



9 septembre 2024

Réunion Publique / La Belotte - Embrun

Simulation des conditions d'écoulement hydrogéologique du versant de la Belotte - Point d'avancement

Catherine Bertrand (CNRS/THETA) - Jean-Philippe Malet (CNRS/EOST)

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

- **Analyse des conditions d'écoulement des eaux (origine, circulation, stockage)**

- Acquisition et interprétation de données hydrochimiques sur le versant
- Mesures manuelles et mesures multi-paramètres automatiques en continu (depuis février 2022) en puits piézométriques
- Prélèvements et analyse d'eau dans la zone de travaux à Caleyère
- Modèle conceptuel d'écoulement

- **Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique 3D des écoulements**

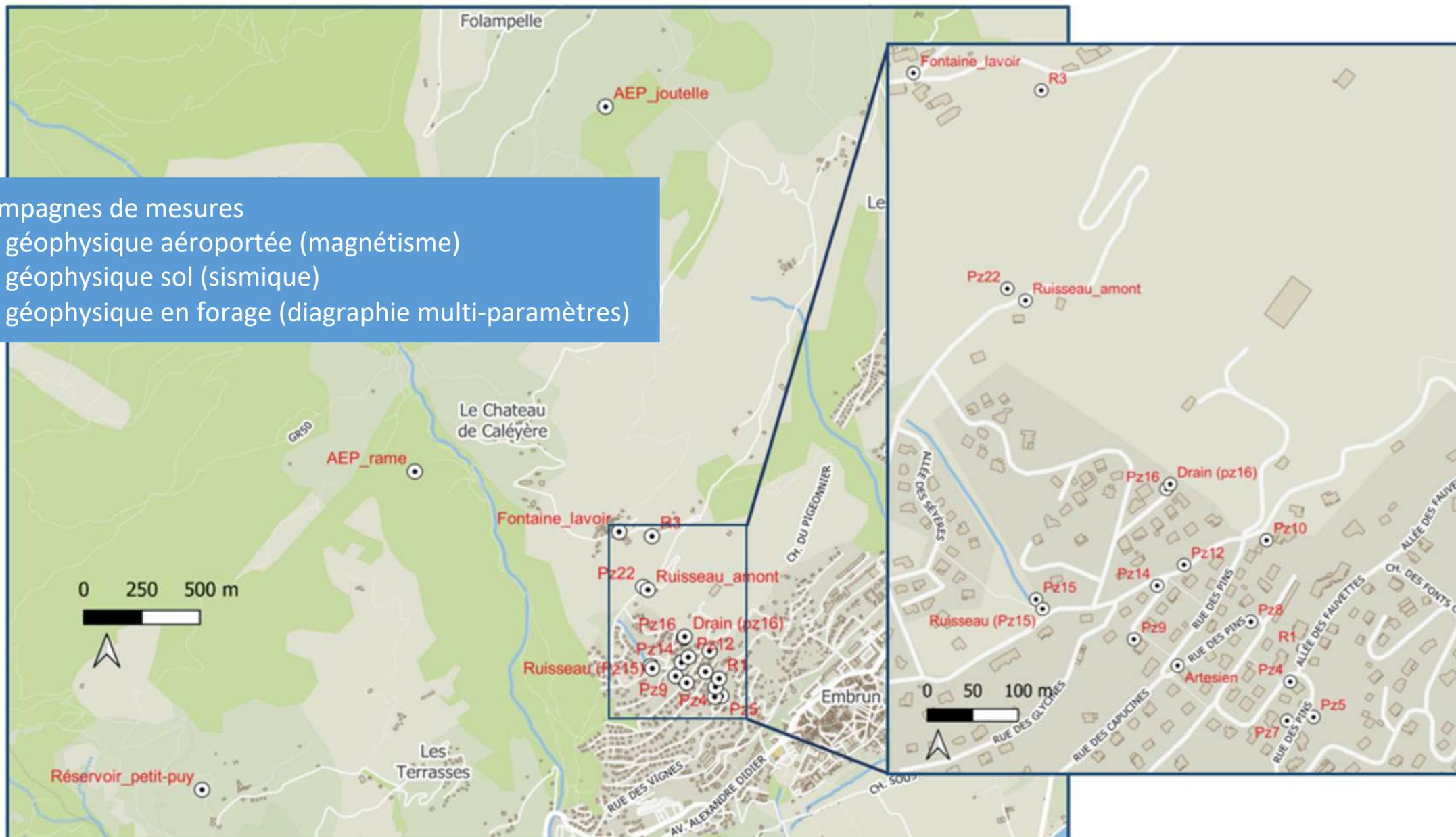
- Elaboration d'un modèle géométrique 3D (profondeur du rocher « sain », présence de discontinuités, etc) comme contrainte géométrique (intégration de données multi-sources : forages, diagraphies, données géophysiques aéroportées -magnétisme- et sol -sismique passive-)
- Modèle numérique calibré sur les observations actuelles
 - nécessité de chroniques sur des cycles hydrologiques pluri-annuels
 - nécessité de plusieurs points d'observation en forage
- Réaliser des simulations (situation anté-travaux, post-travaux, etc)

- Opérations réalisées dans le cadre de missions mandatées par la Commune d'Embrun et l'Etat (DDT05, ONF-RTM05)
- Plusieurs phases d'acquisition de données et d'interprétation depuis 2022

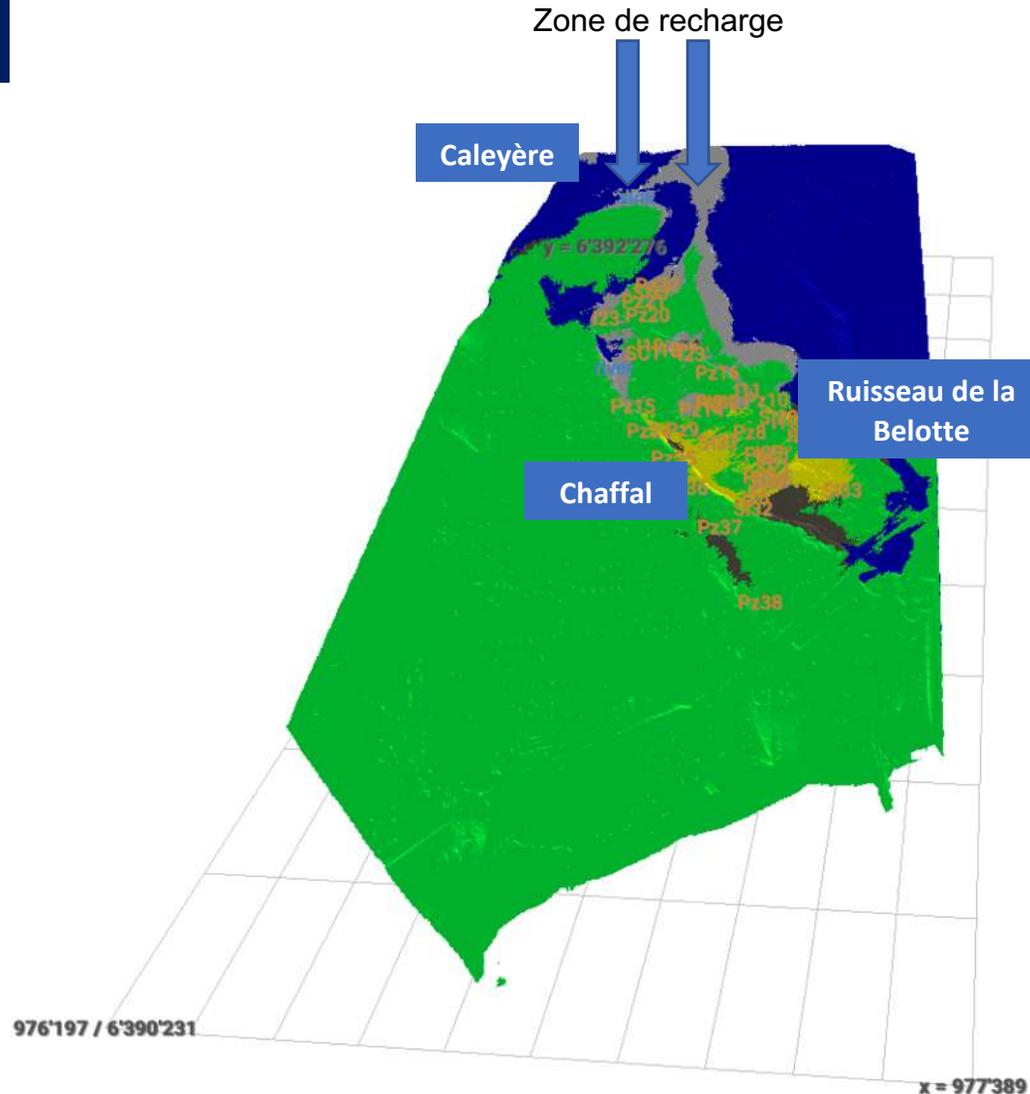
Points d'observations / mesures : chimie, géophysique

