

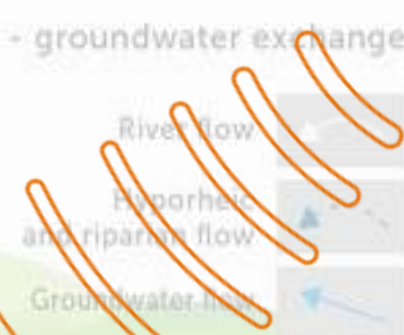


**ITASCA**<sup>TM</sup>  
Consultants, s.a.s.

UNIVERSITÉ DE  
**RENNES 1**



*Unil*  
UNIL | Université de Lausanne



## Quels types de fractures sont imagées par la méthode de surface « Ground Penetrating Radar »? Résultats d'expériences réalisées dans le laboratoire souterrain d'Äspö (Suède)

**Justine Molron**<sup>1,4</sup>, Niklas Linde<sup>2</sup>, Ludovic Baron<sup>2</sup>, Jan-Olof Selroos<sup>3</sup>, Caroline Darcel<sup>1</sup> et Philippe Davy<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Itasca Consultants SAS, Ecully, France ([j.molron@itasca.fr](mailto:j.molron@itasca.fr)); <sup>2</sup> Université de Lausanne, UNIL, Lausanne, Switzerland; <sup>3</sup> Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, Solna, Sweden; <sup>4</sup> Géosciences Rennes, OSUR, CNRS, Université de Rennes 1, Rennes, France



**CFMR**  
COMITÉ FRANÇAIS  
DE MÉCANIQUE  
DES ROCHES

Journée technique : Fracturation et  
caractérisation des massifs

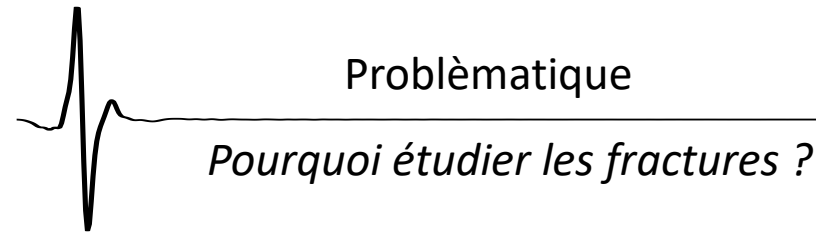
Paris, le 14 Novembre 2019



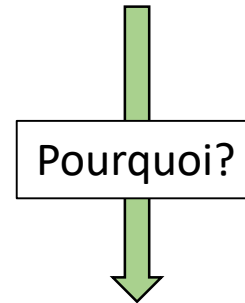
ITN Enigma



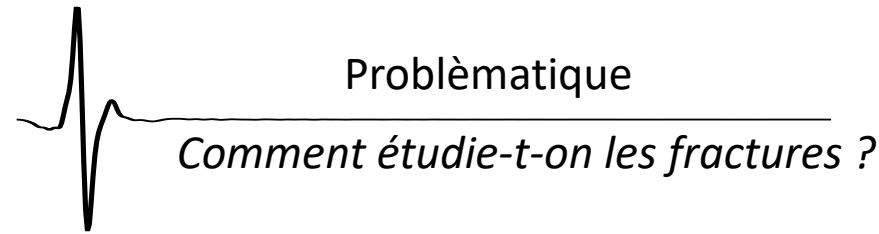
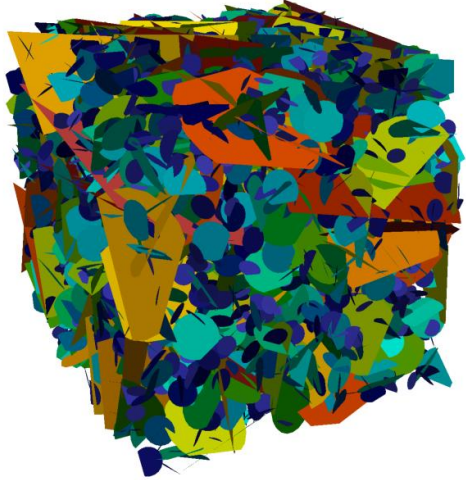
This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie Grant Agreement No 722028



Les applications hydrogéologiques et géomécaniques nécessitent une bonne caractérisation des réseaux de fractures et de leurs propriétés hydrogéologiques et mécaniques



- Les fractures sont les principaux conduits pour l'eau souterraine et présentent un risque potentiel pour le transport de contaminant
- Les fractures jouent un rôle important dans les propriétés de mécanique des roches

*Discrete Fracture Network (DFN) model*

**DFN construits sur la statistique des fractures + données d'observation:**

**Forages**

- 1D
- Données en profondeur

**Affleurements**

- 2D
- Données de surface

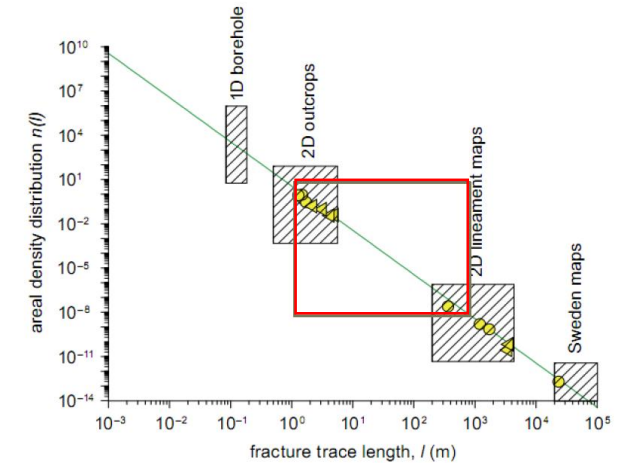
**Tunnels**

- 2D
- Données en profondeur

**GPR\***

- 3D
- Données en profondeur

\* Ground Penetrating Radar



**Ma thèse** Darcel et al. (2004)

**Inconvénients:**

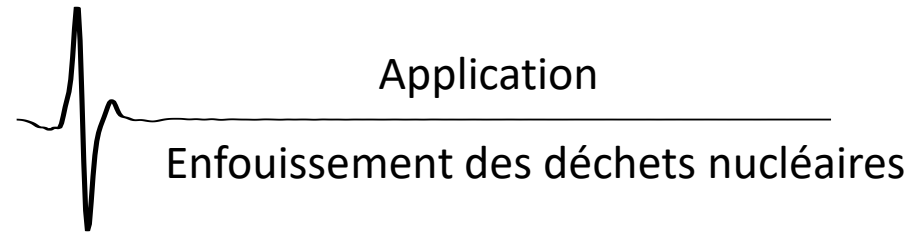
- Modèles 3D ne s'appuyent pas sur des observations 3D
- ⇒ Suppositions sur les propriétés de fractures (ex: forme)
- Taille limitée des affleurements
- Modèles mieux contraints par les observations que par la statistique

**Avantages:**

- Méthode non-invasive et de surface
- Etude des fractures à différentes échelles
- Résolution suffisante pour imager des fractures d'ouverture < mm



Développer une méthodologie pour conditionner les modèles DFN aux données GPR aux échelles du mètre à une dizaine de mètres



Détection des fuites potentielles autour des barils de déchets sur une échelle d'une dizaine de mètres

⇒ Essentiel pour déterminer si la roche peut stocker des barils de déchets toxiques (cas du stockage en profondeur)



Cas de la Suède

A thick green arrow points downwards from the text 'Cas de la Suède', which is enclosed in a rectangular box.

