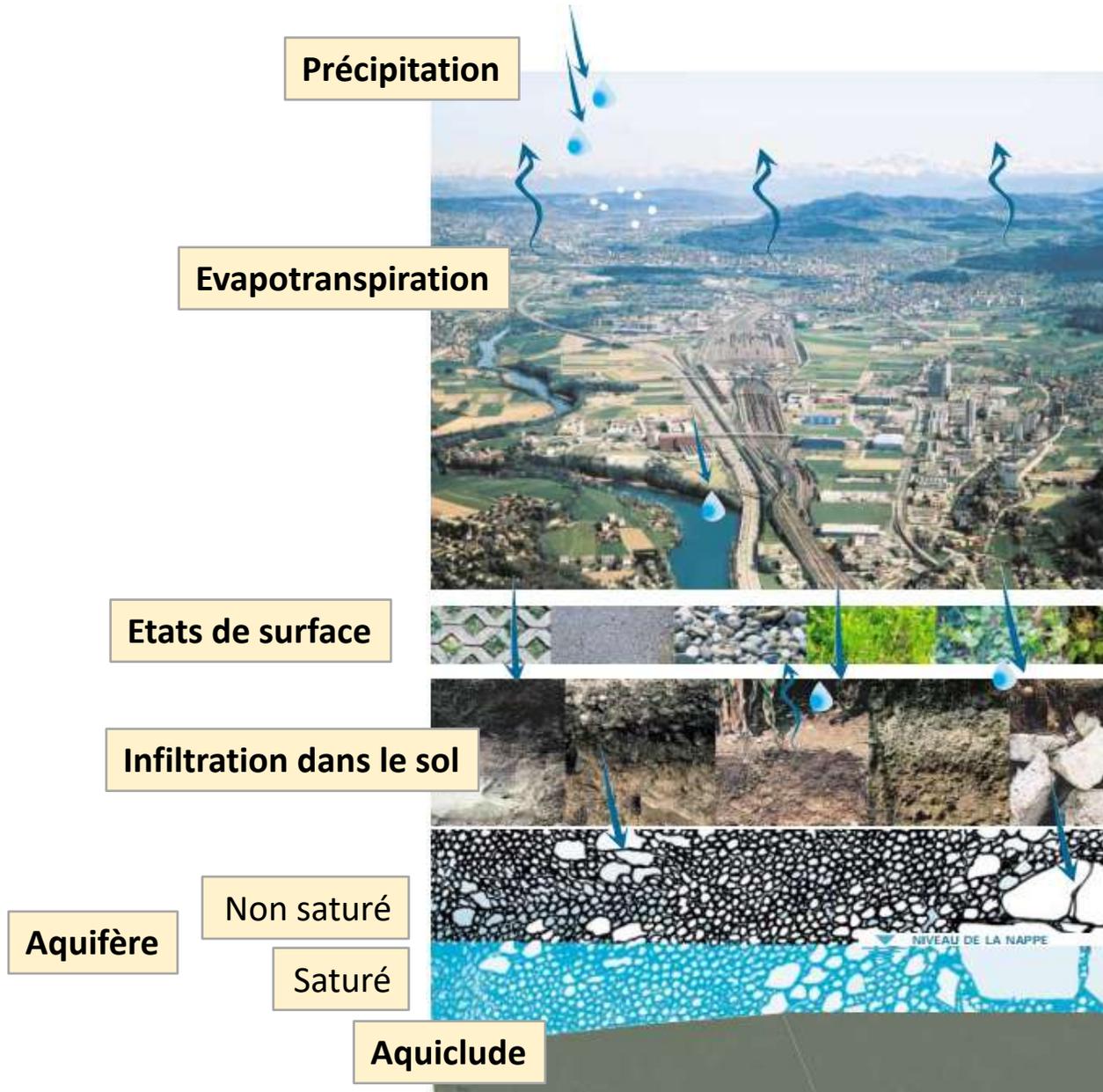
# Un peu de pédagogie : l'eau souterraine dans un versant

L'eau souterraine circule (plus ou moins vite) et est stockée (plus ou moins longtemps) dans un réservoir

- Aquifère = domaine souterrain perméable et continu qui constitue le gisement d'eau souterraine.
- Sa structure et son fonctionnement dépendent (au premier ordre) de la géologie.



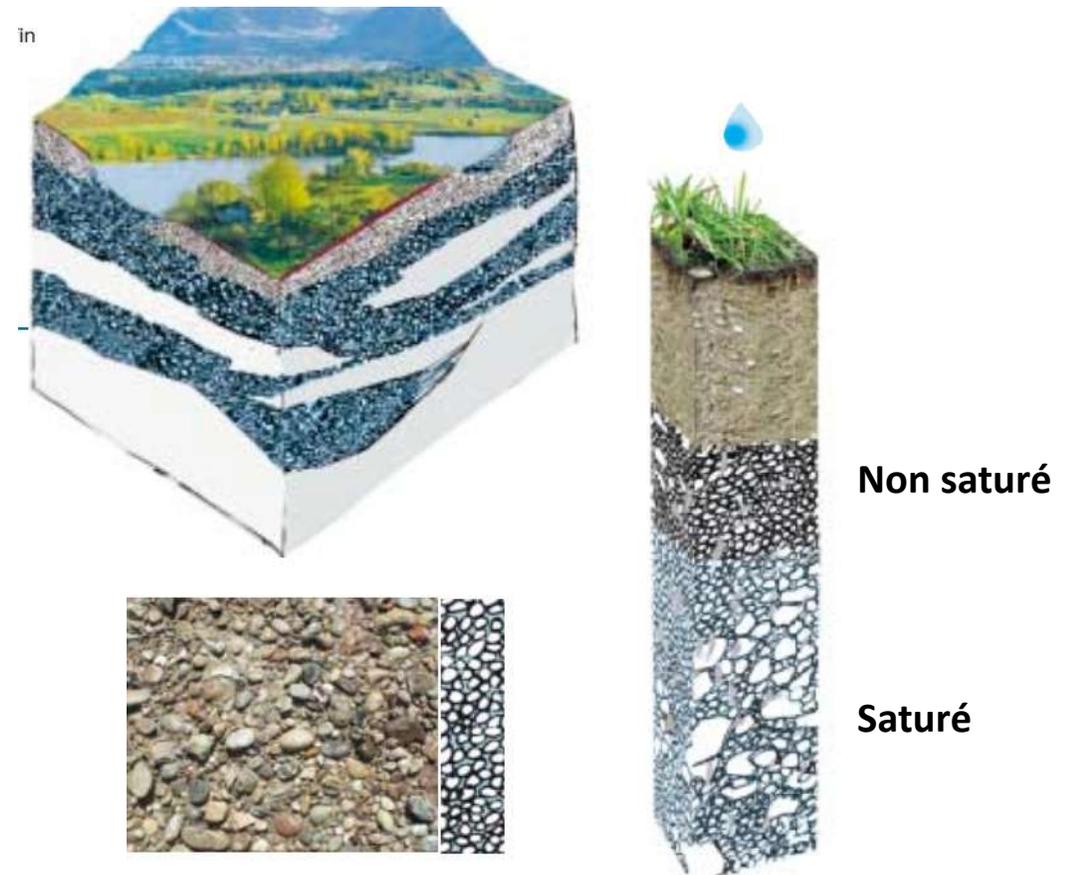
# Un peu de pédagogie : l'infiltration et les circulations de l'eau souterraine



## Le cas d'Embrun / La Belotte

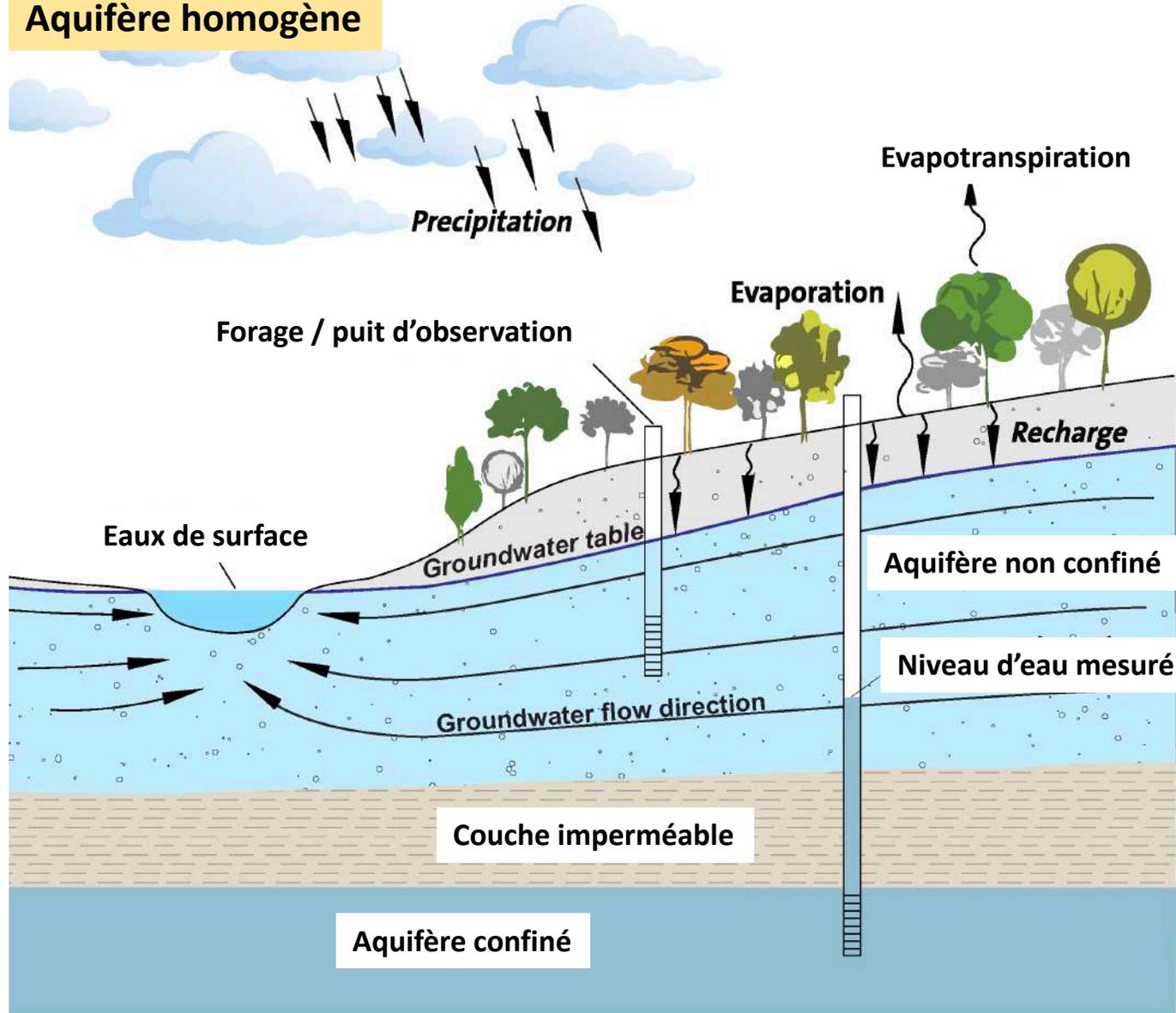
Aquifère de porosité d'interstice

- Alluvions fluvio-glaciaires
- Argiles, limons sables et graviers plus ou moins gros, de sorte que les interstices sont eux aussi de taille variable