Et campagnes de mesures

- géophysique aéroportée (magnétisme)
- géophysique sol (sismique)
- géophysique en forage (diagraphie multi-paramètres)



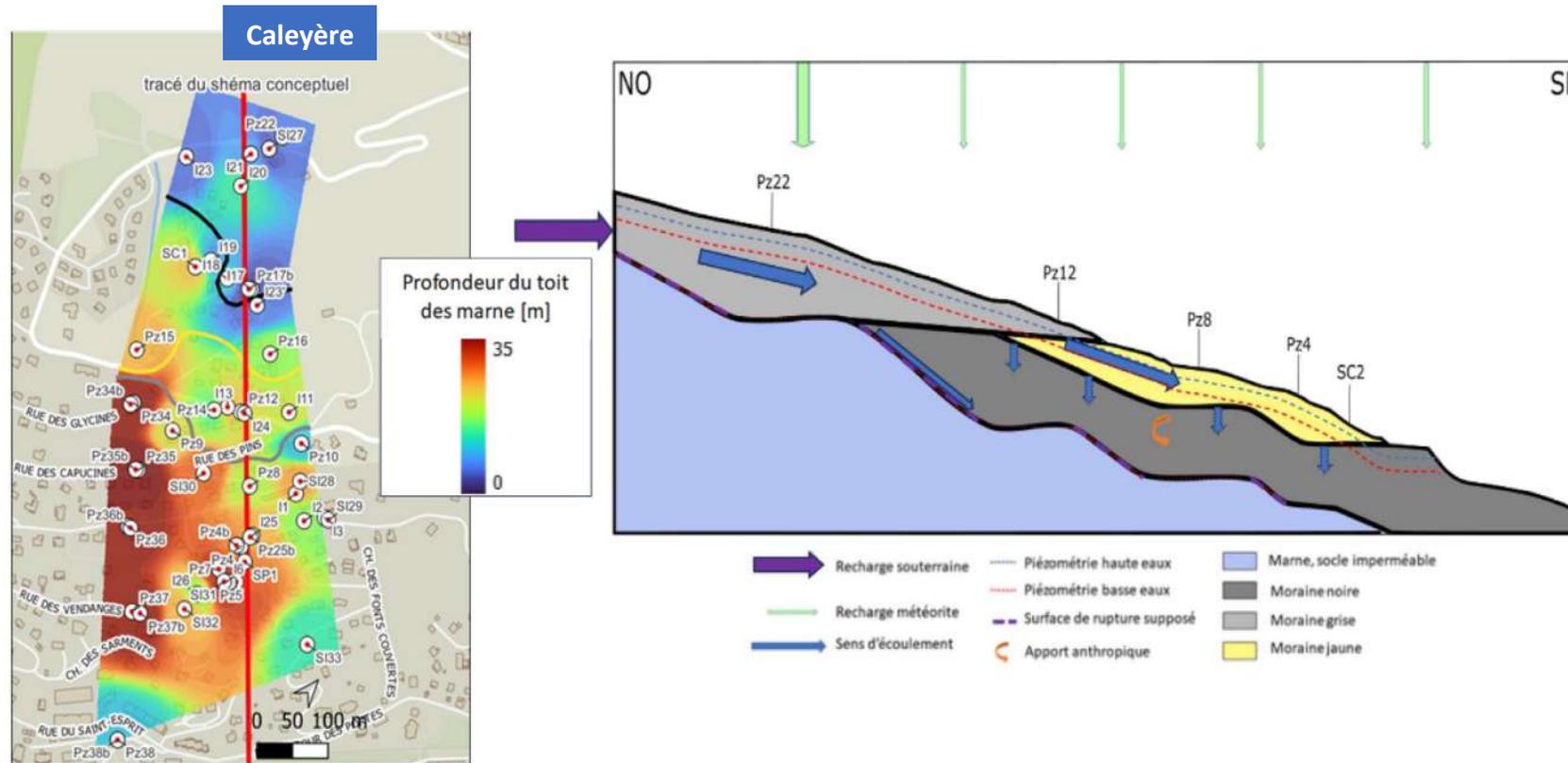
Modèle géologique 3D pour les simulations hydrogéologiques



- L'aquifère principal du secteur est supporté par les moraines grises (à l'amont) et les moraines jaunes (à l'aval).
- L'alimentation de la nappe d'eau provient d'une combinaison d'eaux de pluie, d'eaux de surface et d'eaux souterraines (alimentations profondes) en particulier au-dessus du lotissement « Grand Horizon 4 ».
- Ces eaux souterraines s'infiltrent également, et dans une moindre mesure, au niveau du contact des « Terres Noires » imperméables, mais surtout par les moraines grises latérales semi-perméables