Roches cibles : formations très peu perméables, dont les infiltrations sont dues à des fractures < mm





## Application

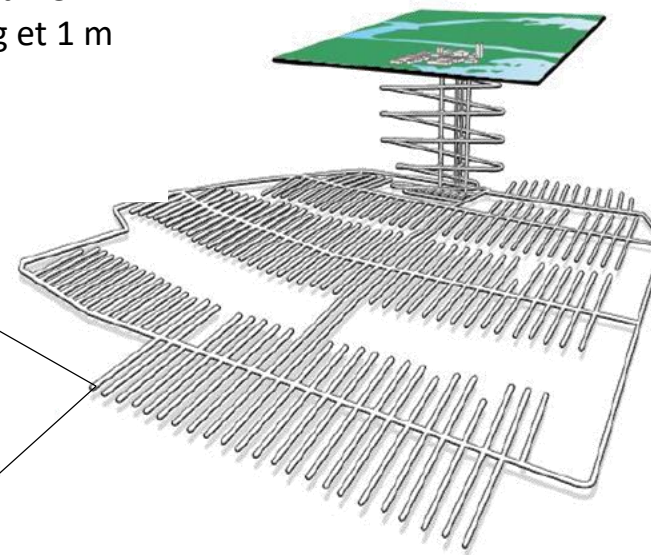
*The Äspö Hard Rock Laboratory, Suède*

Laboratoire souterrain de 500 m de profondeur situé sur l'île d'Äspö (Suède). Les expériences sont menées en profondeur dans le but de développer de nouvelles méthodes et technologies pour la construction d'un site de stockage de déchets radioactifs.



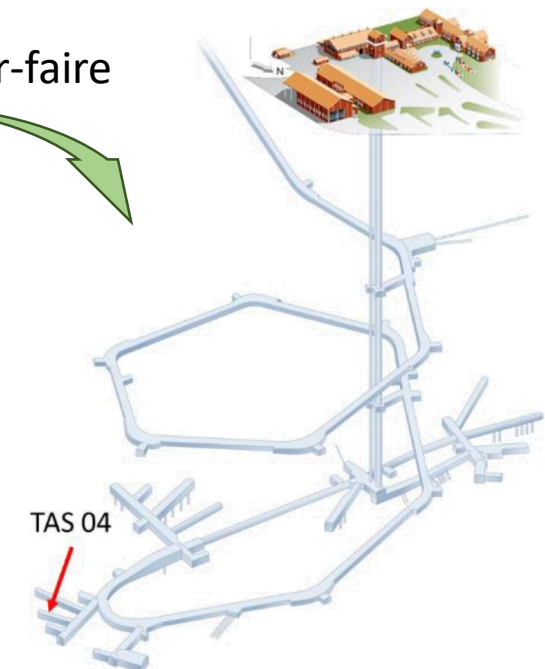
## Chiffres clés:

- 6000 canisters
- Dimension des trous : 8.5 m de profondeur et 1.8 m de diamètre (pour un canister de 5 m de long et 1 m de diamètre)
- 34 km<sup>2</sup> de tunnels
- Etape d'enfouissement pendant 45 ans



Prototype suédois d'un site d'enfouissement

## Besoins en savoir-faire





Visite guidée du  
laboratoire  
souterrain d'Äspö

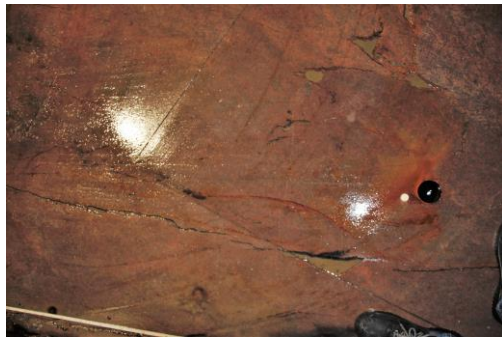
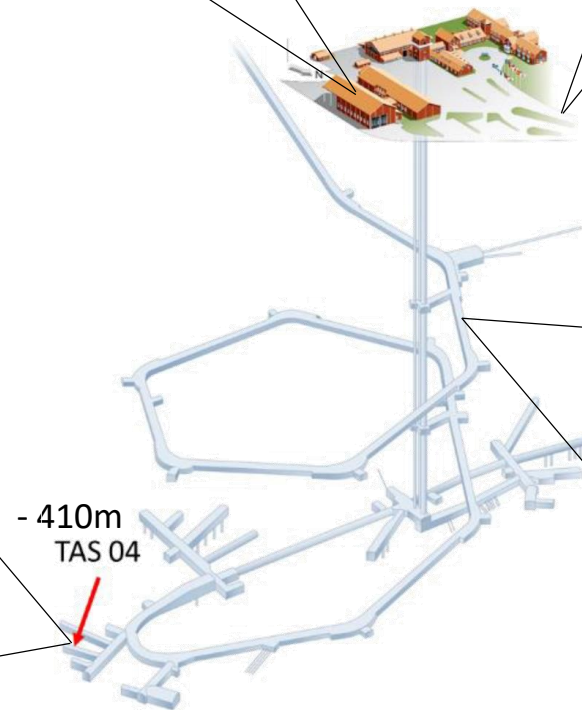


Fig. 10. Test site at Äspö HRL after diamond wire cutting  
(Photo: Rickard Enér)





## Objectifs

*Le GPR est-il une bonne méthode  
d'imagerie de fractures?*

- Les réflexions GPR correspondent-elles aux fractures ouvertes et transmissives ou à d'autres discontinuités géologiques ?
  - ✓ Expérience GPR à 410 m de profondeur
  - ✓ « Picking » des réflexions radar
  - ✓ Vérification de l'origine de ces réflexions par l'analyse de 3 forages et test hydrauliques
- Quelle est la résolution du GPR en terme de taille et orientation de fractures ?
  - ✓ Comparaison de la statistique de fractures GPR avec la statistique 3D obtenue via les observations d'affleurements et de forages



But: imager les fractures dans le sous-sol

- Quelle est la distribution 3D des fractures?
- Quels types de fractures donnent une réflexion GPR?



GPR de surface

Méthodologie

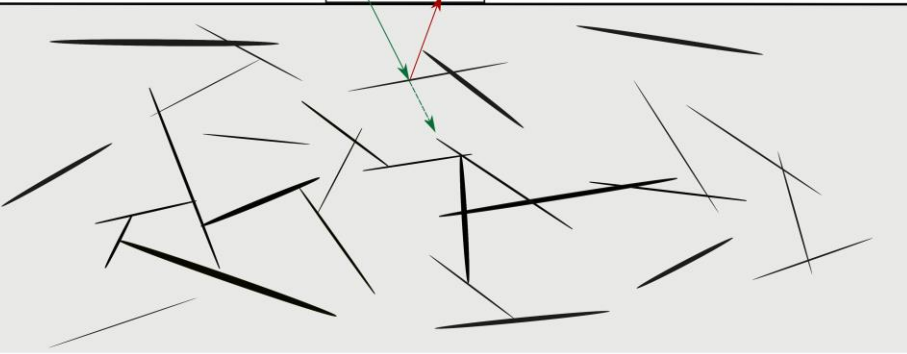
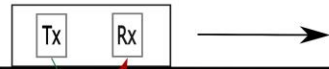
Fréquences:

160 MHz

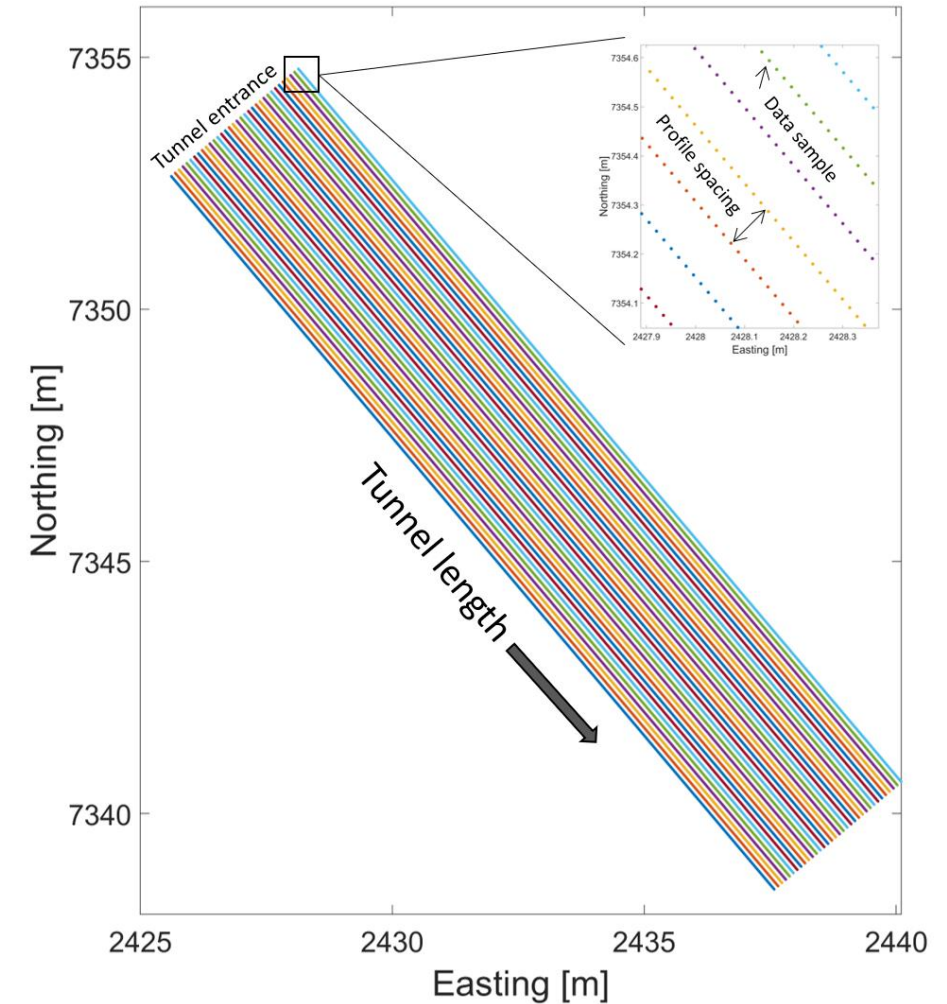
450 MHz

750 MHz

Espacement  
entre profils:  
0.10 & 0.05 m



→ Reflected wave  
→ Transmitted wave





### Profils GPR 2D après traitement et migration des données

Suppression DC, correction du temps zéro, suppression de la moyenne des traces, application du gain, filtre SVD, et migration de Kirchhoff (à vitesse constante).

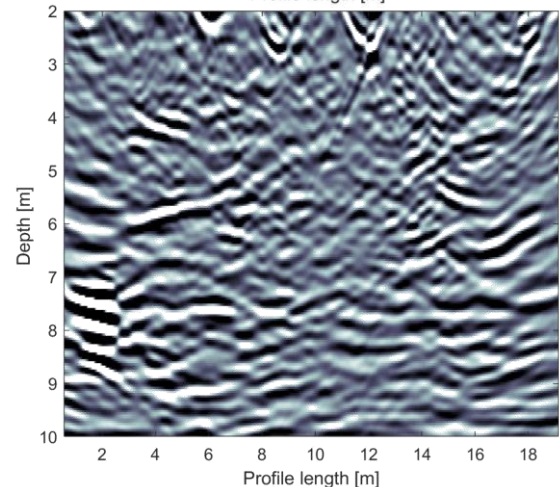
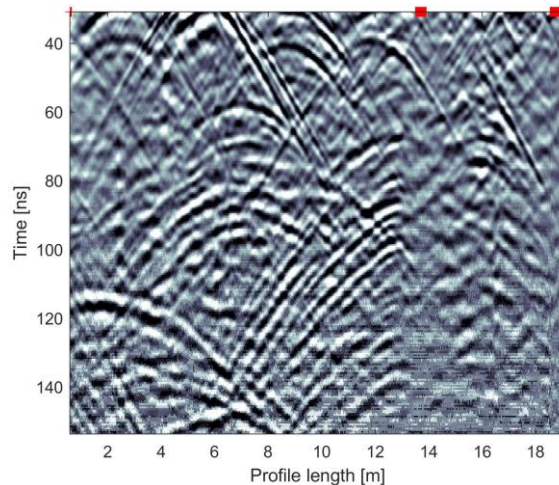


### GPR de surface

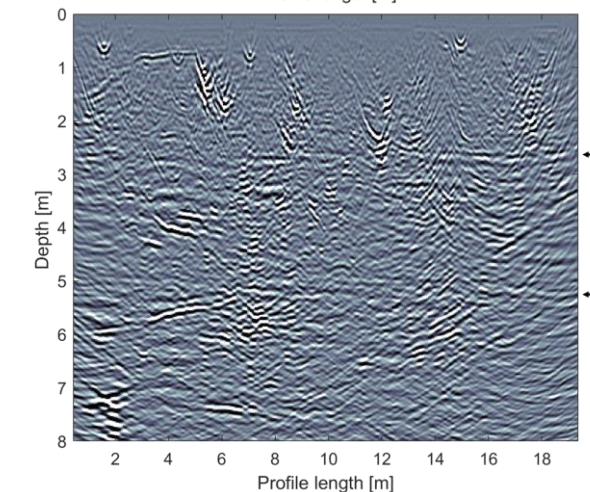
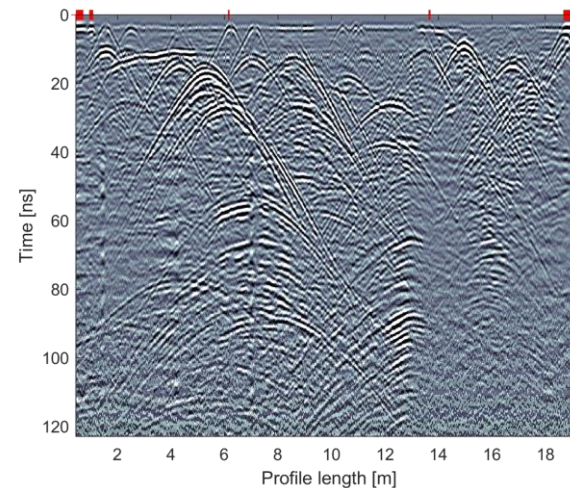
### Interprétation et Résultats

La résolution horizontale et verticale sont de 0.8 m et 0.2 m pour 160 MHz, 0.25 m et 0.06 m pour 450 MHz et 0.18 m et 0.04 m pour 750 MHz.