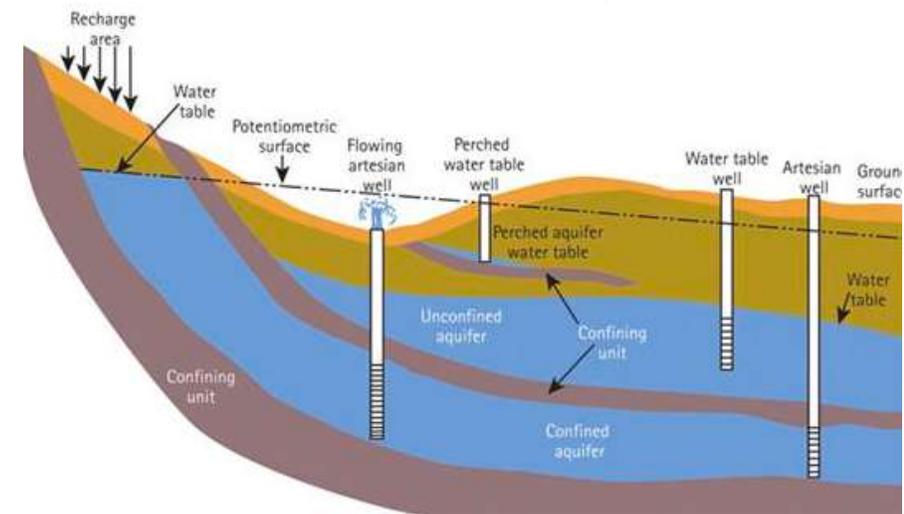
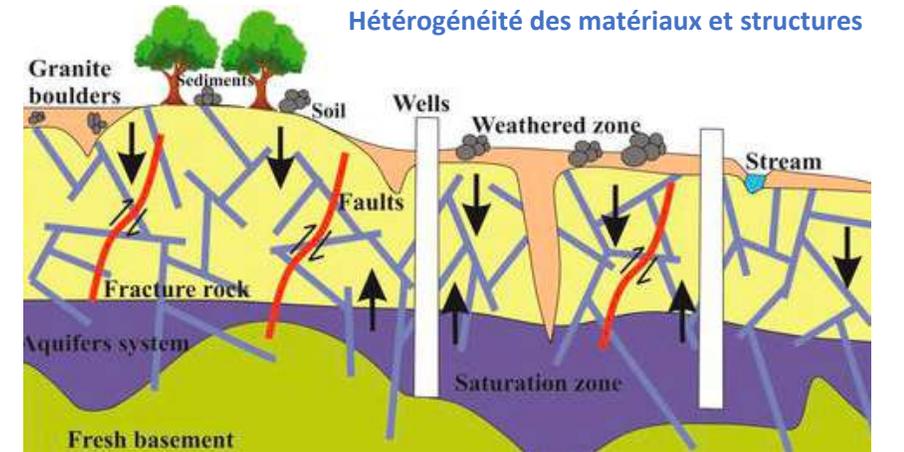


# Un peu de pédagogie : que faut-il mesurer pour modéliser les écoulements ?

## Aquifère homogène

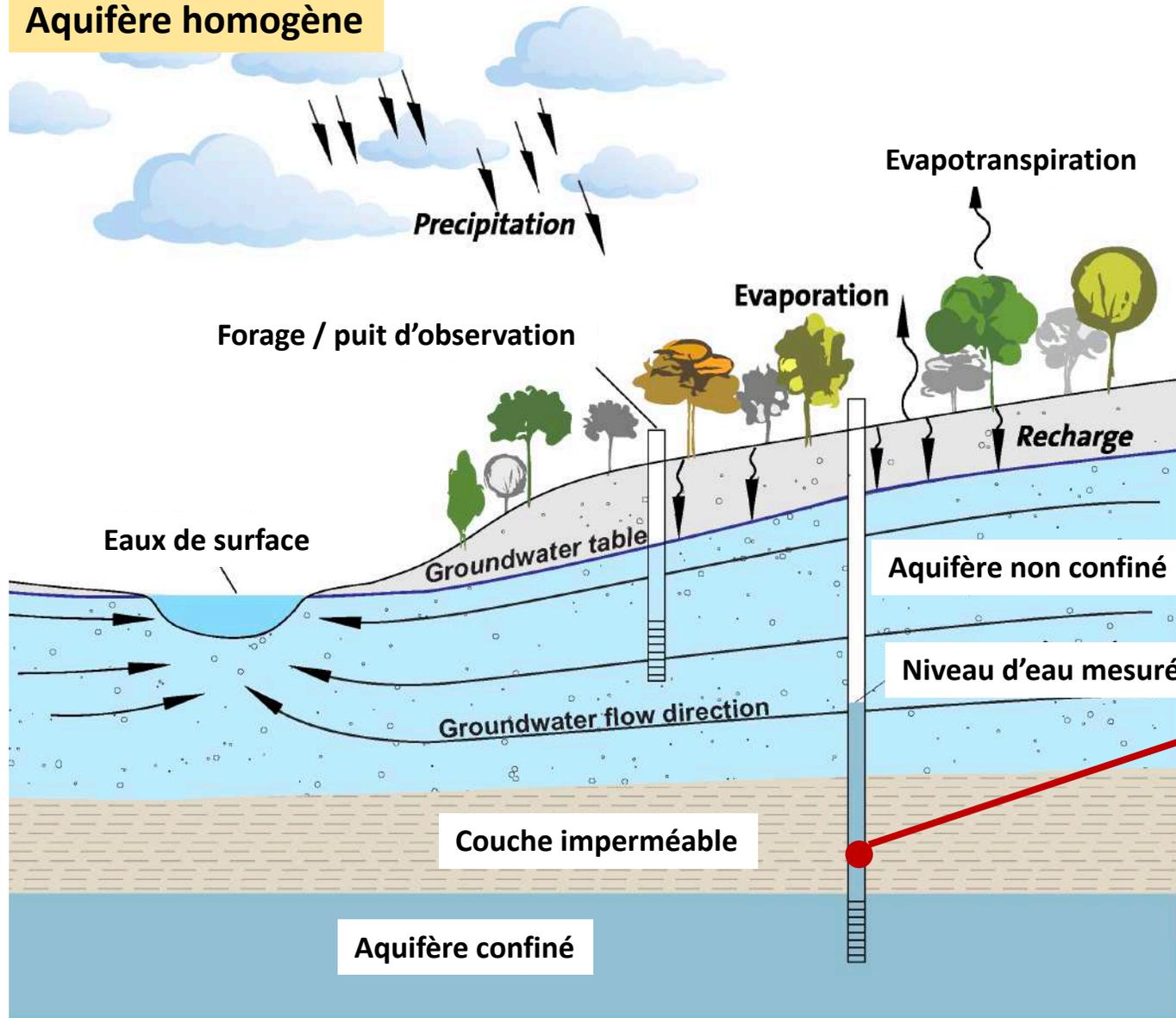


## Aquifères hétérogènes



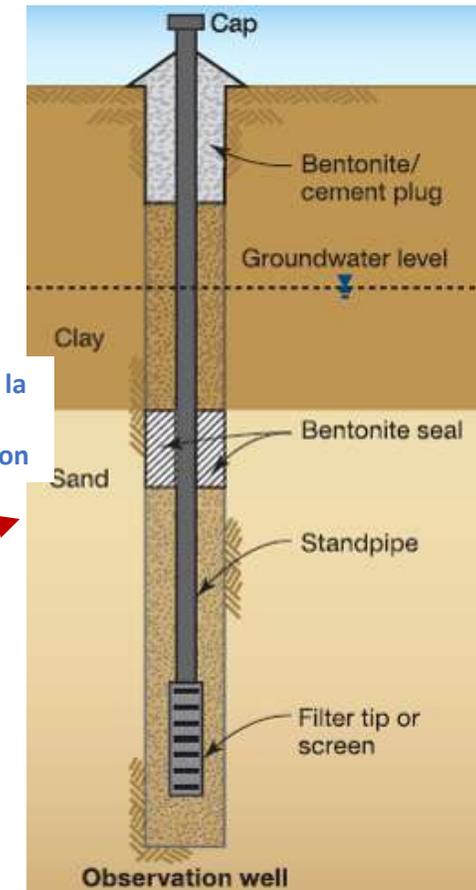
# Un peu de pédagogie : que faut-il mesurer pour modéliser les écoulements ?