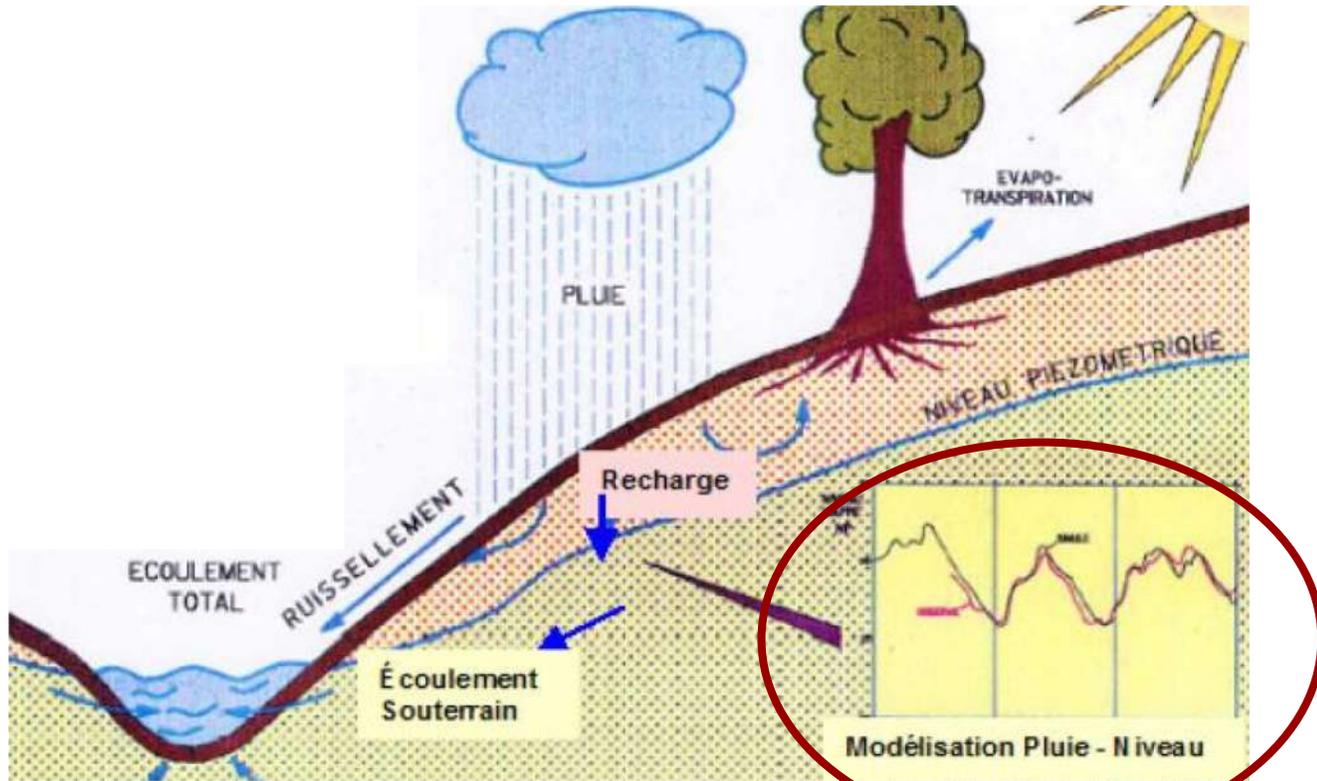
Eaux de pluie : pluies efficaces (précipitation - évaporation)
Eaux de surface : ruisseaux, drains
Eaux souterraines : eaux sous la surface du sol, sources

Modèle géologique 3D pour les simulations hydrogéologiques



- Le contact entre les « Terres Noires » et les moraines noires agit comme un drain préférentiel d'écoulement (surface de rupture du glissement d'après les observations réalisées dans les inclinomètres)
- Les eaux souterraines circulent préférentiellement dans les moraines jaunes quelle que soit la saison hydrologique (basses eaux-hautes eaux). Une alimentation verticale des moraines noires par la nappe des moraines jaunes est probable.
- Les alimentations par les eaux de surface s'effectuent localement aux abords des ruisseaux qui bordent le versant instable.

Principe de la modélisation hydrogéologique



Simuler les flux et stocks d'eau dans les divers compartiments hydrogéologiques du versant en lien avec les apports d'eau (précipitations, eaux souterraines)

Caler/valider les simulations sur les observations en forage

Tester des hypothèses de bilan / flux d'eau et les impacts des travaux

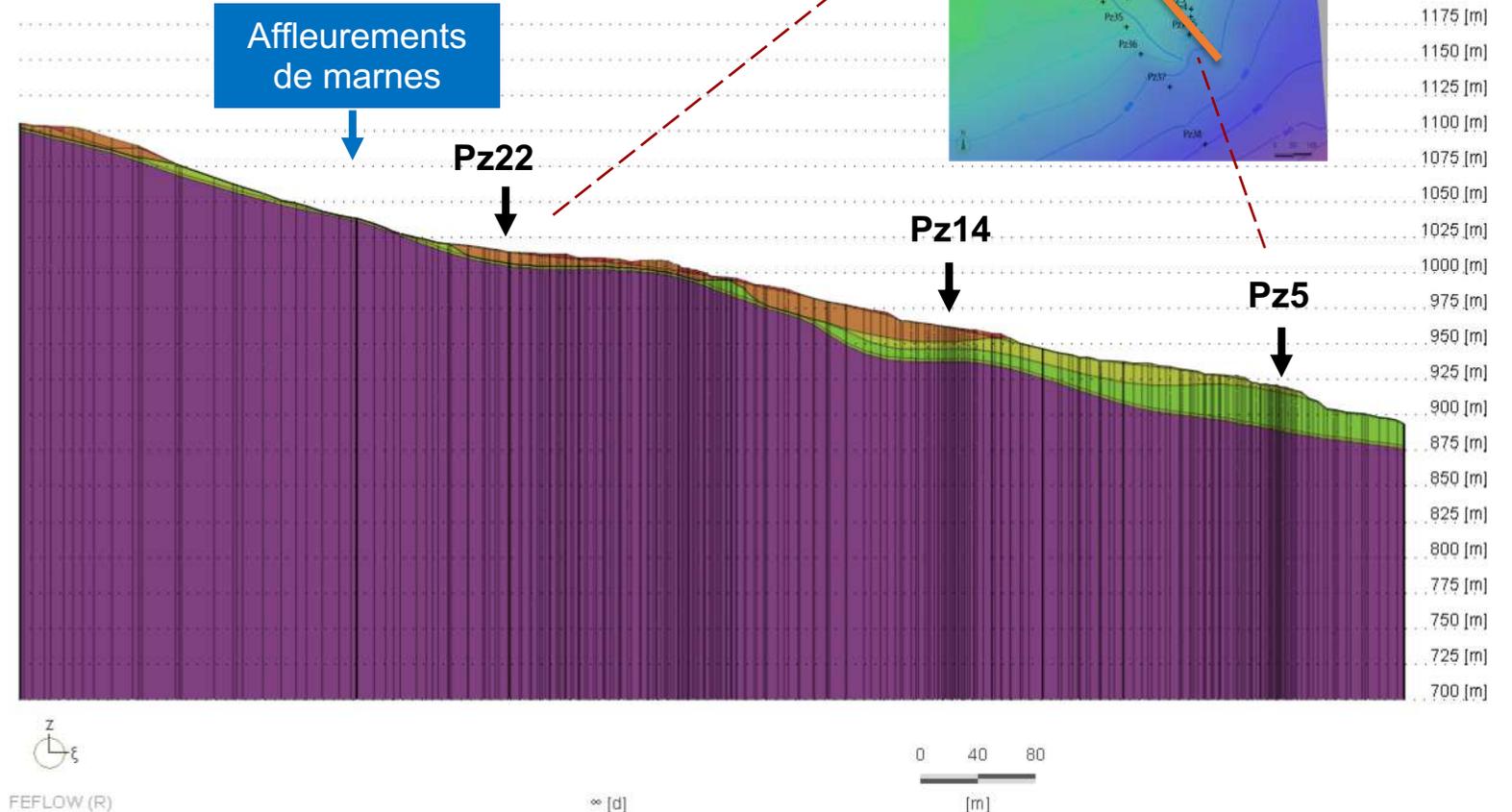
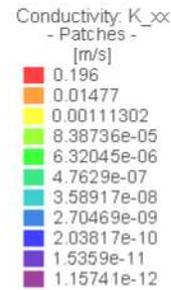
Paramétrisation du modèle : géométrie et propriétés (perméabilité)

La géométrie des réservoirs est définie par le modèle géologique auquel sont intégrés les formations sédimentaires (conglomérat du roc d'Embrun, alluvions ...) et les matériaux à l'interface Marnes/Moraines.