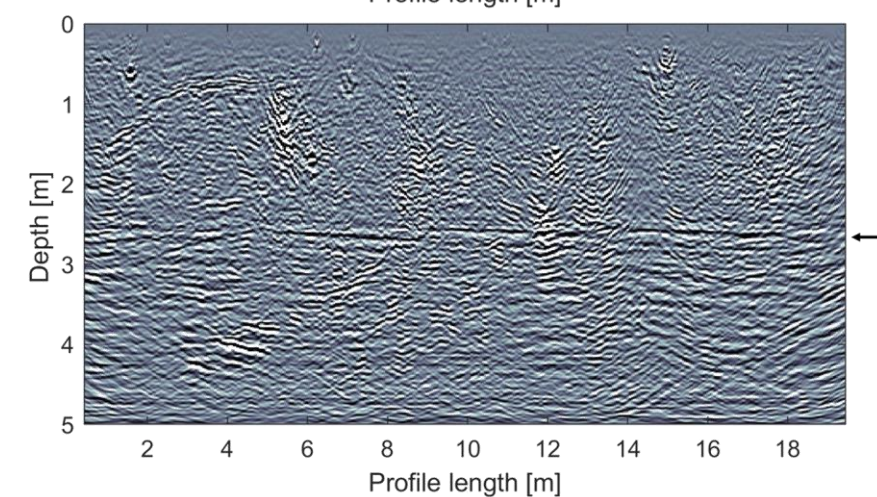
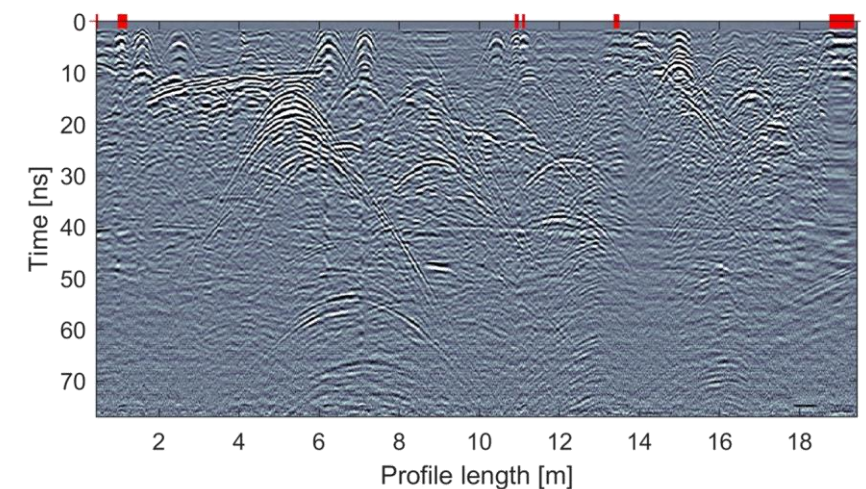
#### 160 MHz



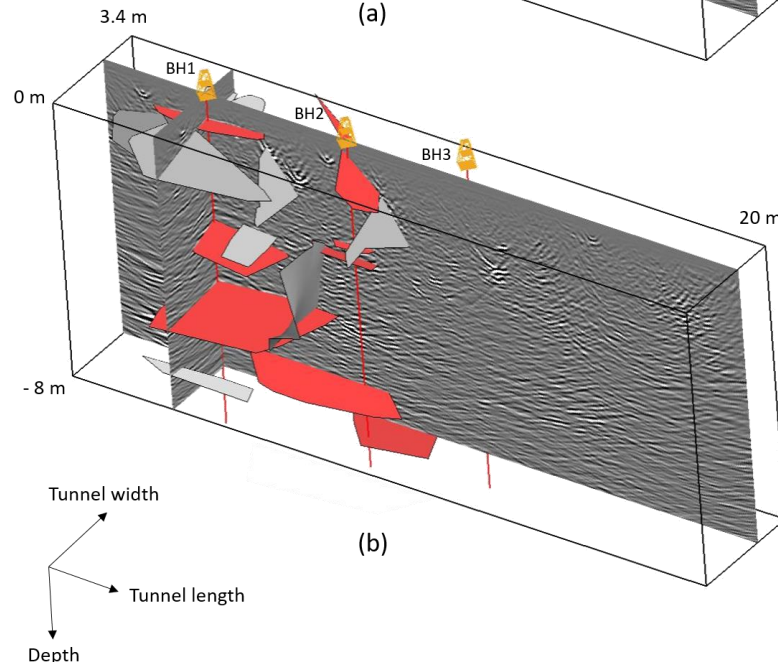
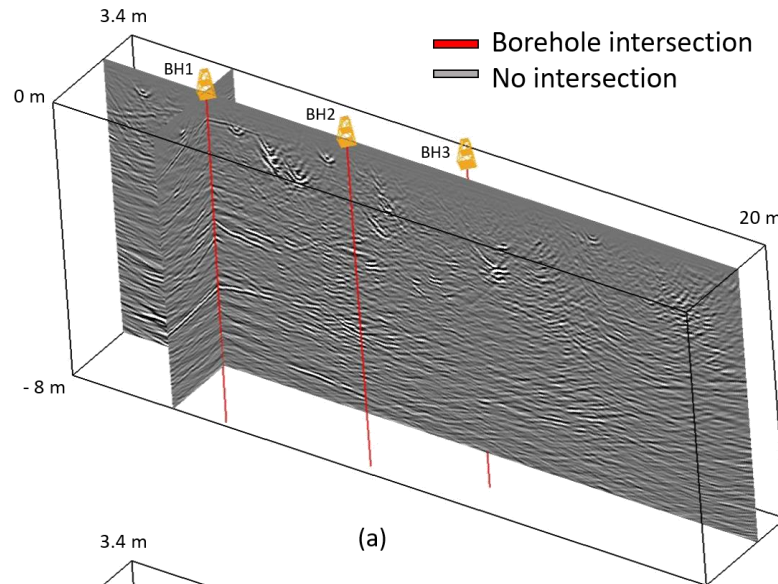
#### 450 MHz



#### 750 MHz







(a) GPR non interprété; (b) GPR interprété

## GPR de surface

## Modèle de fracture &amp; implantation des forages

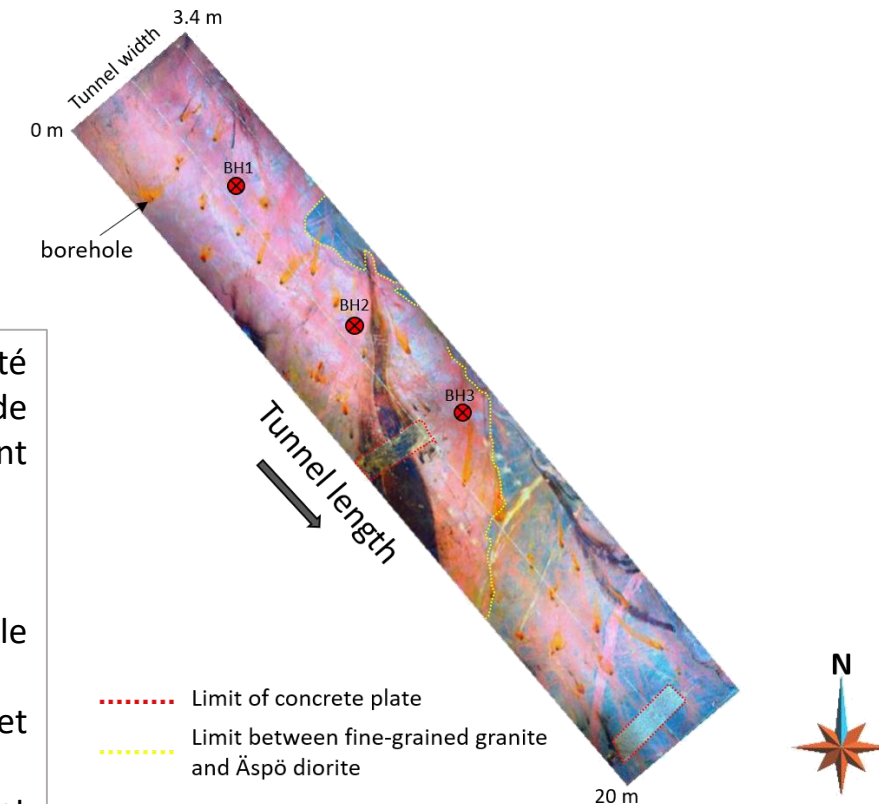
Sur base des réflexions GPR, trois forages ont été implantés (BH1 à BH3). Selon le nombre de réflexions, on suppose que BH1 et BH2 se trouvent dans une zone plus transmissive que BH3.