## Aquifère homogène

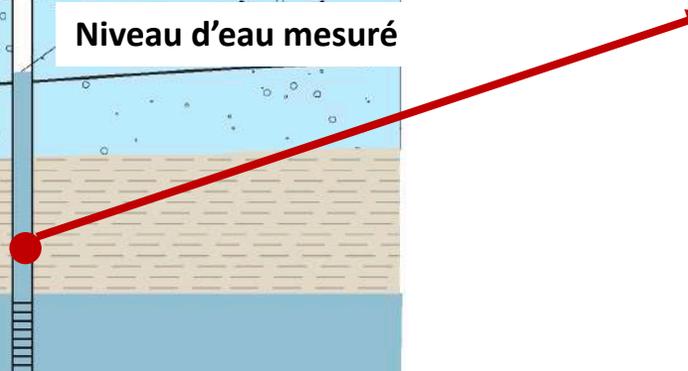


## Intérêt des mesures hydrodynamiques

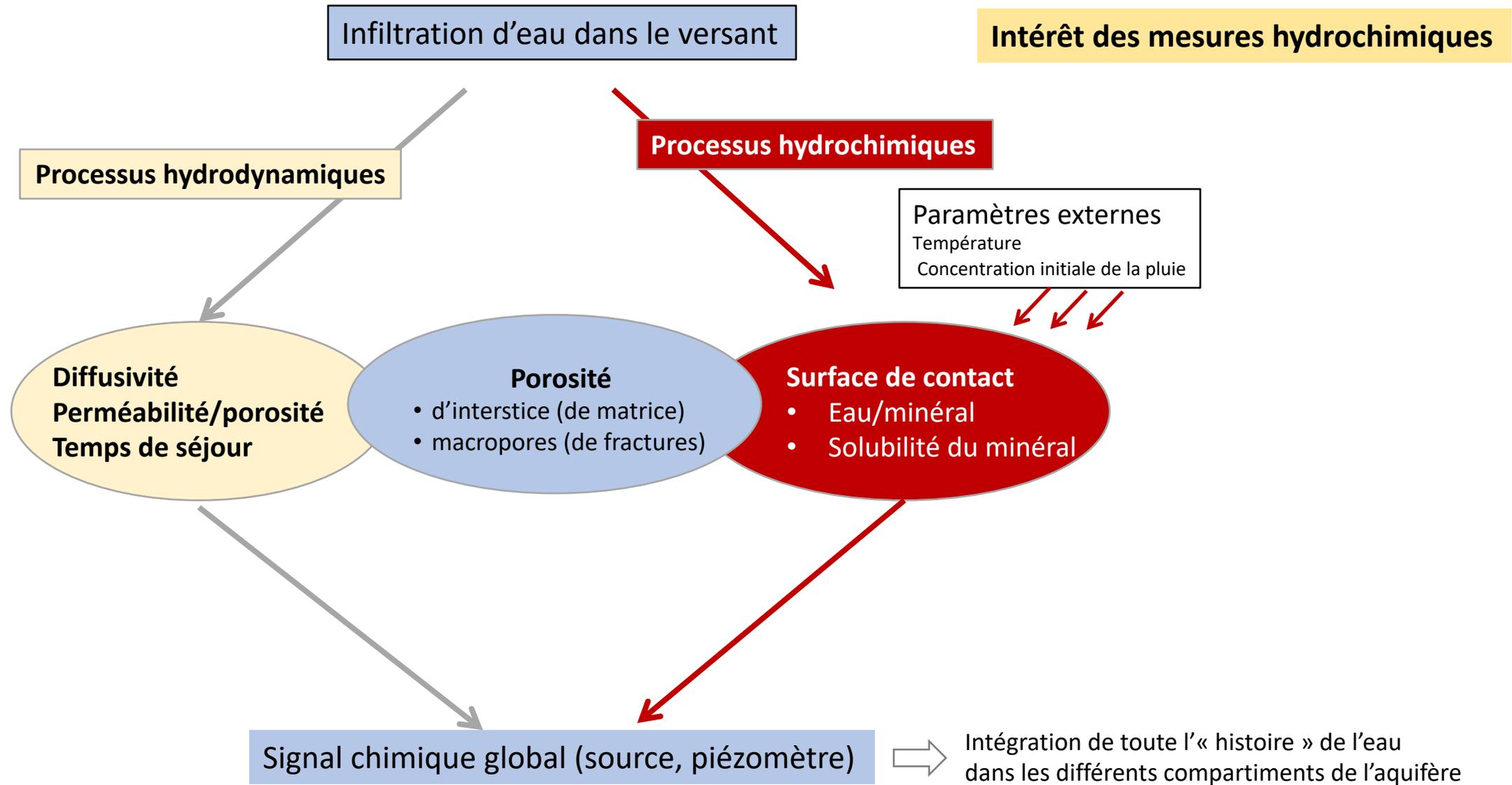
### Principe du piézomètre ouvert



Choix judicieux de la localisation des points d'observation



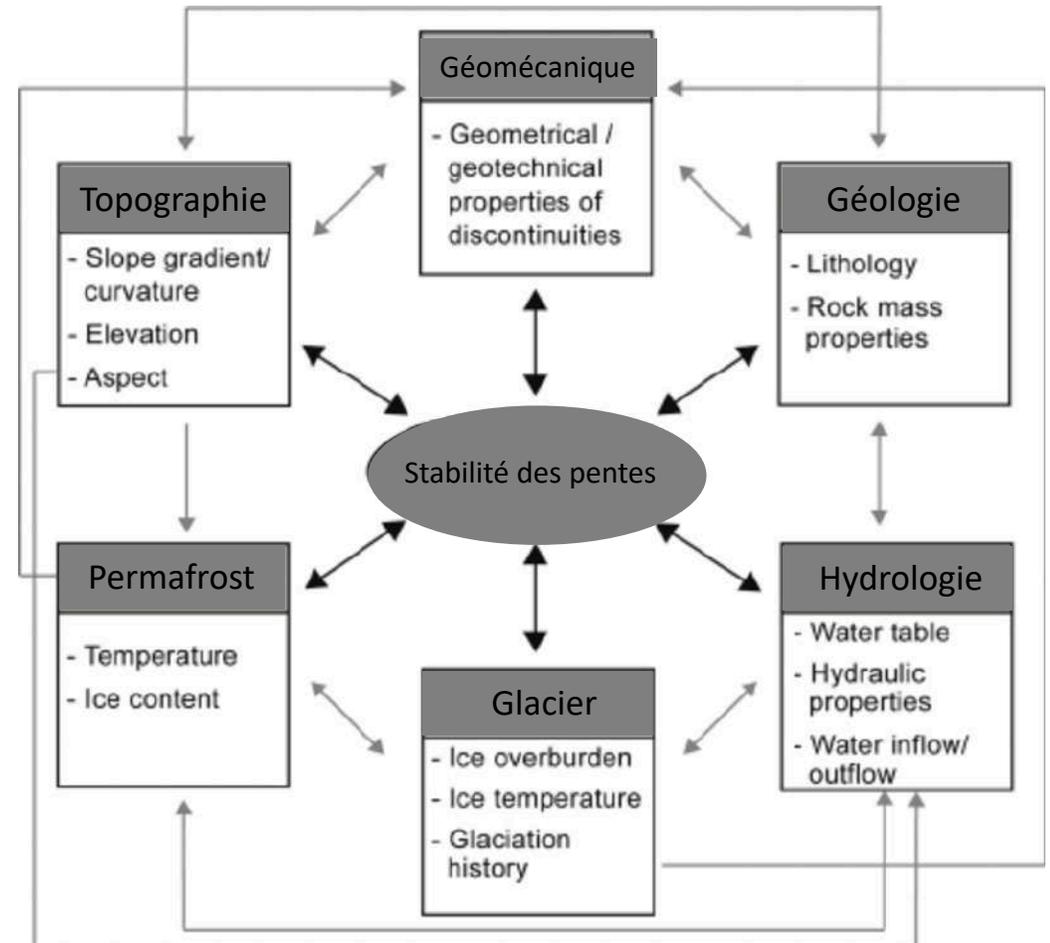
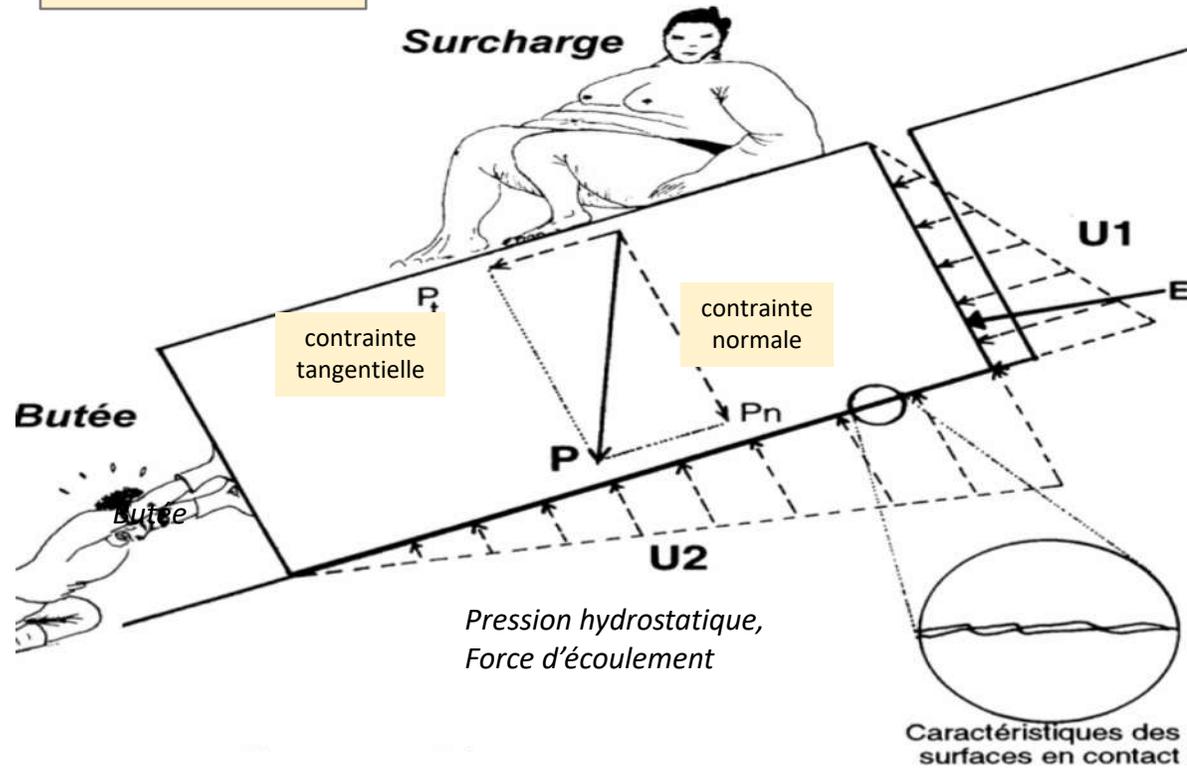
# Un peu de pédagogie : que faut-il mesurer pour modéliser les écoulements ?



# Un peu de pédagogie : circulation d'eau et stabilité des versants

Quels sont les facteurs qui contrôlent la stabilité d'un versant?

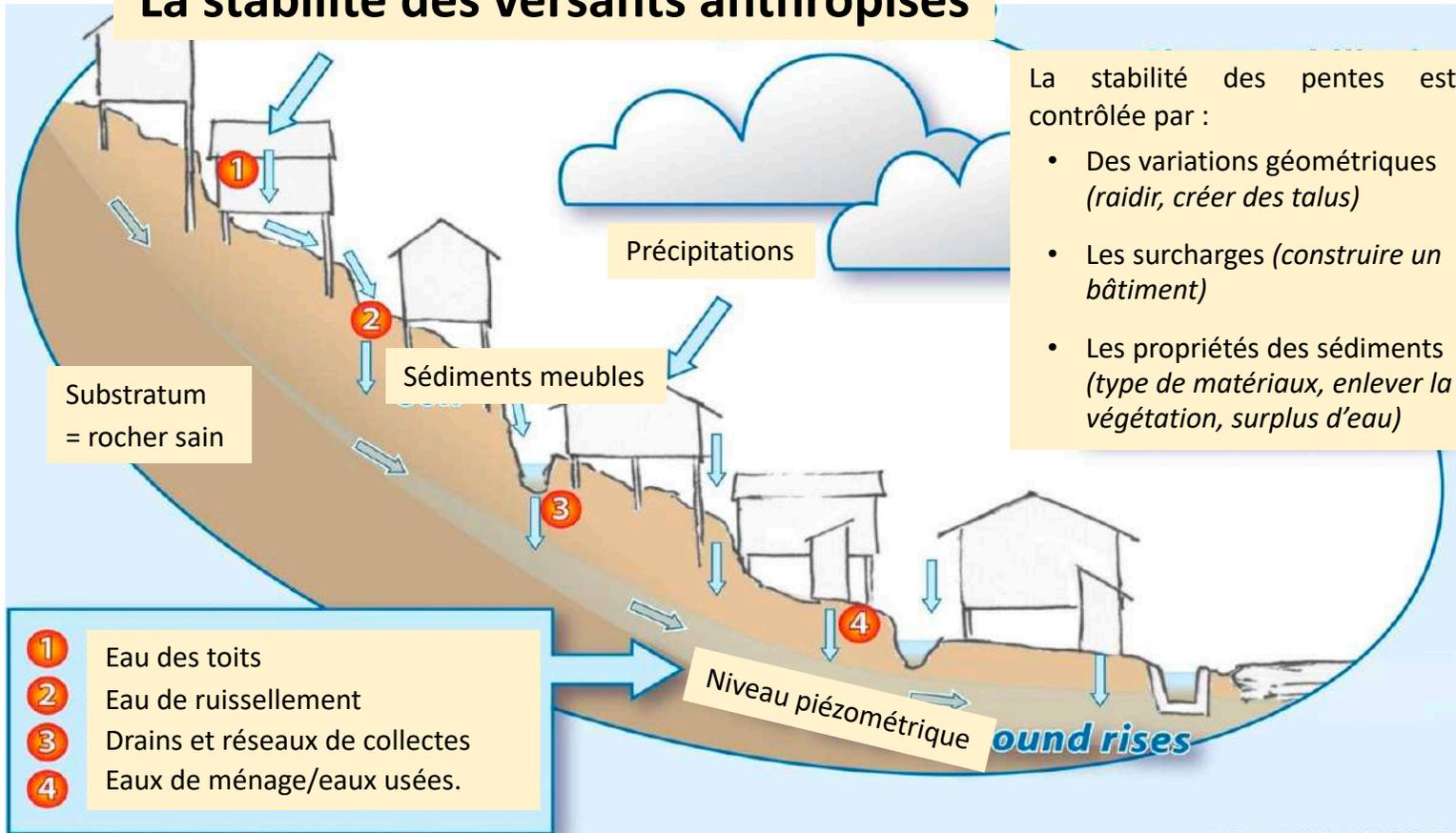
Bilan de forces



# Un peu de pédagogie : circulation d'eau et stabilité des versants

Et sur un versant anthropisé ? Le rôle fondamental du contrôle des eaux

## La stabilité des versants anthropisés



# Cadre de l'étude : Contribuer à la connaissance du phénomène gravitaire

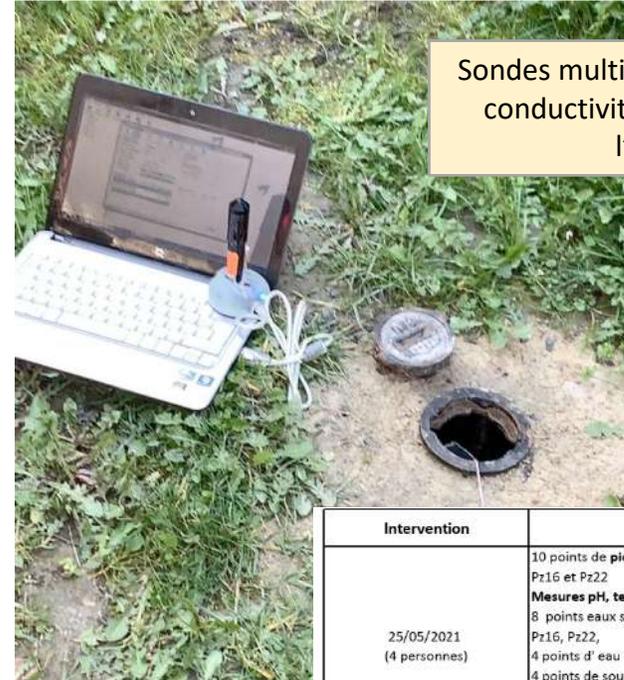
## Observations réalisées depuis mai 2021 sur La Belotte



Mesures piézométriques et hydrochimiques (conductivité, T°) et prélèvements d'eau souterraine (en puits)