Soit, au total, 7 formations :

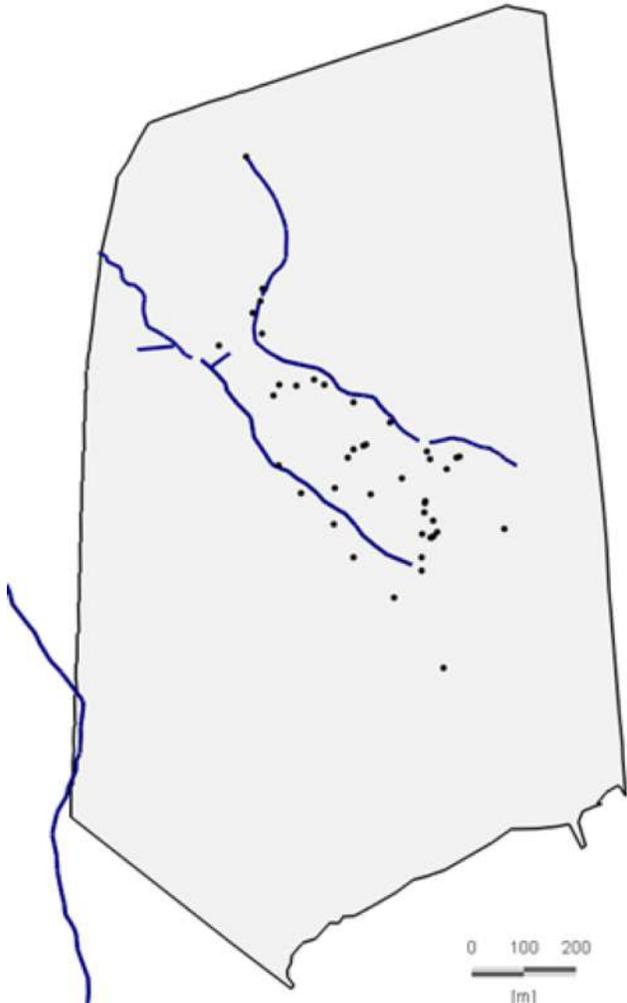
- Couvert végétal (sol)
- Moraines grise
- Moraines noire
- Moraines jaune
- Interface marnes/moraines
- Marnes (rocher sain)
- Conglomérat du roc d'Embrun

Les valeurs de conductivités hydrauliques pour chaque matériau sont estimées à partir de la littérature scientifique

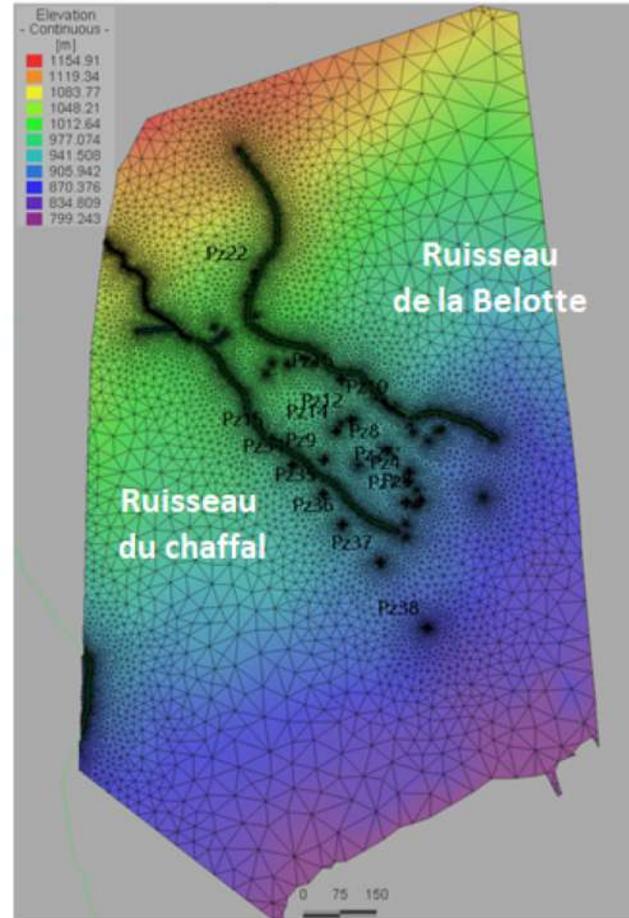


Paramétrisation du modèle : maillage numérique et conditions aux limites

Emprise du modèle



Vue 2D du domaine maillé sur fond topographique



Topographie du modèle fondé sur un modèle topographique LiDAR aéroporté à 1m de résolution spatiale

Aquifère discrétisé en 7 réservoirs (une pour chaque formation)
1 602 192 mailles (éléments tétraédriques)

Nappe de type libre (phréatique), sans contraintes piézométriques par le sommet ou la base
Prise en compte de l'anisotropie d'origine topographique

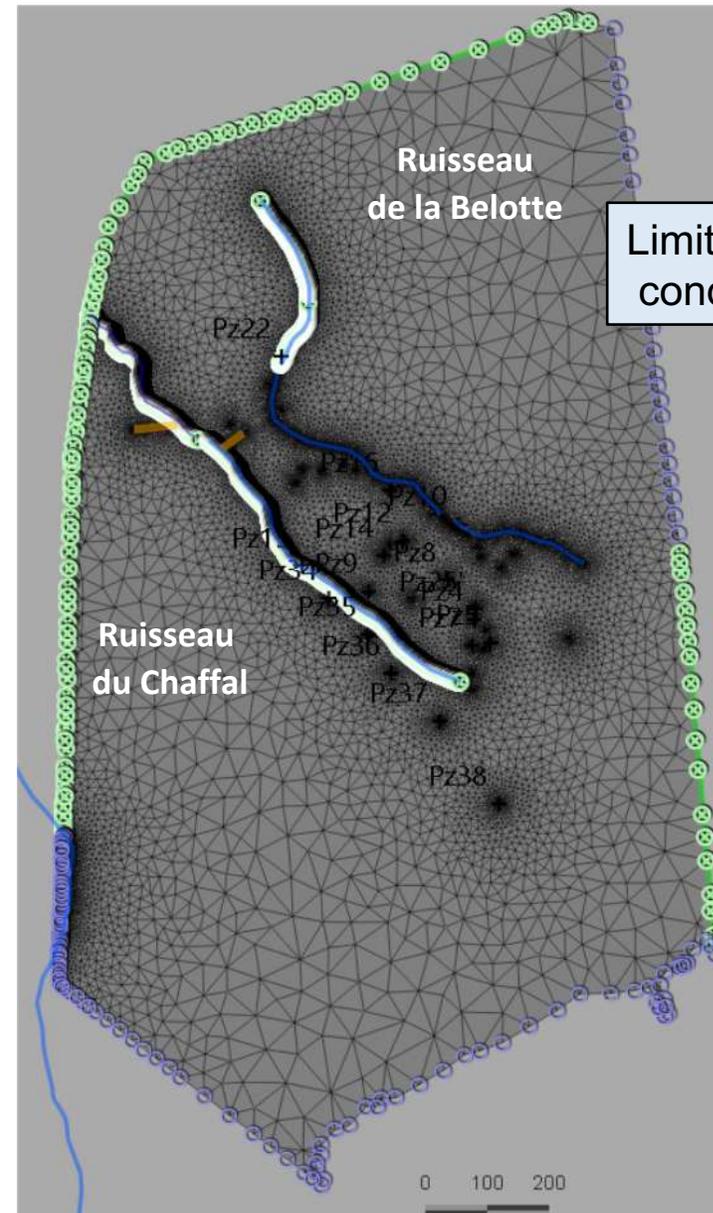
Simulation en conditions saturées (écoulements de Darcy)
Simulation en régime permanent