## Données de forage:

- Données de pression (mesures pendant le forage)
- Données hydrauliques (tests de pompage et d'injection)
- Données d'échantillons (carottes) et d'imagerie (caméra insérée dans le forage)

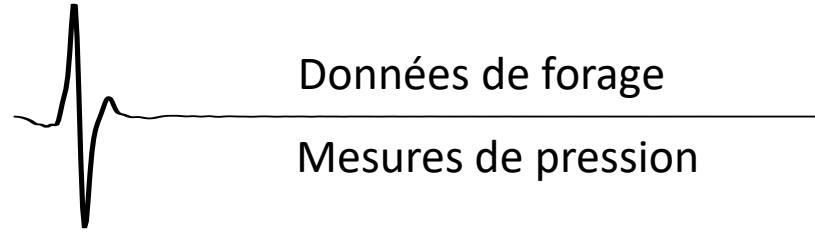
## Buts:

- Idée de la connectivité entre forages
- Estimation de la transmissivité du milieu
- Vérification de la nature des réflexions GPR



**But:** avoir une idée de la connectivité entre les forages

**Méthodologie:** mesures de pression pendant les forages



Sections forées dans BH2:

- 3.2 – 3.55 m
- 7.13 – 7.54 m

Sections forées dans BH3:

- 1.92 – 2.18m
- 4.9 – 5.21 m
- 6.42 – 6.86 m

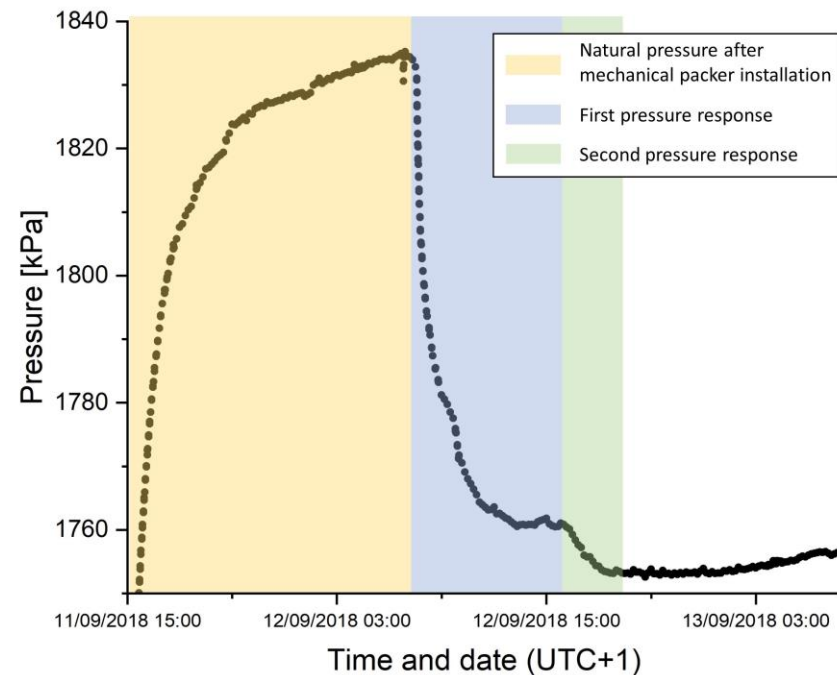
Pression stationnaire (*“packed-off borehole”*):

BH1: env. 1850 kPa

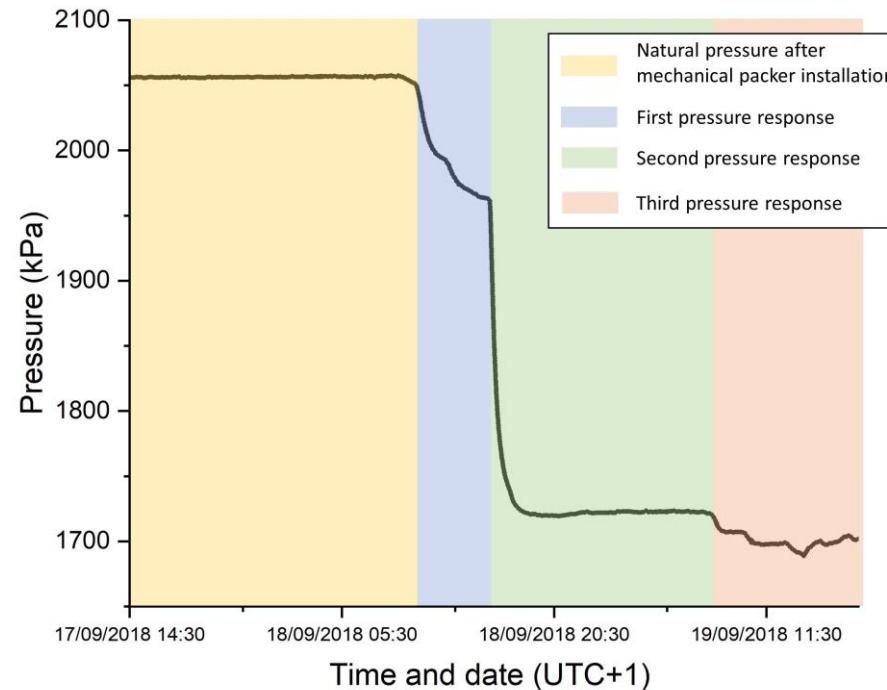
BH2: env. 2050 kPa

BH3: env. 2150 kPa

⇒ Gradient hydraulique:  
BH3 → BH1



Réponse dans BH1 pendant le forage de BH2



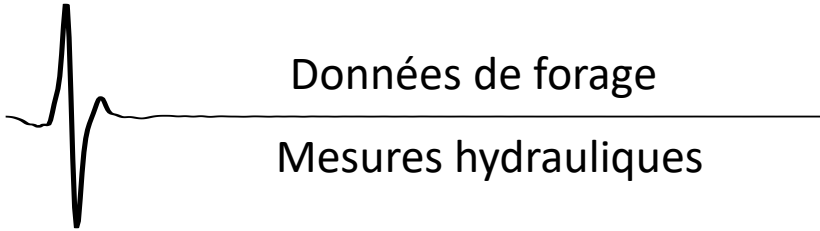
Réponse dans BH2 pendant le forage de BH3  
(même comportement pour BH1)