Prélèvements d'eau de surface

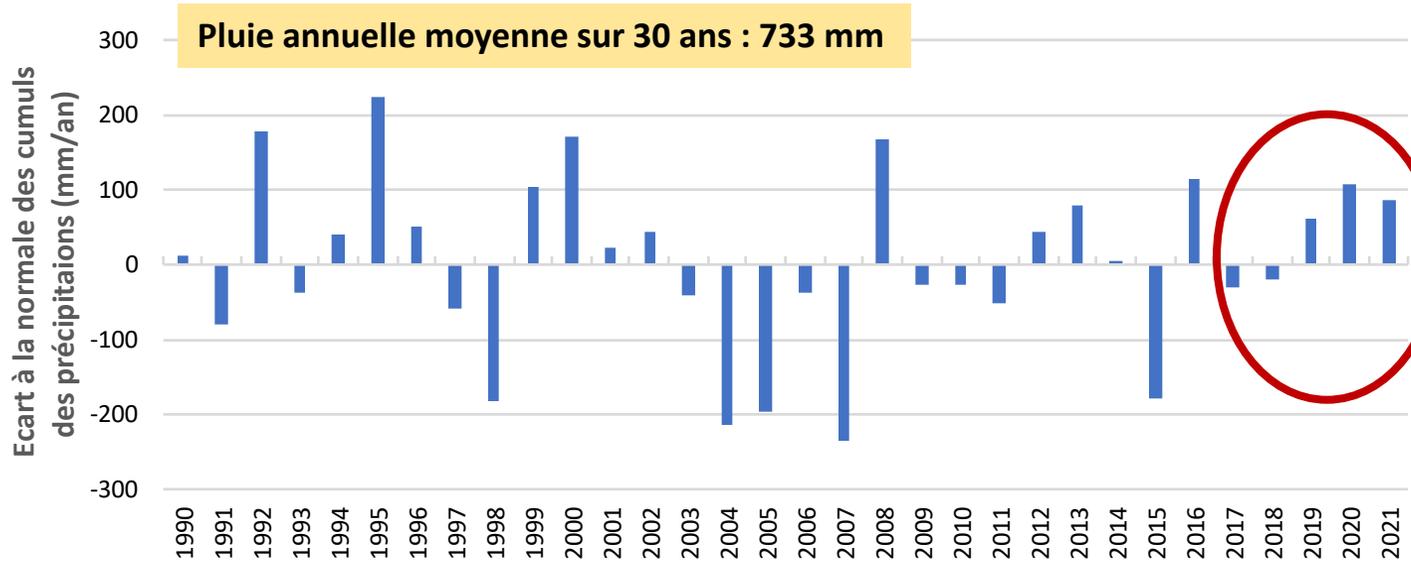


Sondes multi-paramètres (pression d'eau, conductivité de l'eau, température de l'eau) en continu

Investigations menées depuis fin mai 2021 (4 campagnes)

| Intervention                         | mesures terrain   | Analyse chimique en laboratoire  |
|--------------------------------------|---|--|
| 25/05/2021<br>(4 personnes)          | 10 points de piézométrie : Pz4, Pz5, Pz7, Pz8, Pz10, Pz12, Pz14, Pz15, Pz16 et Pz22<br><b>Mesures pH, température et conductivité électrique:</b><br>8 points eaux souterraines : Pz4, Pz8, Pz10, Pz12, Pz14, Pz15, drain Pz16, Pz22,<br>4 points d'eau de surface (ruisseau en amont et bordant le glissement)<br>4 points de sources captées (AEP Petit Puy, AEP Rame, AEP Joutelle ; Fontaine Lavoir de Caléryère) | Cations (Ca, Mg, Na, K, Li, Sr)<br>Anions (Cl, SO4, NO3, NO2 PO4, F, HCO3, Br)<br>Molécule neutre (SiO2) |
| 07/09/2021<br>(4 personnes)          | 11 points de piézométrie : Pz4, Pz5, Pz7, Pz8, Pz9, Pz10, Pz12, Pz14, Pz15 Pz16 et Pz22<br><b>Mesures pH, température et conductivité électrique:</b><br>11 points eaux souterraines : Pz4, Pz5, Pz7, Pz8, Pz9, Pz10, Pz12, Pz14, Pz15 Pz16 et Pz22<br>2 points d'eau de surface (ruisseau en amont et bordant le glissement partie occidentale)<br>1 points de source captée (Fontaine Lavoir de Caléryère)          | Cations (Ca, Mg, Na, K, Li, Sr)<br>Anions (Cl, SO4, NO3, NO2 PO4, F, HCO3, Br)<br>Molécule neutre (SiO2) |
| 11-12 decembre 2021<br>(2 personnes) | 11 points de piézométrie : Pz4, Pz5, Pz7, Pz8, Pz9, Pz10, Pz12, Pz14, Pz15 Pz16 et Pz22<br>1 prélèvement d'eau-nouveau forage artésien  | Cations (Ca, Mg, Na, K, Li, Sr)<br>Anions (Cl, SO4, NO3, NO2 PO4, F, HCO3, Br)<br>Molécule neutre (SiO2) |
| 07/02/2022<br>(3 personnes)          | déploiement de 3 capteurs mesurant la conductivité électrique, la température et la hauteur d'eau sur les piézomètres Pz22, Pz16 et Pz8 et d'un baromètre (Pz4)   |  |

# La période météorologique 2017-2021 est elle particulière ?



- Variabilité inter-annuelle représentative d'un climat méditerranéen de montagne
- Légère augmentation de la quantité annuelle de précipitations en 2019-2021, mais dans la tendance de la normale climatique (30 ans)

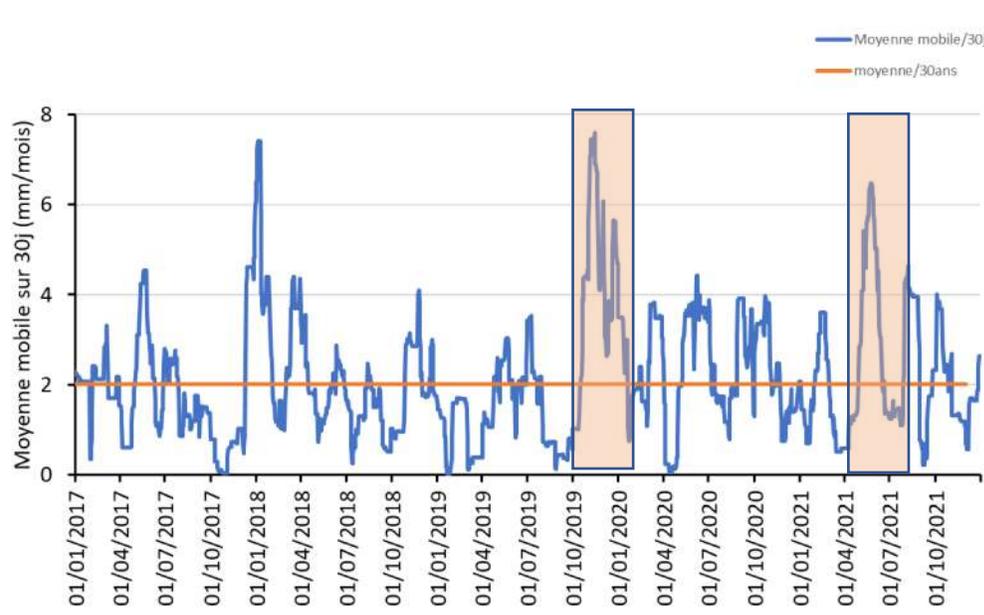
*Pluviométrie moyenne annuelle*

*(en lien avec la normale climatique 1990-2021) :*

*+ 60 mm en 2019 (soit 793 mm/an)*

*+ 108 mm en 2020 (soit 841 mm/an)*

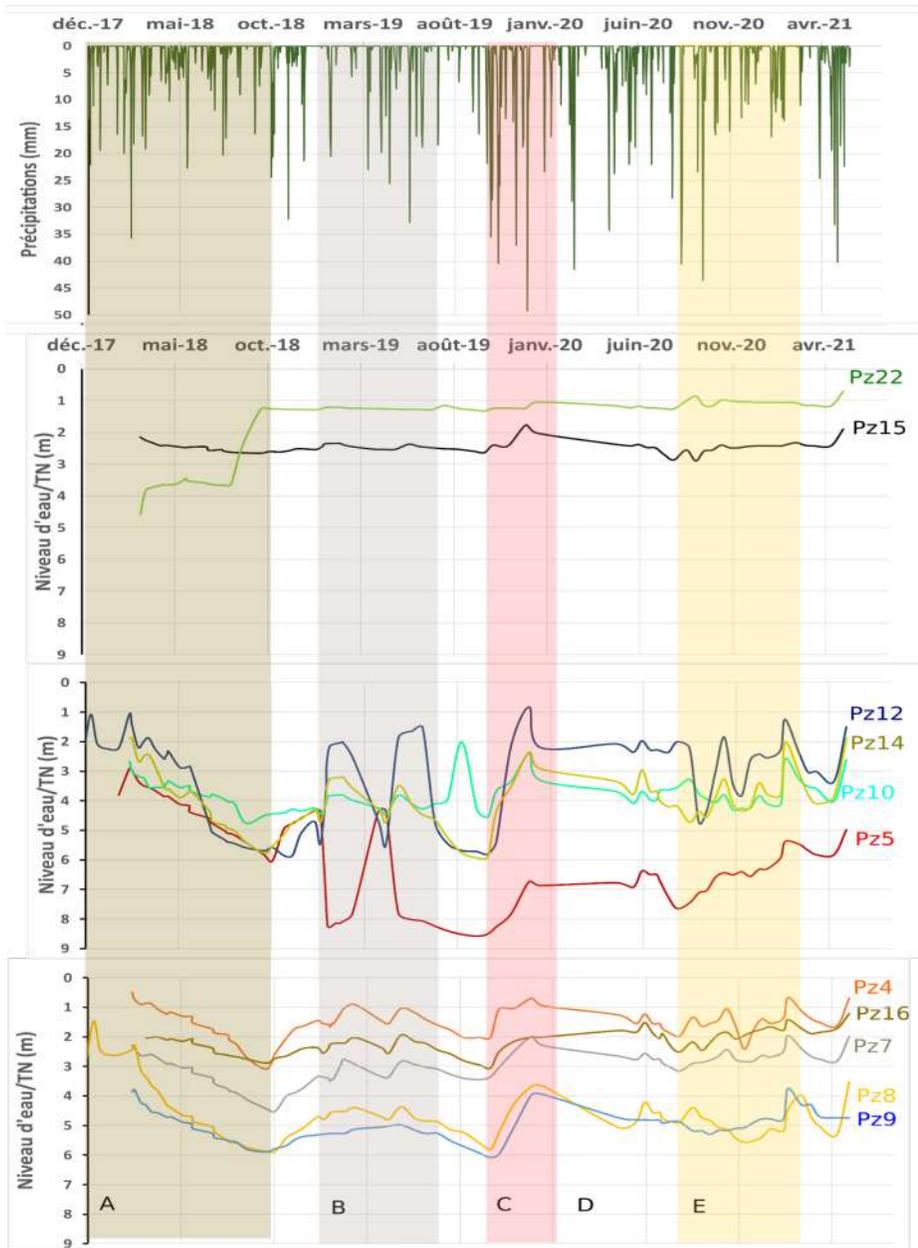
*+ 86 mm en 2021 (soit 819 mm/an)*



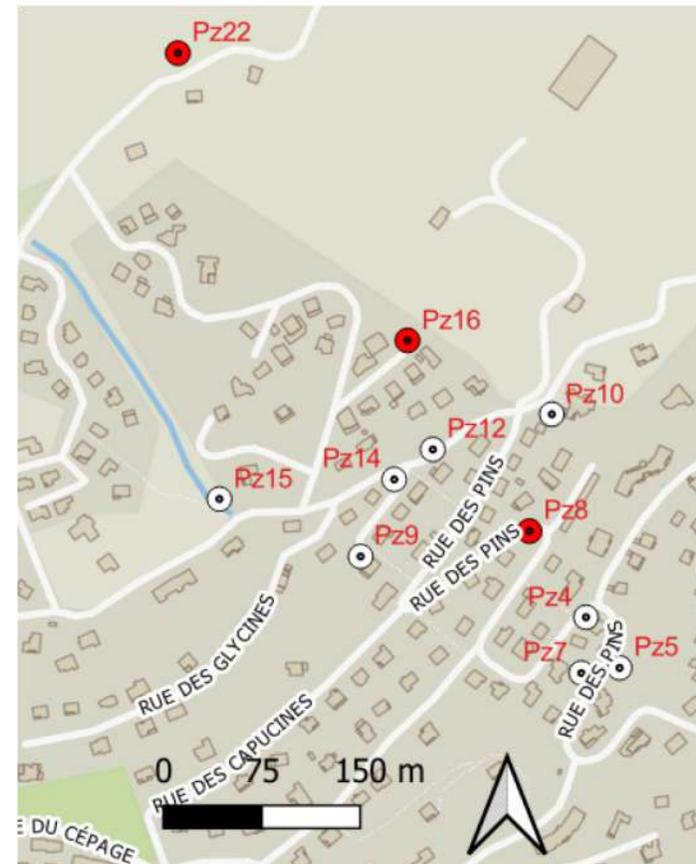
- Variation de la répartition saisonnière de la pluviométrie

*Changement de comportement en 2019, avec des pluies printanières mieux marquées et surtout des pluies automnales largement supérieures à la moyenne sur 30 ans*