Paramétrisation du modèle : maillage numérique et conditions aux limites

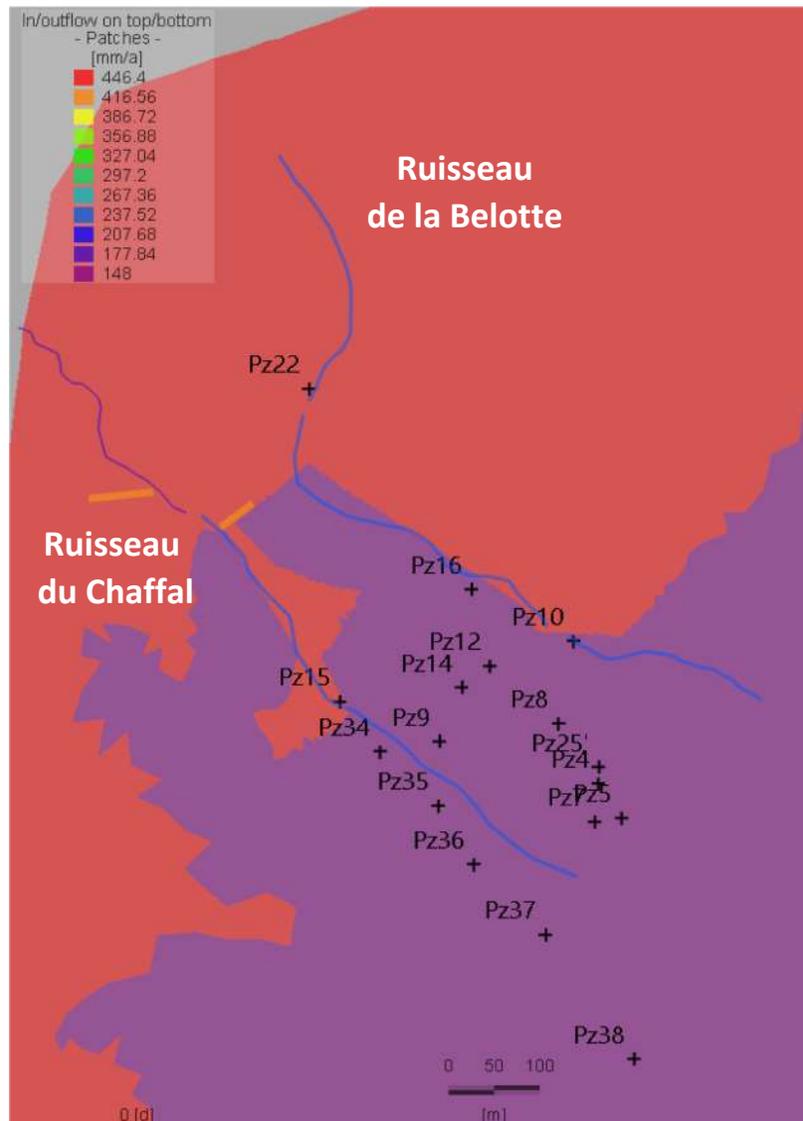
Conditions aux limites du modèle :

- En bleu : limite qui autorise les flux variables pour maintenir les hauteur d'eau fixes
- En vert : limite qui autorise des flux qui sont contrôlés par les taux de transferts en entrée et en sortie du système

Limites Nord-Ouest et Sud-Est :
conditions mixtes à hauteur imposée et flux libre pour
représenter les ruisseaux du Chaffal et de La Belotte
amont



Paramétrisation du modèle : les apports d'eau de pluie



Précipitations : pluie efficace calculée à partir des données météorologiques > 2021

Evapotranspiration (calculée d'après la méthode de Oudin, 2005)

Coefficient de ruissellement

- 0,1 sur les terrains peu artificialisés (en rouge)
- 0,3 sur les terrains artificialisés (en violet)

Volume d'eau précipité qui alimente la nappe (= recharge):
761 m³/jour (valeur moyennée sur l'année)

Calibration du modèle hydrogéologique - régime permanent -

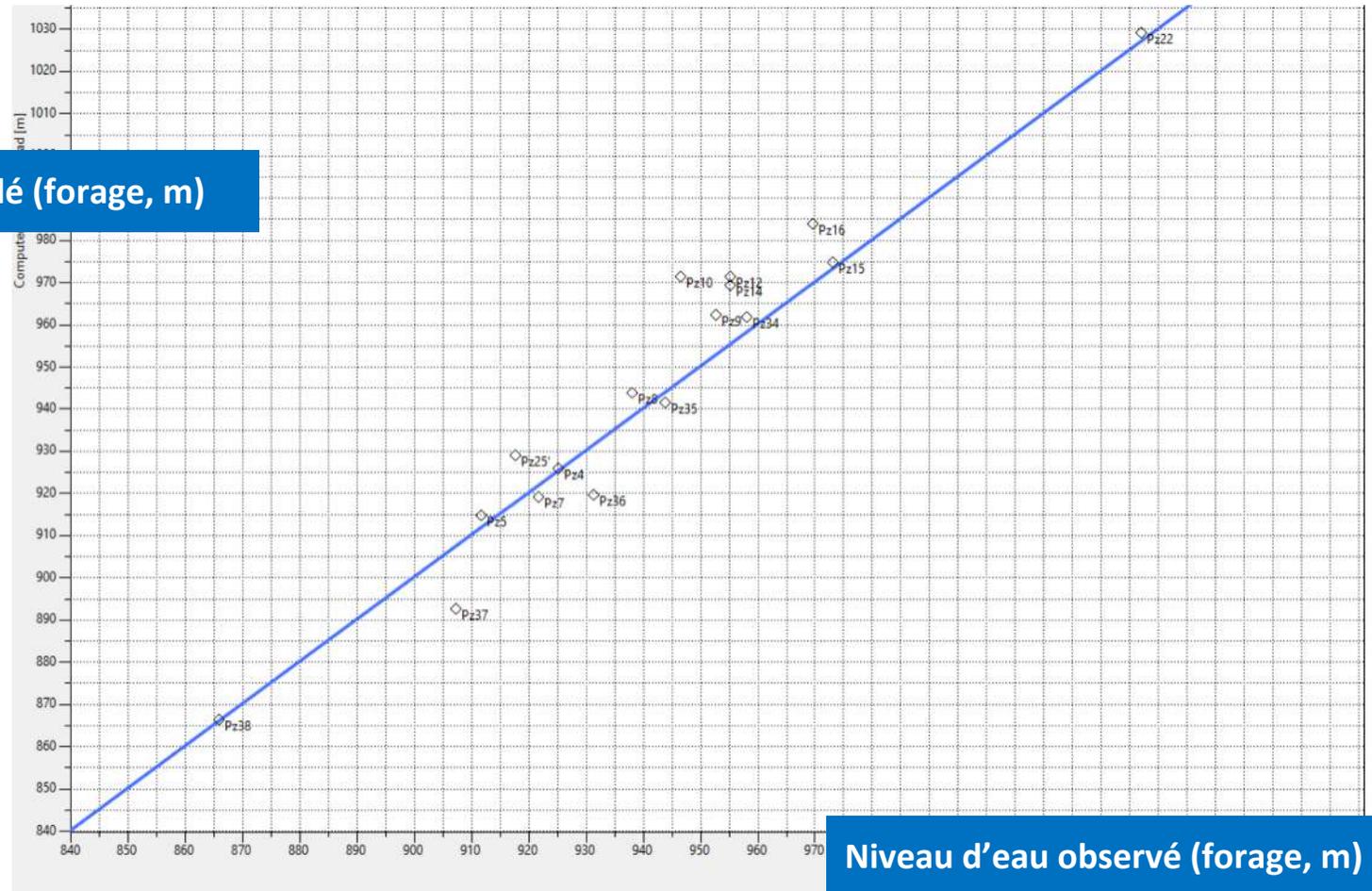
Calibration du modèle (approche semi-automatique / logiciel PEST)