But: estimer la transmissivité des fractures

Méthodologie: pompage (P<0) et injection (P>0) dans des sections de 1 m

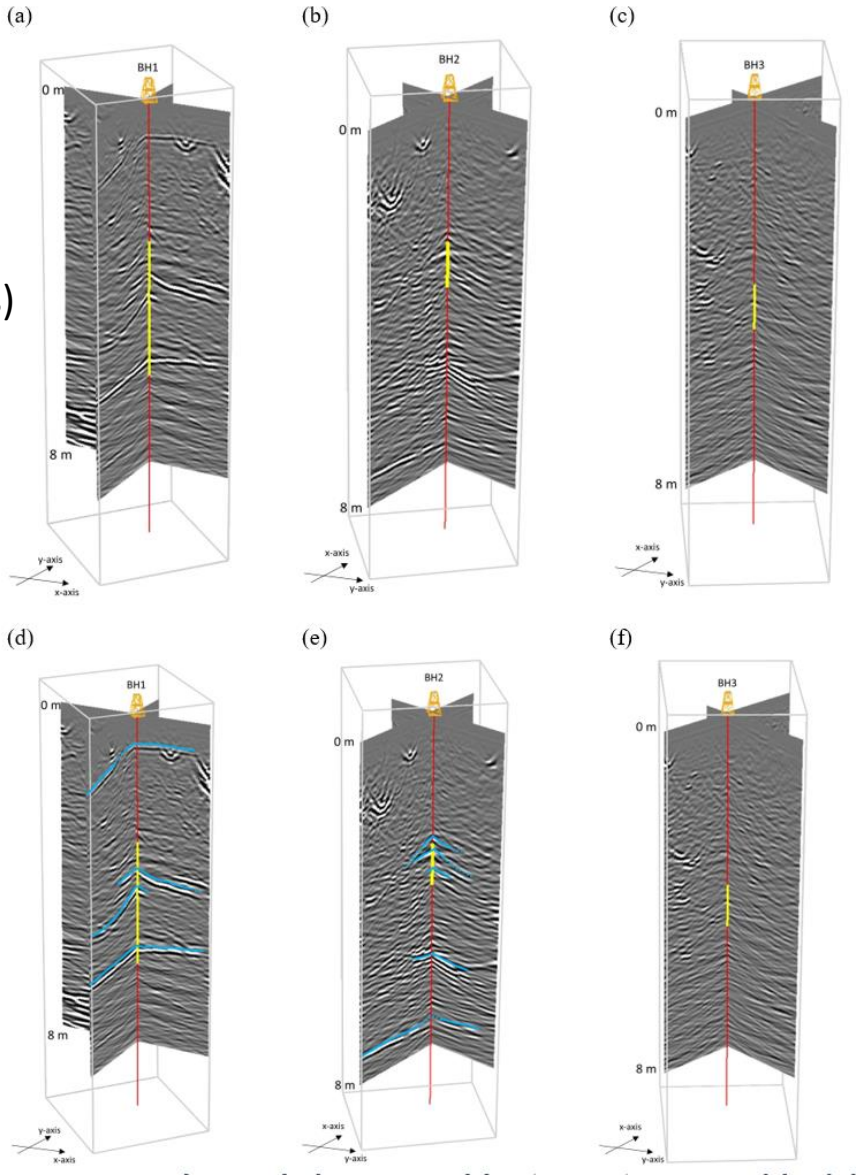
HWIC (High pressure Water Injection Controller)



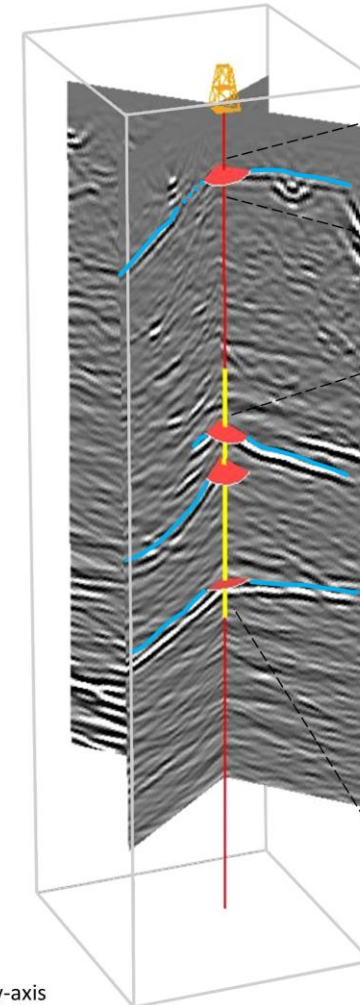
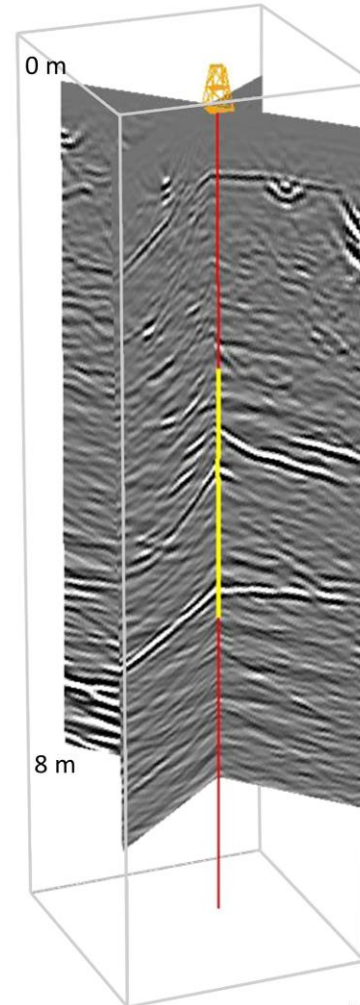
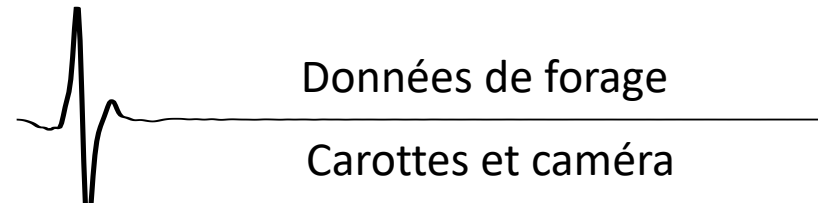
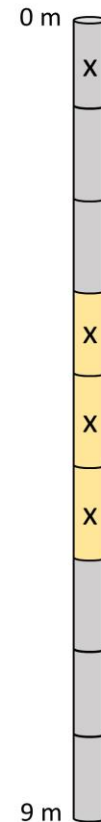
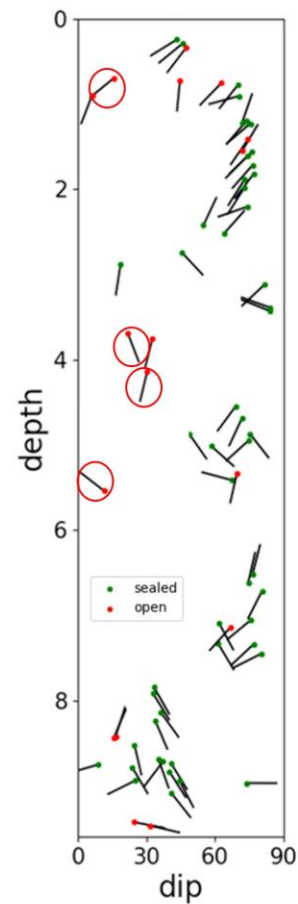
Très faible transmissivité (2.2 E-10 to 7.0 E-10 m²/s)

Borehole ID	Test section (m)	Pressure (kPa)	Flow rate (L/min)	Hydraulic transmissivity (m²/s)
BH1	1-2	200	< detection limit	
	2-3	510	< detection limit	
	3-4	-1427	-0.0033	2.2E-10
	4-5	-1086	-0.0073	6.3E-10
	5-6	-1080	-0.0065	5.6E-10
	6-7	-1449	< detection limit	
BH2	7-8	-1376	< detection limit	
	1-2	656	< detection limit	
	2-3	-1875	< detection limit	
	3-4	-1589	-0.0038	2.2E-10
	4-5	400	< detection limit	
	5-6	-1979	< detection limit	
BH3	6-7	-1600	< detection limit	
	7-8	-1979	< detection limit	
	1-2	175	< detection limit	
	2-3	-833	< detection limit	
	3-4	191	< detection limit	
	4-5	-1300	-0.0097	7.0E-10
	5-6	-1600	< detection limit	
	6-7	-1659	< detection limit	
	7-8	-1300	< detection limit	