# Les chroniques piézométriques : Décembre 2017 à Avril 2021

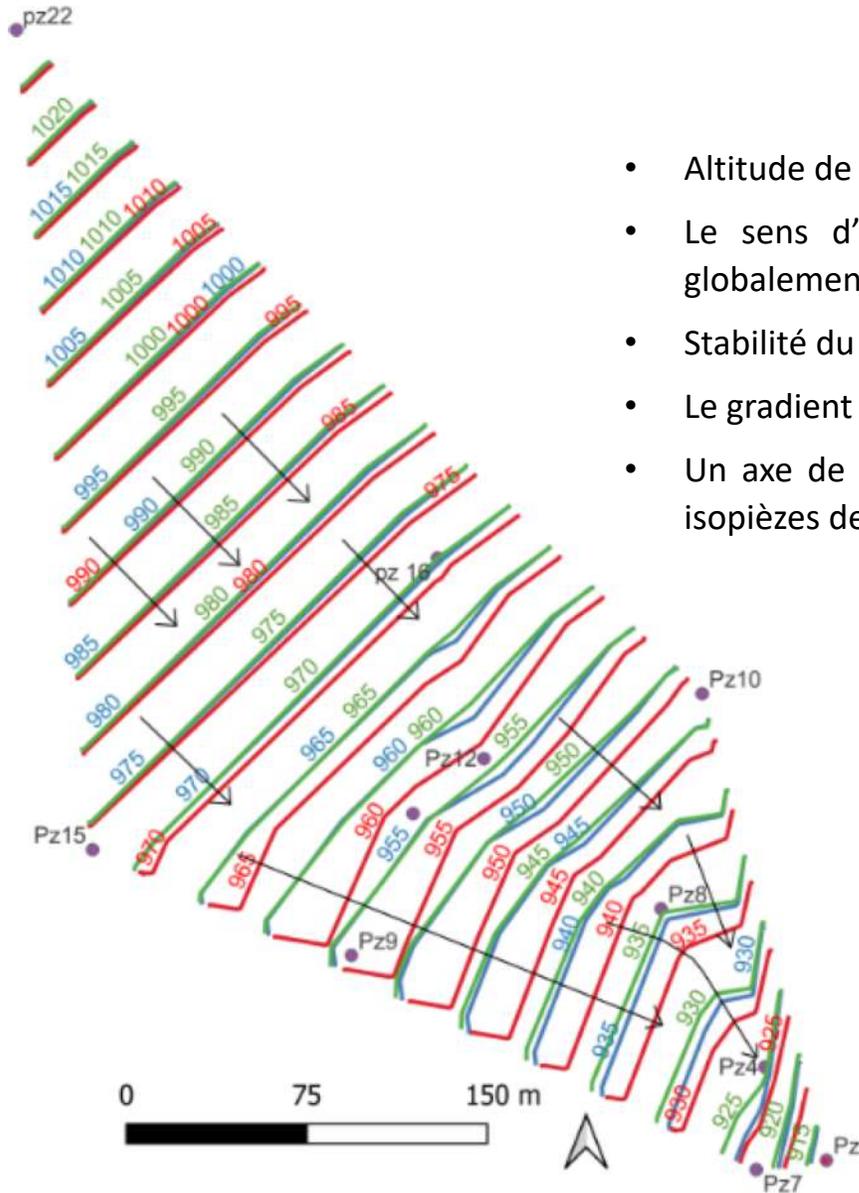
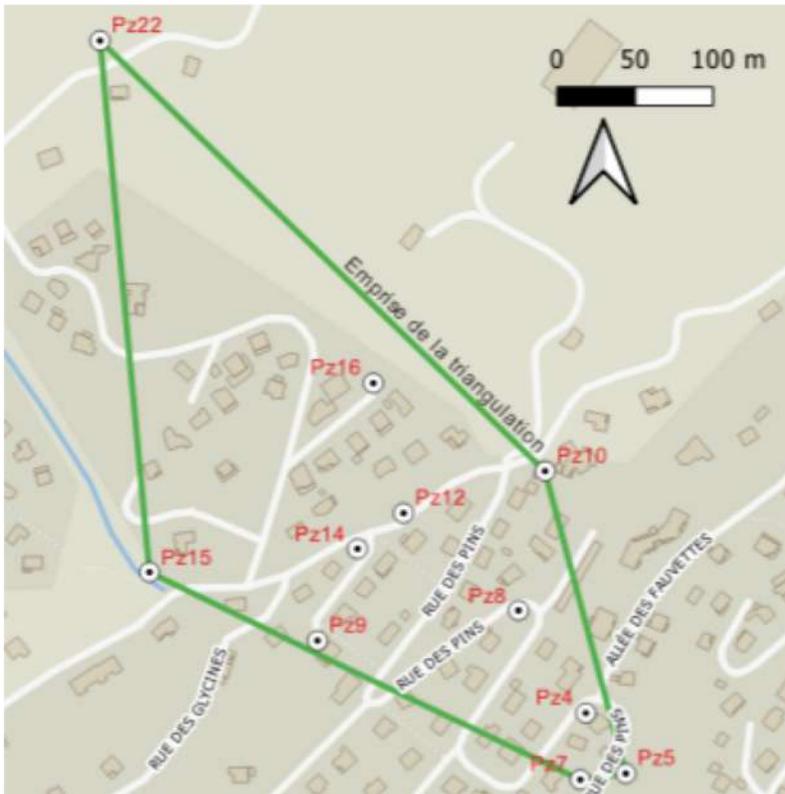


Niveaux d'eau très variables selon les ouvrages et leur localisation dans le versant – forte hétérogénéité locale :  
entre - 1m (T.N.) et - 8 m (T.N.)



# Les chroniques piézométriques : Décembre 2017 à Avril 2021

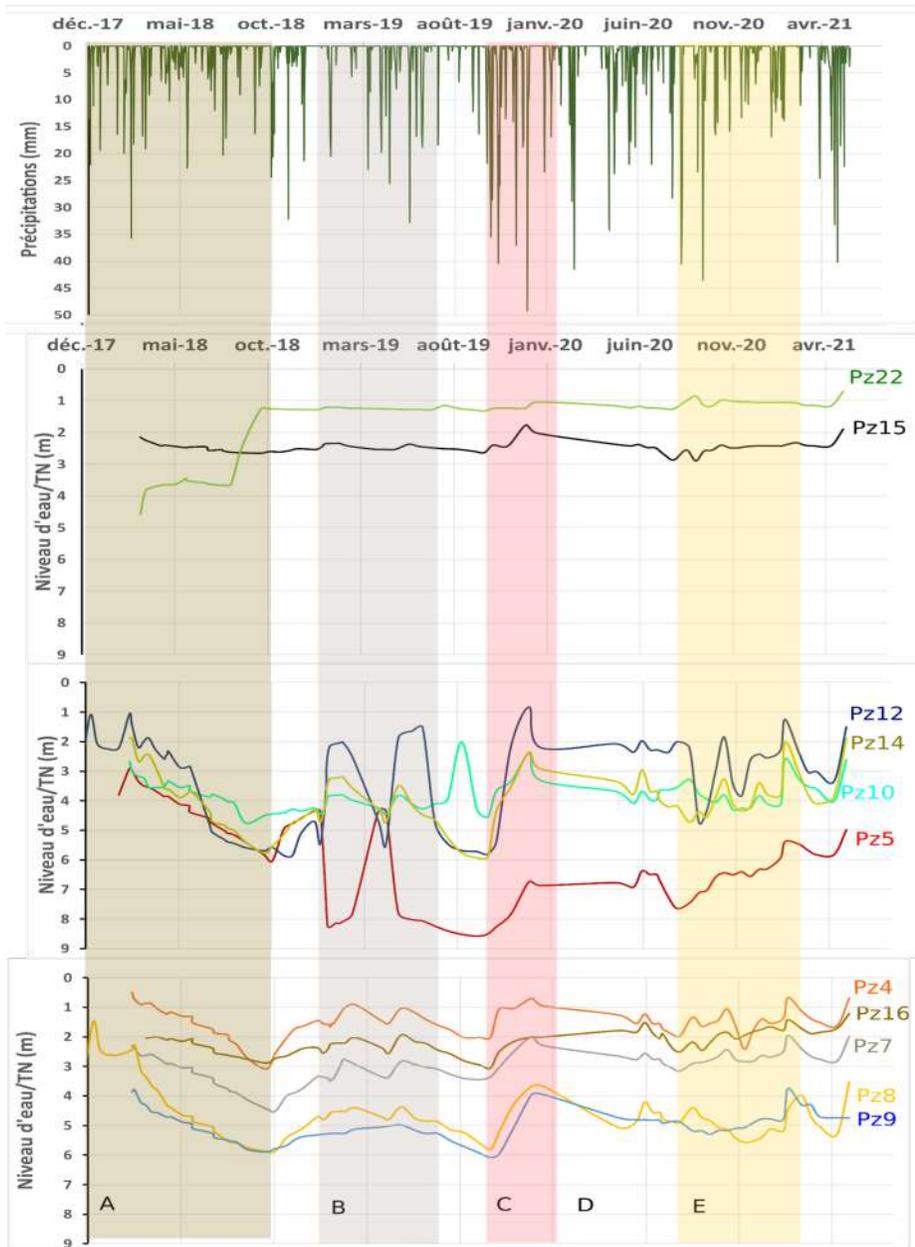
Le sens d'écoulement de la nappe à partir des hauteurs d'eau (isopièzes)



- Altitude de la nappe d'eau : entre 1030 et 910 m.
- Le sens d'écoulement de la nappe est NW-SE et suit globalement la topographie de surface.
- Stabilité du sens d'écoulement sur la période.
- Le gradient hydraulique est fort (env. 20%).
- Un axe de drainage est mis en évidence par l'analyse des isopièzes depuis l'amont vers le Pz4.

→ sens d'écoulement  
— septembre-piezo  
— juin-piezo  
— decembre-piezo

# Les chroniques piézométriques : Décembre 2017 à Avril 2021



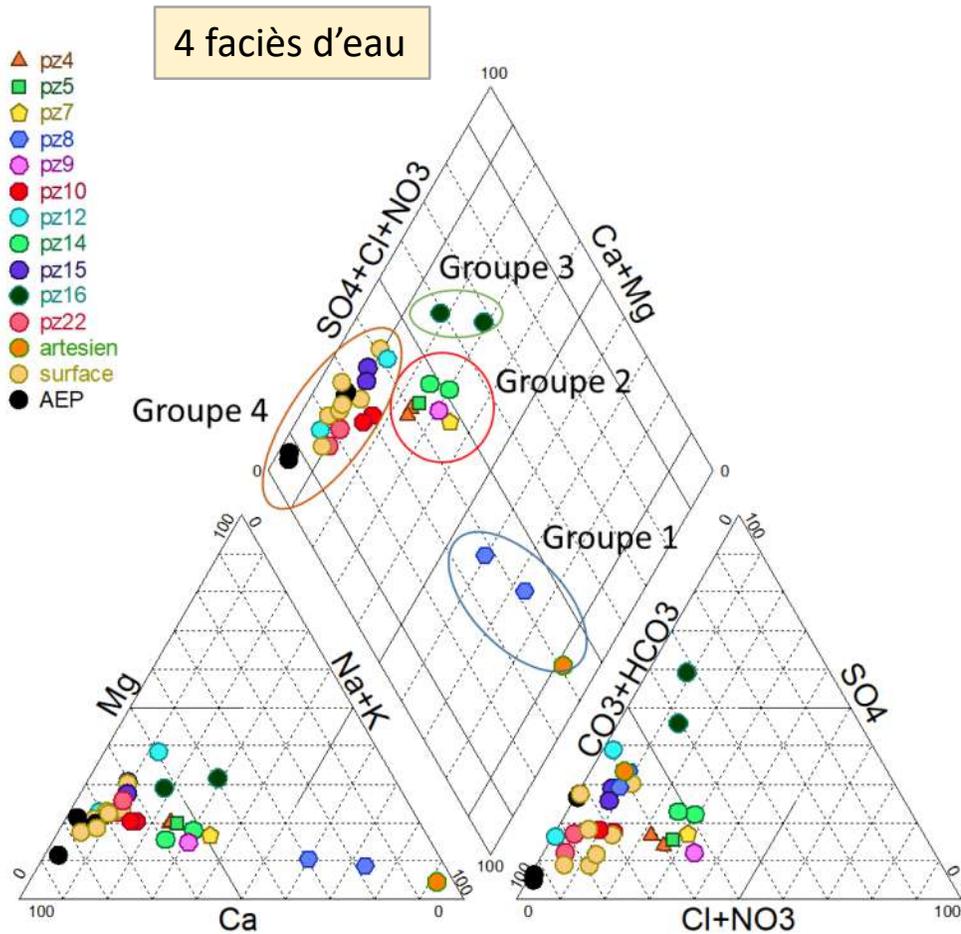
Niveaux d'eau très variables selon les ouvrages et localisation dans le versant – forte hétérogénéité locale :

entre - 1m (T.N.) et - 8 m (T.N)

## Variations temporelles

- **Période A** : baisse de la piézométrie de mars à novembre 2018 qui correspond à une période peu pluvieuse.
- **Période B** : variations de la piézométrie différentes et pas forcément synchrones avec la pluviométrie selon les ouvrages.
- **Période C** : augmentation synchrone du niveau d'eau de septembre 2019 à janvier 2020 sur l'ensemble des piézomètres avec des modalités différentes de réaction selon les piézomètres.
- **Période D** : baisse du niveau d'eau de février 2020 à août 2020.
- **Période E** : variations du niveau d'eau en réponse aux précipitations automnales pour l'ensemble des piézomètres.