24 paramètres dans la calibration :

- 18 paramètres de conductivités hydrauliques (K) : 1 par formation dans les 3 composantes de l'espace.
- 6 paramètres de transfert : limites Nord (entrée) et Sud (sortie) ainsi que les transferts (entrée/sortie) au niveau du ruisseau du Chaffal et de La Belotte (secteur amont)

17 points d'observation (forages) pris en compte.

Niveau d'eau simulé (forage, m)

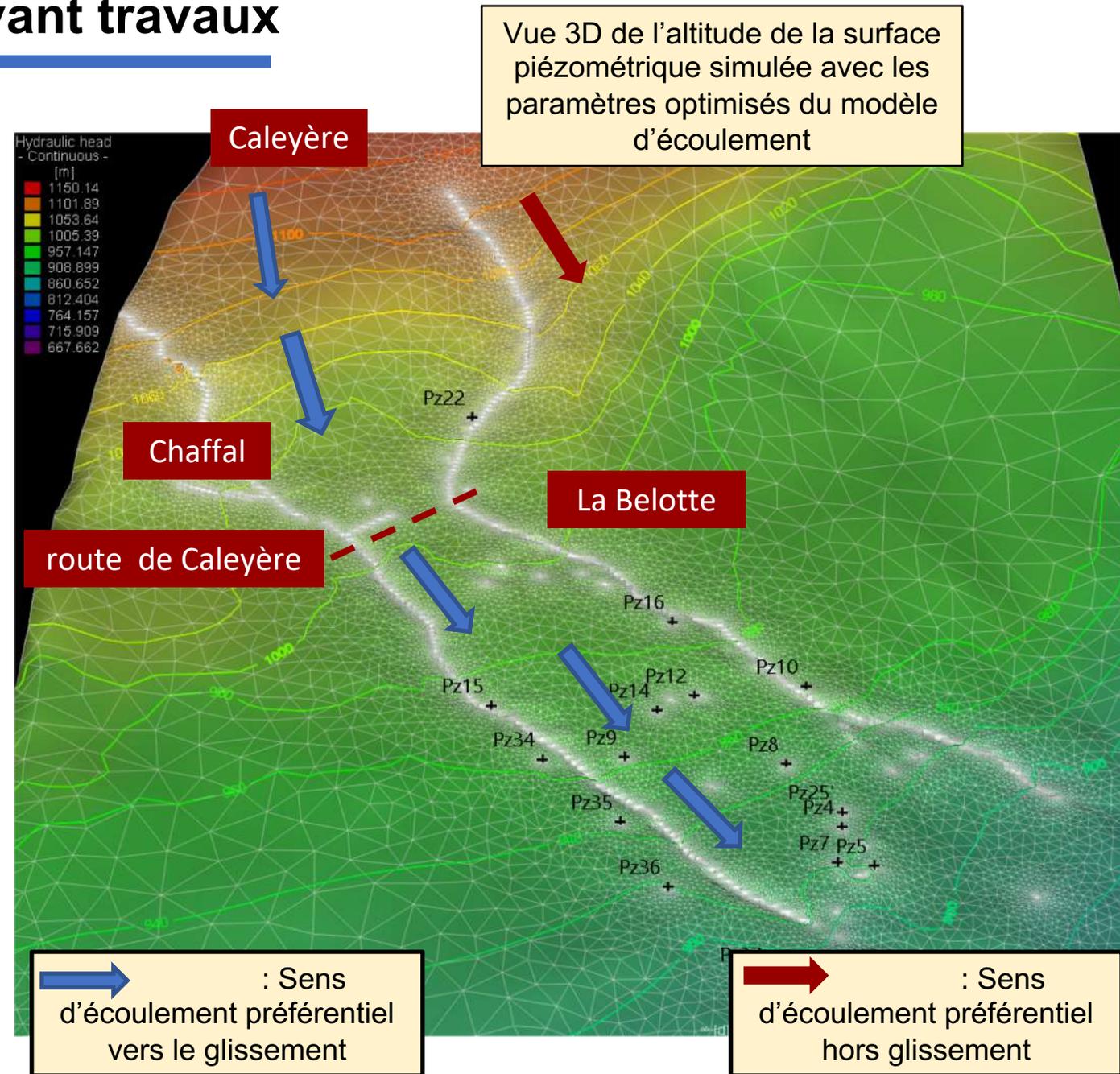


Niveau d'eau observé (forage, m)