Limite de mesure du flux = 2 mL/min

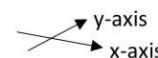
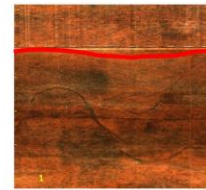
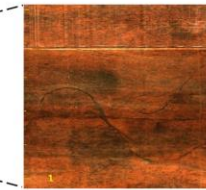


## Corrélation avec BH1



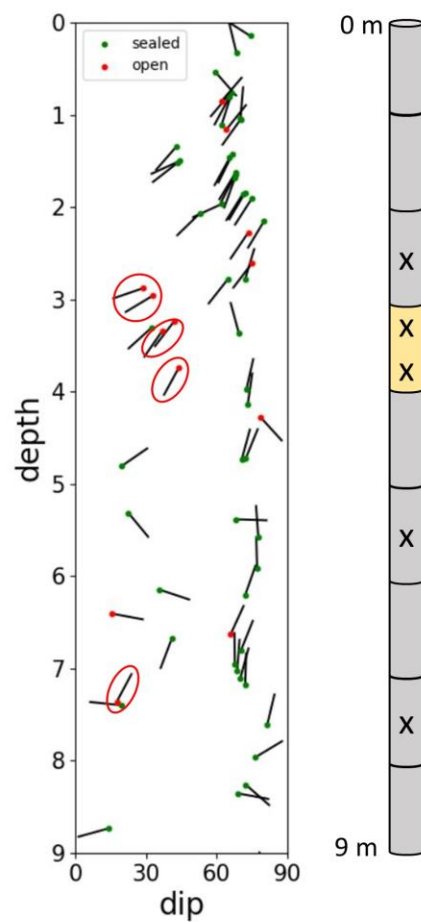
But: vérifier la nature des réflecteurs GPR

Méthodologie: corrélation entre les fractures GPR et les fractures observées le long des forages