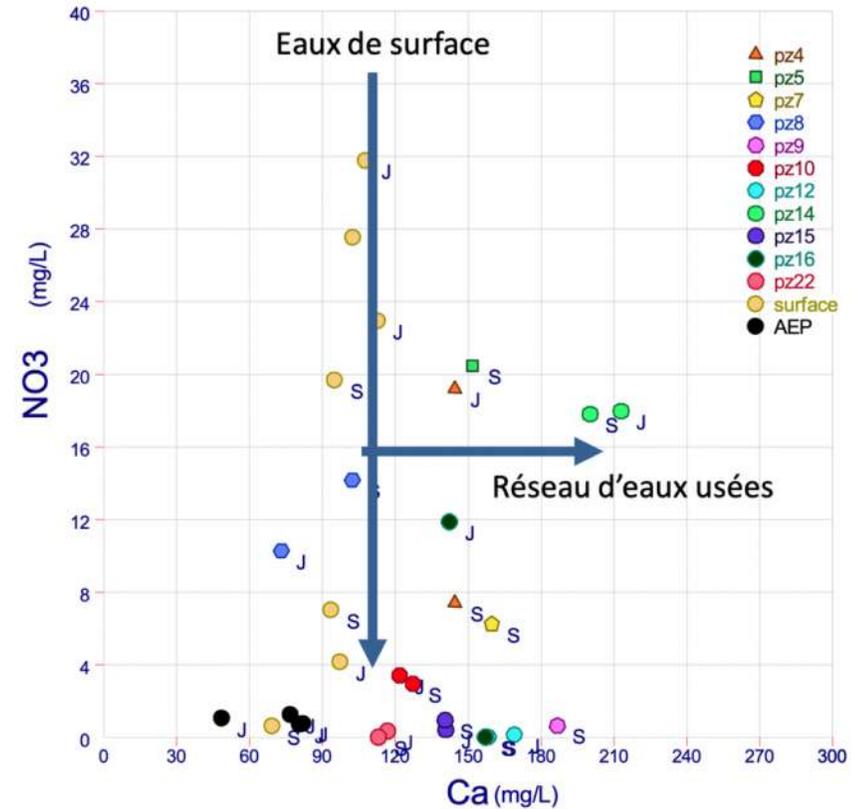
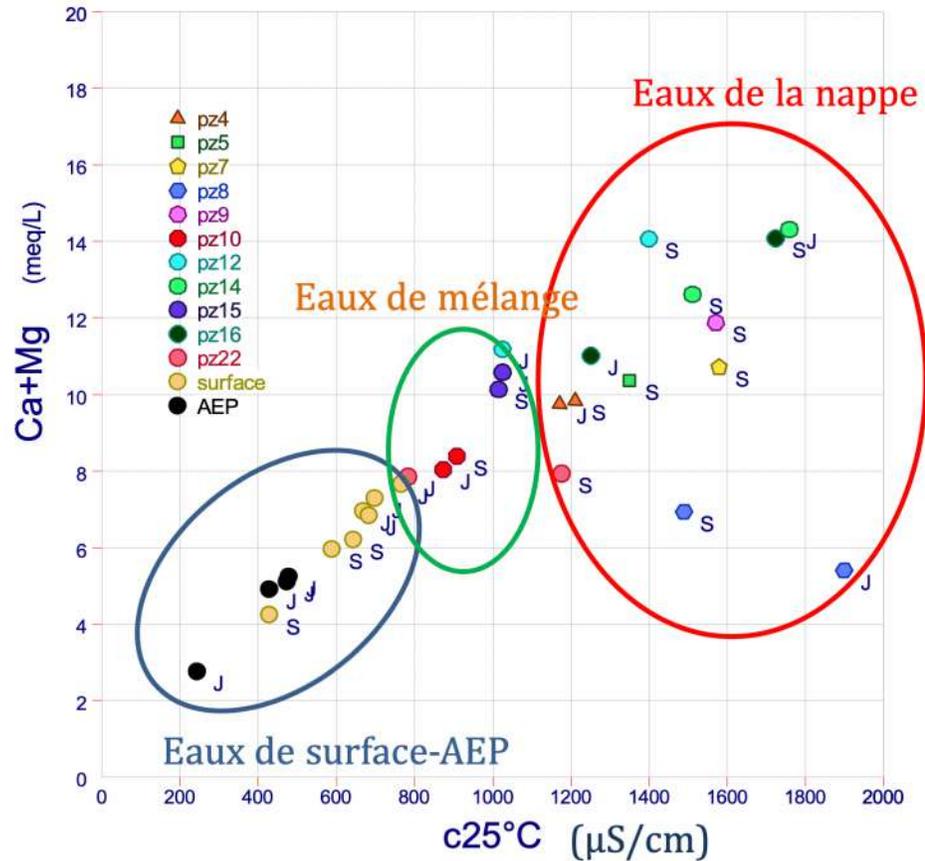
# L'origine des masses d'eaux à partir de la chimie



## Prélèvements des eaux et analyses des ions (anions/cations) majeurs

- **Groupe 1**  
faciès bicarbonaté-sodique et potassique  
eaux prélevées dans le forage artésien et le Pz8 (juin et septembre)
- **Groupe 2**  
faciès bicarbonaté chloruré calcique  
eaux prélevées dans les piézomètres Pz14, Pz9, Pz7, Pz4 et Pz5
- **Groupe 3**  
faciès sulfaté-bicarbonaté calcique  
eaux du Pz16
- **Groupe 4**  
faciès bicarbonaté calcique  
eaux de surface. + eaux des différents captages  
eaux souterraines des piézomètres Pz22, Pz15, Pz12 et Pz10.

# L'origine des masses d'eaux à partir de la chimie



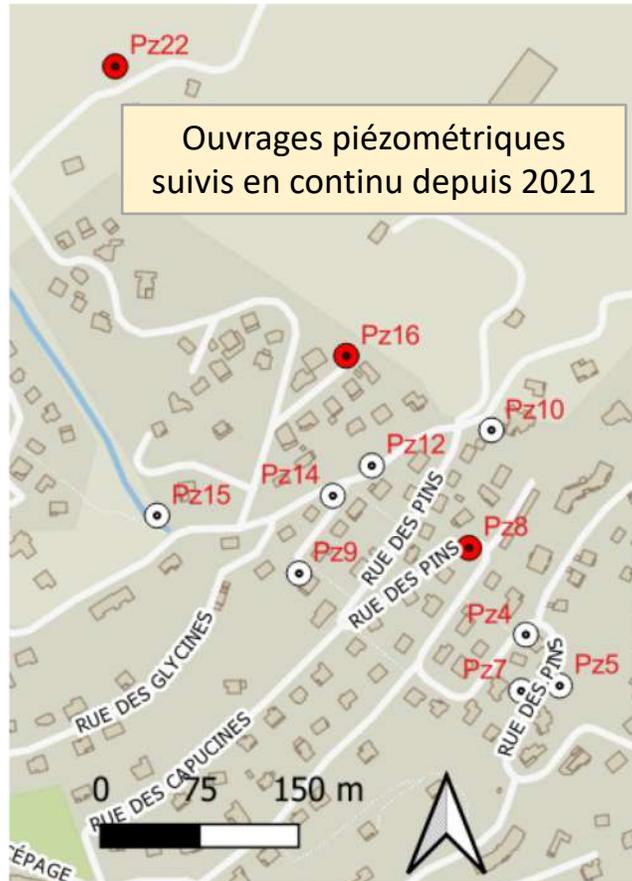
- Influence forte des eaux de surface sur la chimie des eaux souterraines : Pz22, Pz10, Pz15 et Pz12
- Eaux souterraines (de nappe) dans les moraines : interaction eau-minéraux avec des temps de contact importants et/ou des vitesses d'écoulement plus lentes dans la matrice rocheuse

- Effet du réseau d'eaux usées : secteurs autour des piézomètres Pz5, Pz4, Pz8 et Pz14 fortement influencés par des eaux usées.

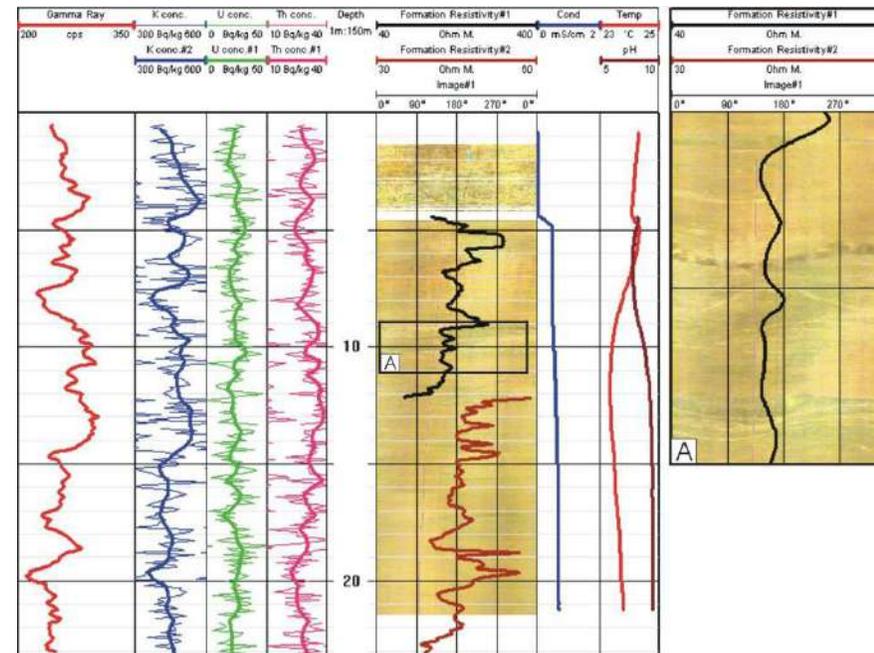
# Les études en cours : proposer un modèle numérique des écoulements

## Etude en cours : des étapes d'analyses nécessaires pour construire un modèle

- Mise en place de sondes de mesures multi-paramètres
  - Piézomètres équipés (**P, T°, Cond**) : Pz22, Pz16, Pz8 (+ baromètre Pz4)
  - Piézomètre équipé (**P**) : Pz9
    - séries temporelles « longues » avec une instrumentation cohérente (2 années hydrologiques)
- Diagraphies de forage (en cours à partir d'aujourd'hui, 2 campagnes de mesure prévues) : imagerie et mesures de paramètres in-situ des matériaux