Carte piézométrique simulée : avant travaux

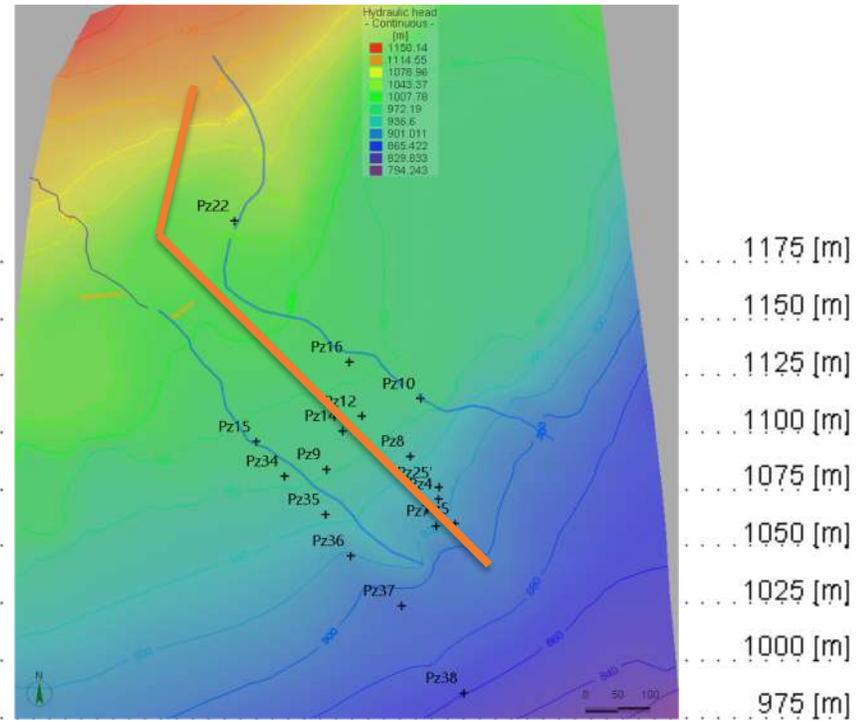
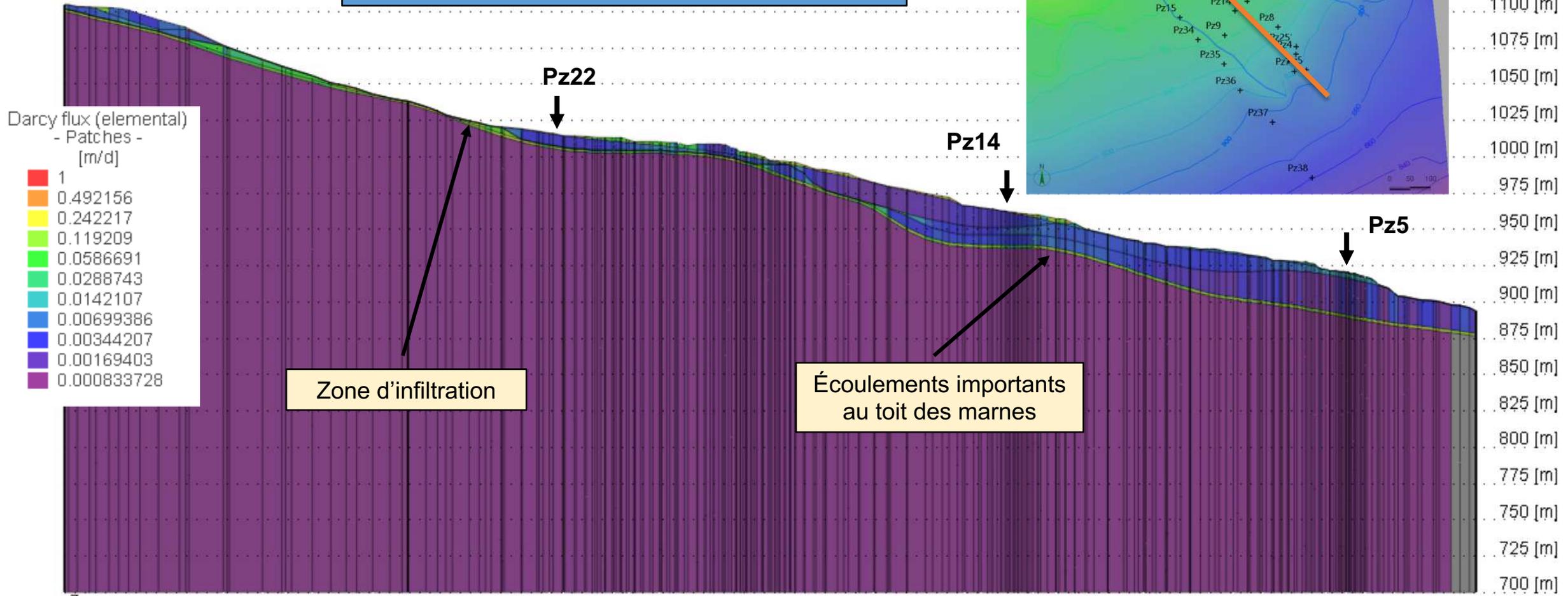
Écoulements souterrains provenant des hauts de Caleyère :

- une partie s'écoule en dehors du glissement
- une partie s'écoule dans le glissement



Carte piézométrique simulée : avant travaux

Vue en coupe des flux d'écoulement (Darcy) sur la ligne d'écoulement L5 (m/jour)



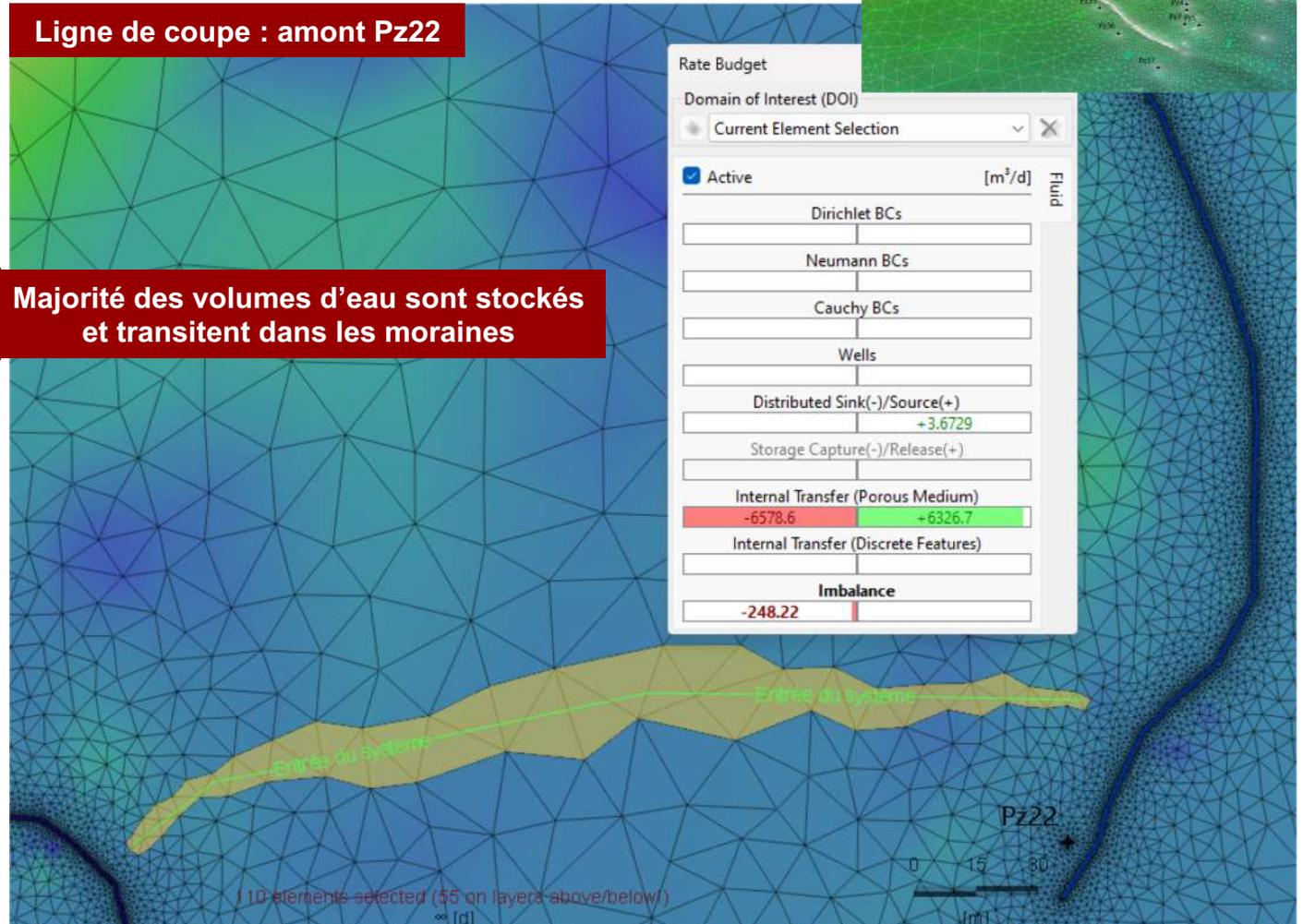
Carte piézométrique simulée : volume d'eau par réservoir

Estimation des volumes d'eau entrant dans le système sur un profil transverse dans la zone d'infiltration