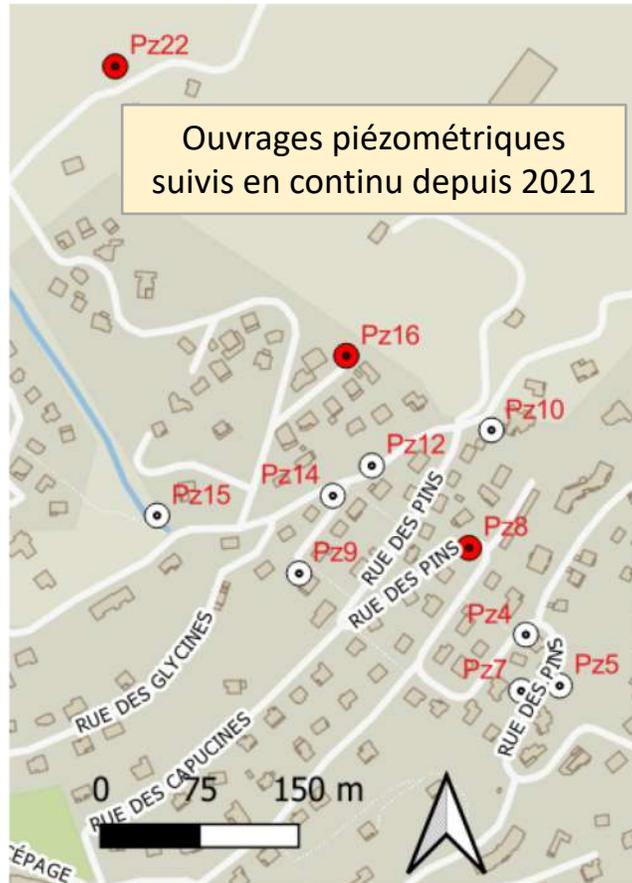
- P + T° + Conductivité (> janv. 2022)
- P (mesure continu en Pz9, non continue dans les autres ouvrages)



# Les études en cours : proposer un modèle numérique des écoulements

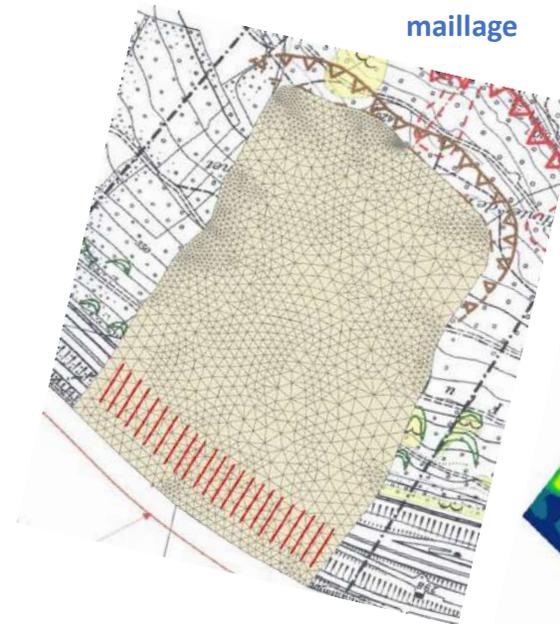
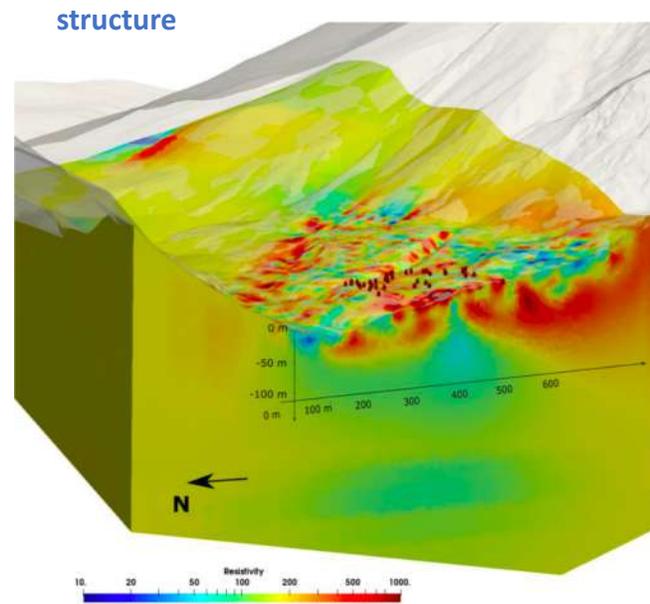
## Etude en cours : des étapes d'analyses nécessaires pour construire un modèle

- Comprendre et modéliser les conditions d'écoulement nécessite
  - l'élaboration d'un modèle géologique 3D
  - l'accès à des échantillons de matériaux (pour caractérisation des propriétés hydrogéologiques et pétrophysiques)

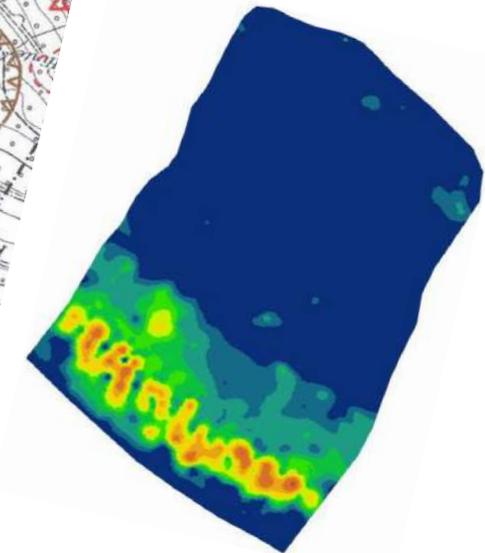


● P + T° + Conductivité (> janv. 2022)

○ P (mesure continu en Pz9, non continue dans les autres ouvrages)



hauteurs d'eau simulées

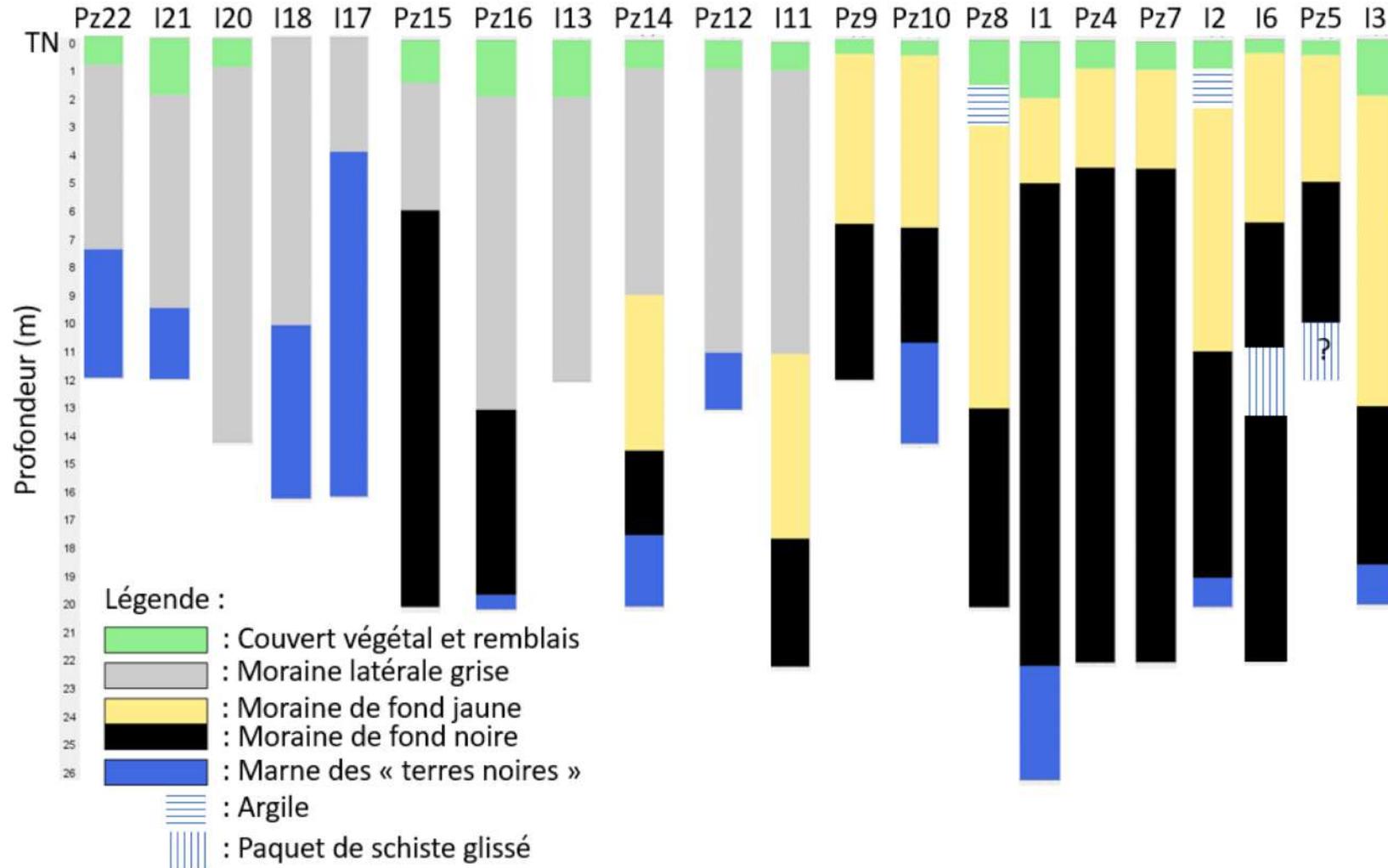


Exemple d'un modèle numérique d'écoulement



# Les études en cours : proposer un modèle numérique des écoulements

## Etape 1 : synthèse des données de forage



(>) 5 BE sont intervenus pour la réalisation des forages



Harmonisation des descriptions



≠ interprétations possibles (Pz5)

# Les études en cours : proposer un modèle numérique des écoulements

## Etape 2 : acquérir des données complémentaires (diagraphies de forage, géophysique aéroportée et in-situ)

**Décembre 2021** : acquisition de données d'**aimantation magnétique** → mesure en surface de légères variations spatiales du champ magnétique terrestre liée à des variations de l'aimantation des matériaux

Les cartes d'anomalie géomagnétique renseignent sur les principales structures / accidents géologiques. En géophysique aéroportée, l'identification des structures dépend de leur taille (dimension) et de l'altitude de vol



Dispositif d'acquisition sol

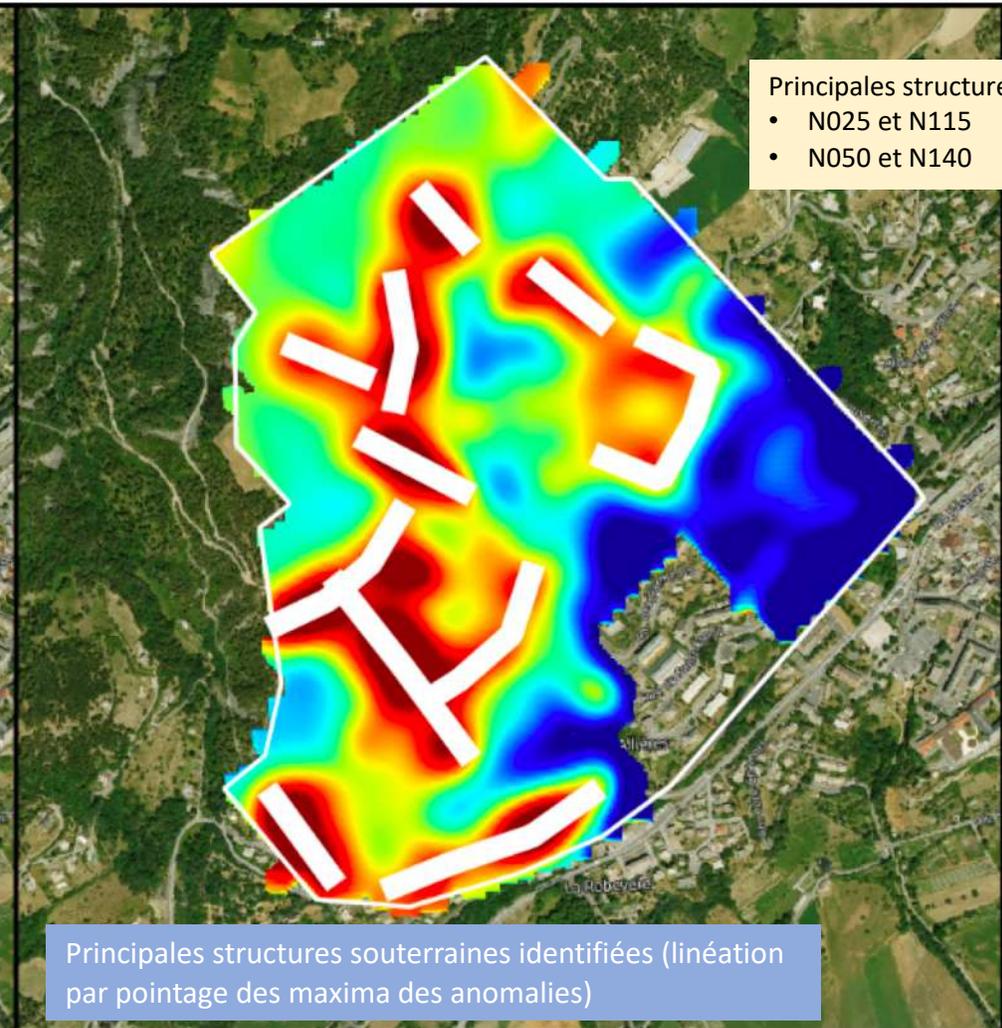
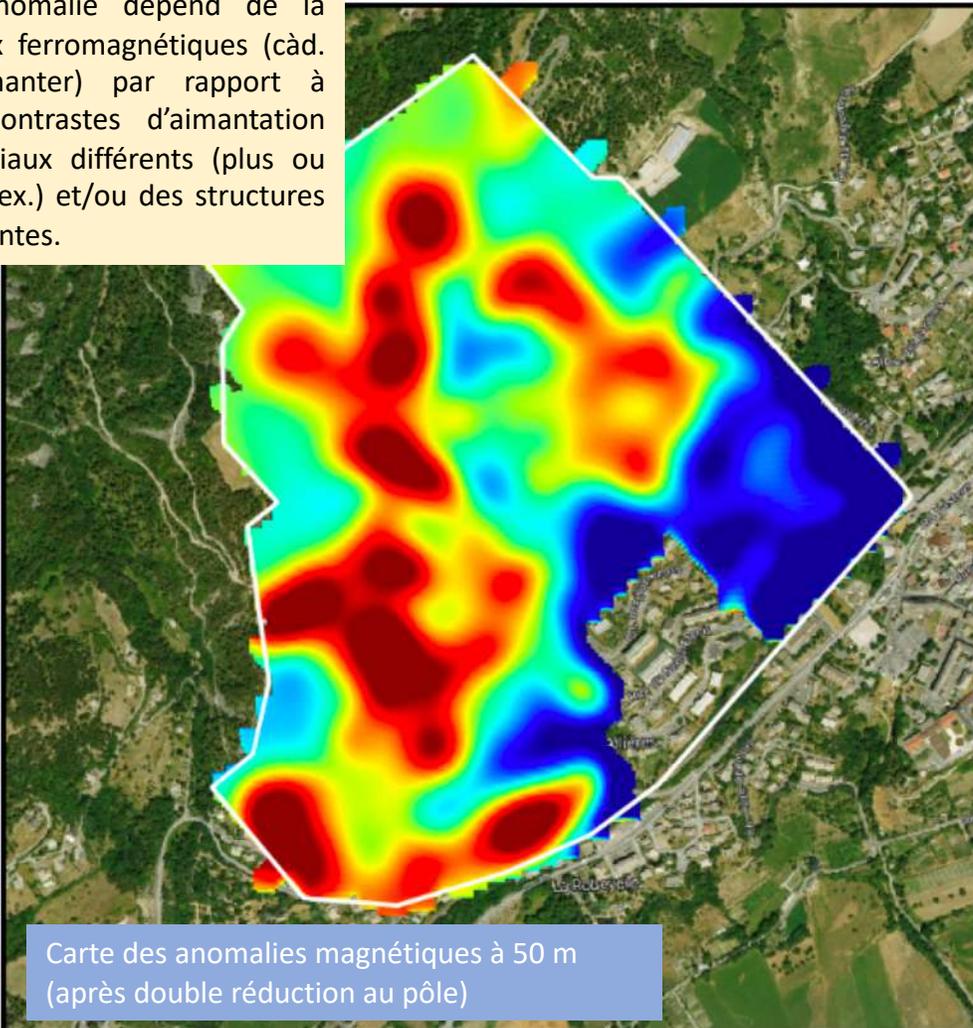
Dispositif d'acquisition aéroporté



# Les études en cours : proposer un modèle numérique des écoulements

Etape 2 : acquérir des données complémentaires (diagraphies de forage, géophysique aéroportée et in-situ)

L'amplitude de l'anomalie dépend de la teneur en minéraux ferromagnétiques (càd. capables de s'aimanter) par rapport à l'encaissant. Les contrastes d'aimantation révèlent des matériaux différents (plus ou moins d'argiles par ex.) et/ou des structures géologiques marquantes.



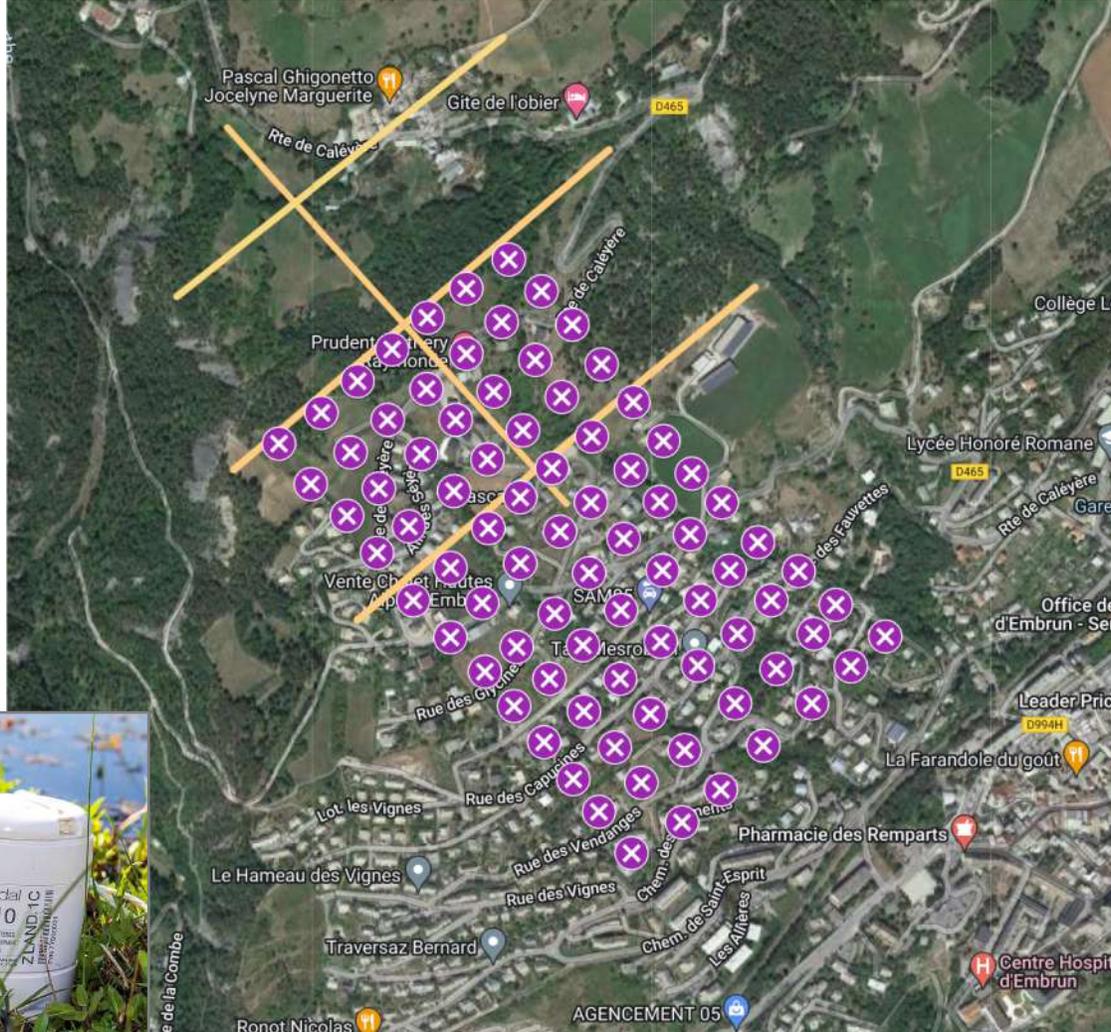
Principales structures orientées

- N025 et N115
- N050 et N140

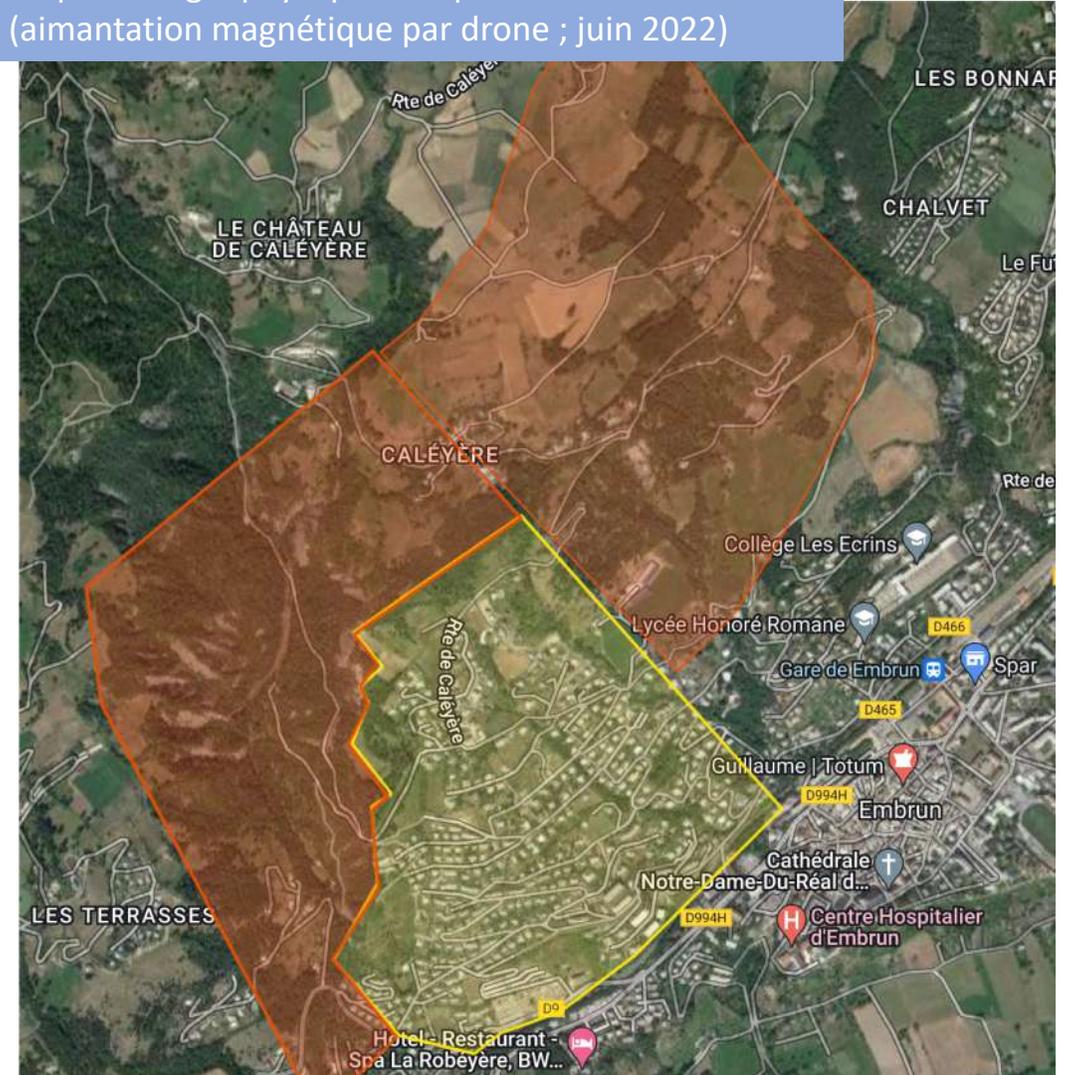


# Les études en cours : acquisition de données complémentaires

Acquisition géophysique in-situ  
(réseau dense de géophones, profils électriques long ; septembre 2022)



Acquisition géophysique aéroportée  
(aimantation magnétique par drone ; juin 2022)



# Conclusions préliminaires

- Forte variabilité des épaisseurs de matériaux mobilisés : de 8 à 20 m
- Forte variabilité locale du substratum (lentilles argileuses, points hauts/bas, ...) et plusieurs surfaces de ruptures
- Eaux souterraines : combinaison d'apports de surface (eau précipitée), d'écoulements souterrains « lointains », et d'eaux usées
- Gradient hydraulique très fort
- **En cours :**
  - Etudes géophysiques (diagraphies, réseau de surface, aéroportée) pour proposer un modèle géométrique 3D haute résolution
  - Protocole établi de mesures hydrodynamiques (forages témoins, sondes multi-paramètres)
- **Prochaines étapes :**
  - Diagraphies de forage (cette semaine + septembre 2022)
  - Complément à la géophysique aéroportée (juin 2022)
  - Complément en géophysique de surface (sismique, électrique ; septembre 2022)
  - Modélisation hydrogéologique des écoulements