Formation	Volume total [m3]	volume vide[m3]	volume fluide[m3]	Saturation [%]
Moraine Grise	1,27E+06	2,54E+05	6,83E+04	26,90%
Moraine Noire	5,90E+06	5,90E+05	5,88E+05	99,70%
Moraine Jaune	7,79E+05	1,17E+05	1,16E+05	99,20%
Interface Marne/Moraines	3,21E+06	6,42E+05	6,42E+05	100,00%
Conglomérat du Roc d'Embrun	1,17E+07	1,76E+06	1,14E+06	65,00%
Marnes	2,16E+08			

Ligne de coupe : amont Pz22

Majorité des volumes d'eau sont stockés et transitent dans les moraines



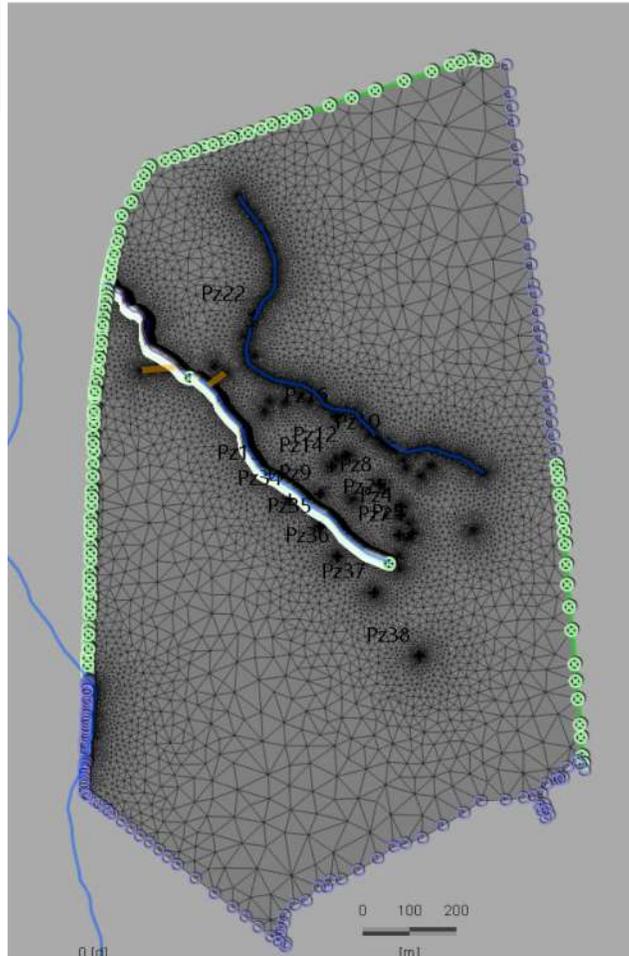
Répartition des apports d'eau à l'amont de Pz22 :

- Précipitations : 12% du total
- Eaux souterraines : 88% du total

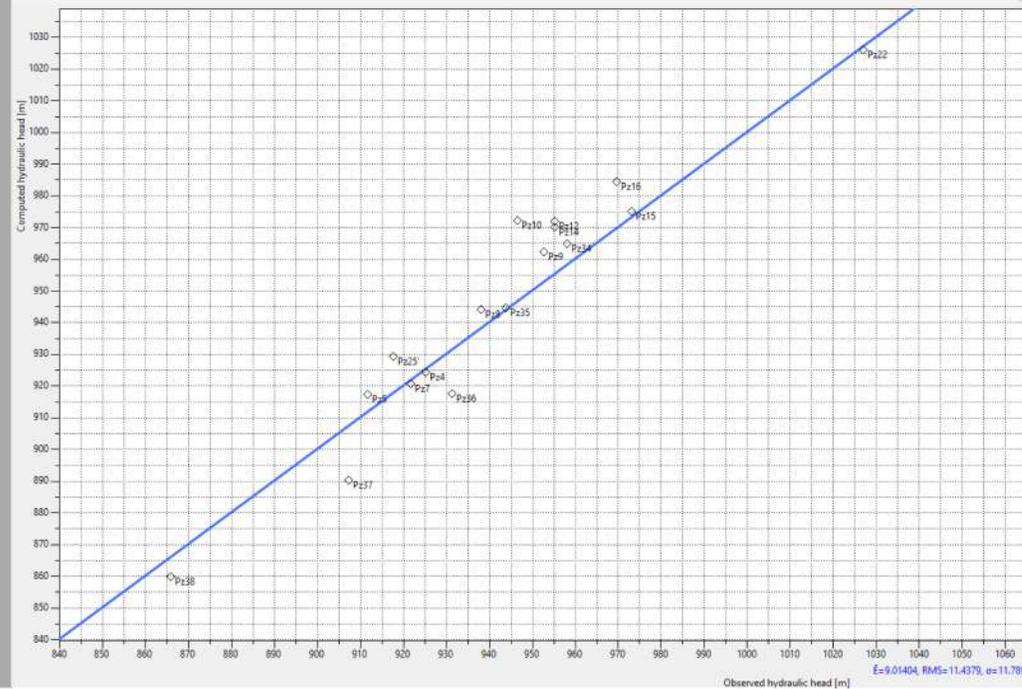
Volume en transit :

- Eaux de pluies : ca. 761 m³
- Eaux souterraines : ca. 6300 m³

Carte piézométrique simulée : après travaux



Imperméabilisation du ruisseau de La Belotte : arrêt des transferts d'eaux de la Belotte vers la nappe



Ouvrages	Piezo avant travaux (m)	Piezo après travaux (m)	Variation (m)
PZ37	892,5	891	-1,5
PZ5	915	917	2
PZ25'	929	929,5	0,5
PZ17	919	921	2
PZ4	926	924	-2
PZ34	919	918	-1
PZ8	944	944	0
PZ35	941	944,5	3,5
PZ9	962,5	962,5	0
PZ34	962	964	2
PZ10	971	973	2
PZ12	971	971	0
PZ14	969	969,5	0,5
PZ15	975	975	0
PZ16	984	984,5	0,5
PZ22	1028	1026	-2

Effet des travaux de drainage de la Belotte:

- baisse conséquente de la piézométrie en Pz22
- à l'heure actuelle, plus à l'aval, peu d'effets dans le reste du glissement aux vues des volumes d'eaux souterraines entrant en amont de Caleyère et du fait que le système met du temps à se rééquilibrer (champs de perméabilité variable)

Conclusions

- Etablissement d'un modèle hydrogéologique fin calé sur des niveaux piézométriques observés
- Valeurs de perméabilités optimisées proches des valeurs connues du milieu naturel
- Quantification des flux entrants dans le système à l'amont du Pz22 :
 - 1/10eme (12%) des eaux souterraines au niveau de Caleyère proviennent des pluies efficaces
 - 9/10eme (88%) proviennent d'eau souterraines en amont de Caleyère
- Mise en évidence de variations de flux :
 - Variations importantes en sub-surface jusqu'au premier talus (SC1)
 - Variations faibles des flux jusqu'au Pz15
 - Écoulements souterrains concentrés au toit des marnes noires

Effets des travaux de drainage :

- Effet de l'imperméabilisation de La Belotte (secteur amont) est visible sur les niveaux d'eaux à l'amont du glissement ; vérifier si effets dans le glissement (ré-équilibre des masses d'eaux prend du temps)

Perspectives :

- Prise en compte du système de drainage souterrain dans le modèle : nécessité d'avoir des données complémentaires