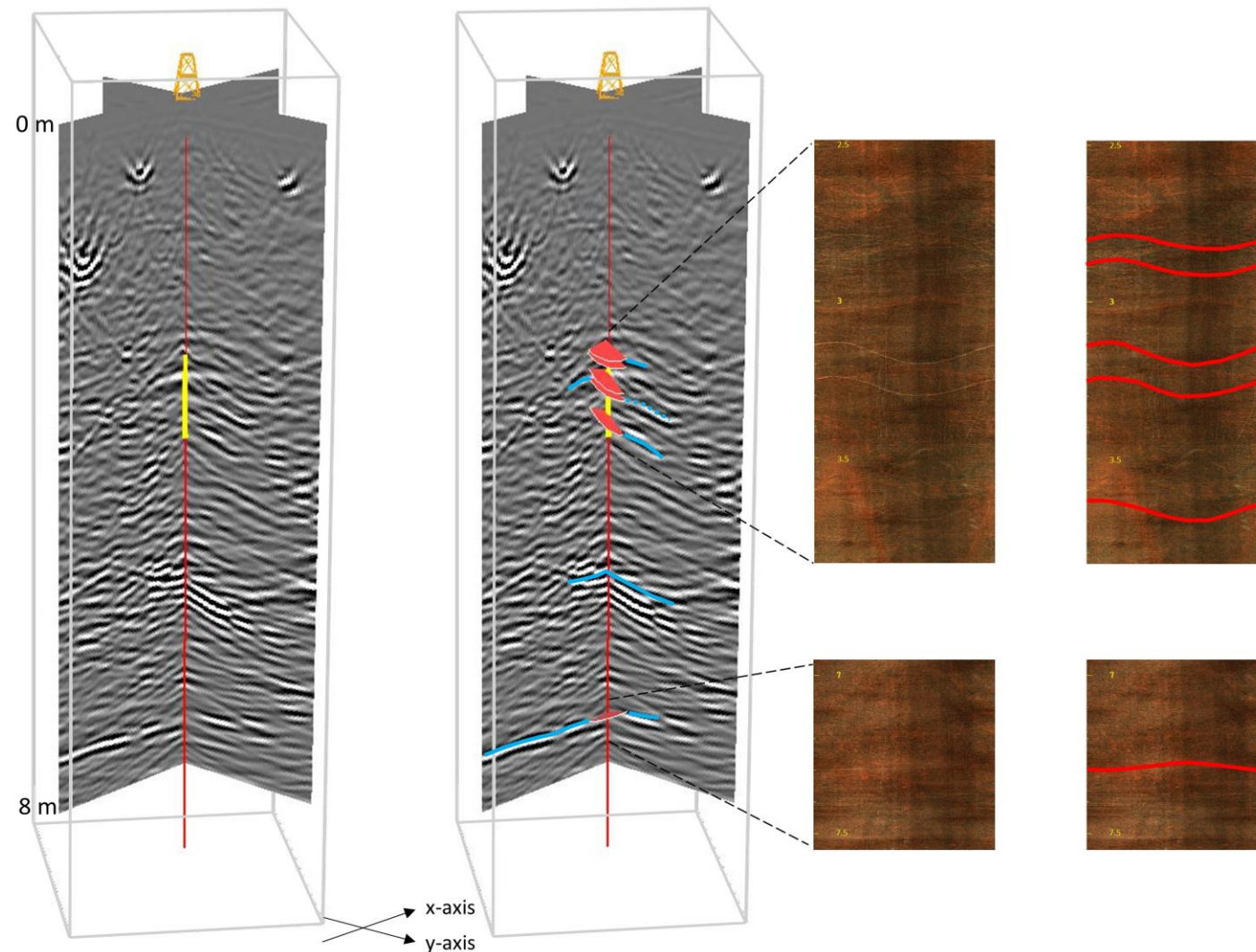




## Corrélation avec BH2



Données de forage  
Carottes et caméra



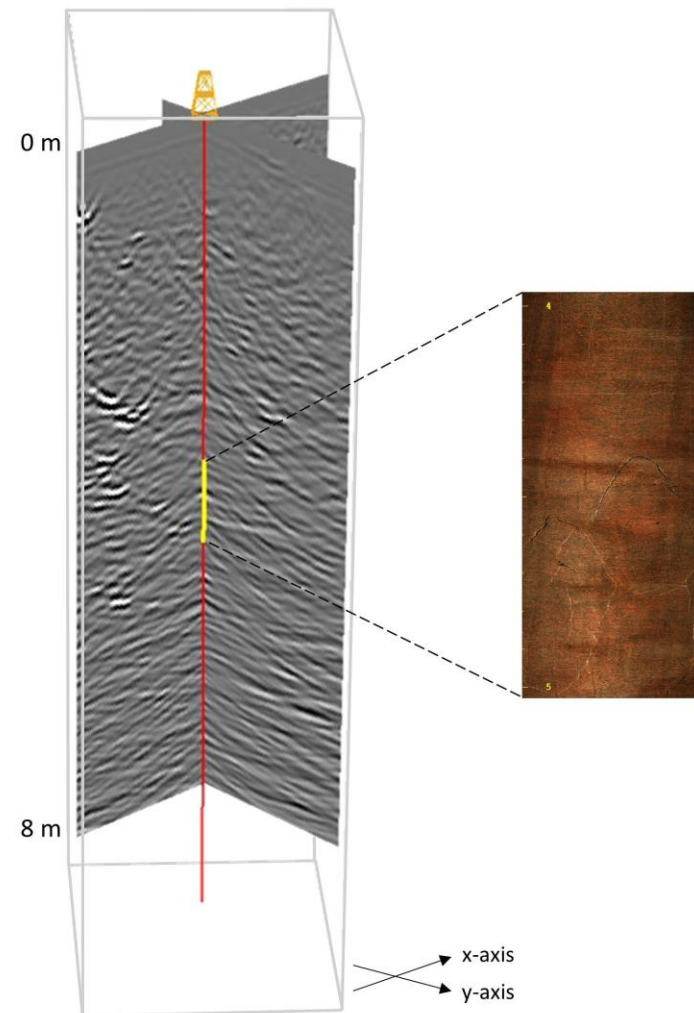
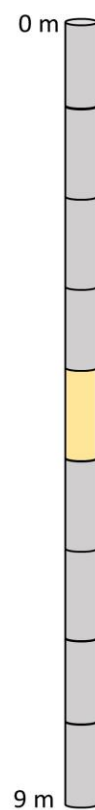
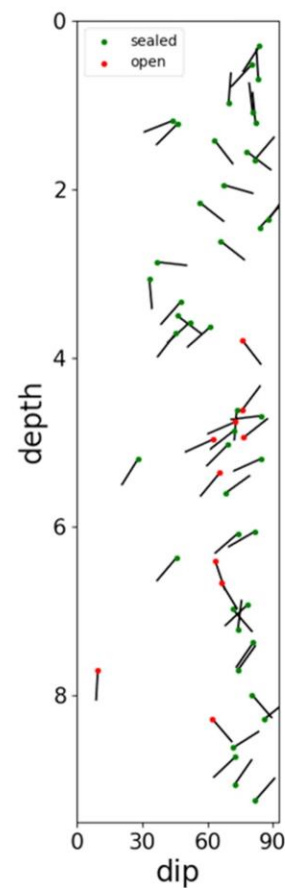


## Corrélation avec BH3



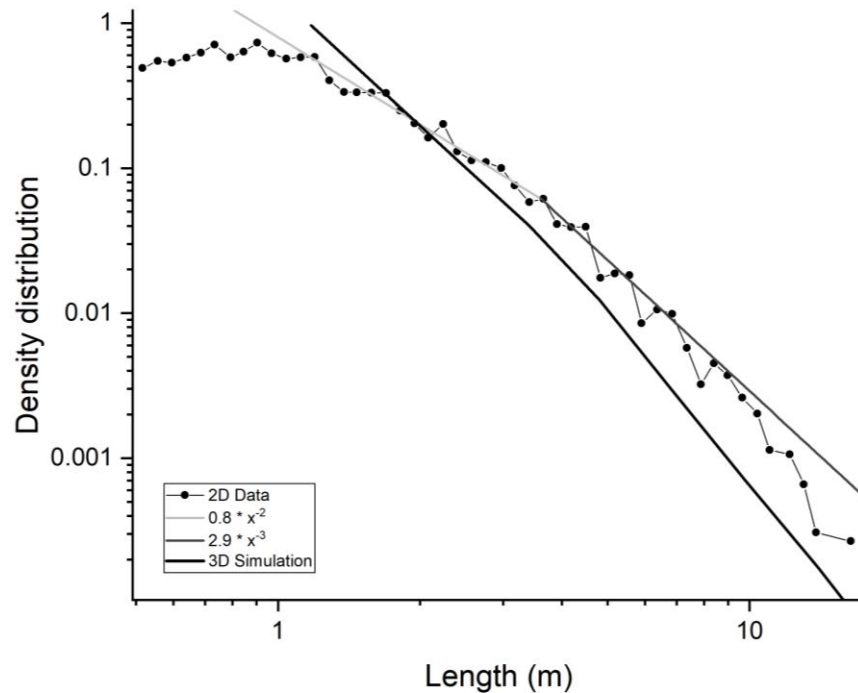
Données de forage

Carottes et caméra



**But:** estimer la proportion des fractures identifiées par le GPR.

**Méthodologie:** on dérive un modèle statistique 3D de fractures (distribution des tailles et orientations) sur base des observations de traces échantillonnées sur les parois des tunnels.



## Modèle statistique de fractures

### Cartographie 2D des tunnels

- Distribution des longueurs de fractures (ou de la trace)  
(Bonnet et al. 2001, Bour 2002, Davy 1993)

$$n(l) = \alpha * l^{-a}$$

$\alpha$  = densité de fractures

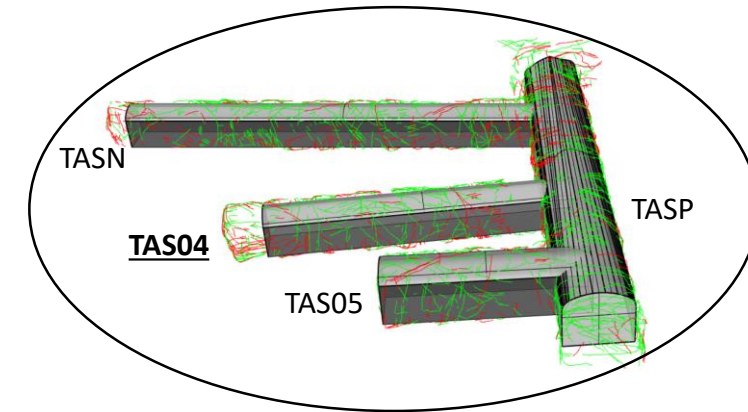
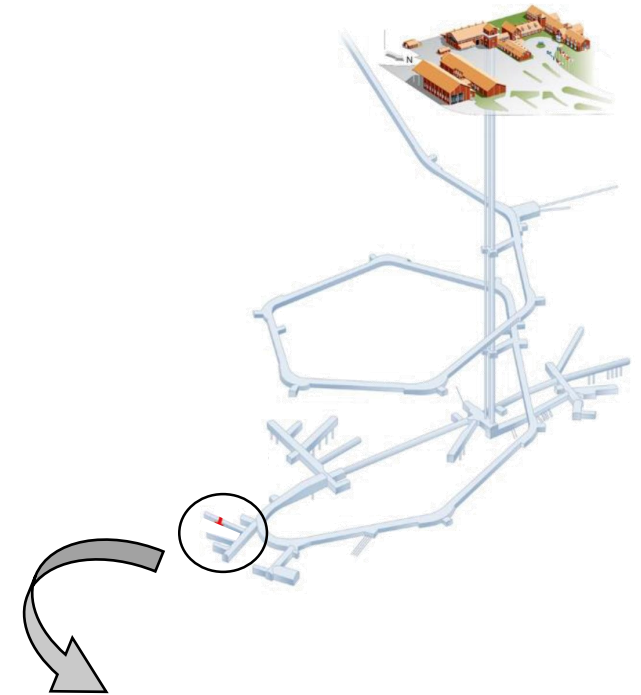
$l$  = longueur de la fracture (ou de la trace)

$a$  = exposant de la loi de puissance

- Règles de stéréologie (2D → 3D)  
(Piggott, 1997)

$$a_{3D} = a_{2D} + 1$$

$$\alpha_{3D} = \alpha_{2D} \sqrt{\pi} \frac{\Gamma\left(\frac{2+a_{2D}}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1+a_{2D}}{2}\right)}$$



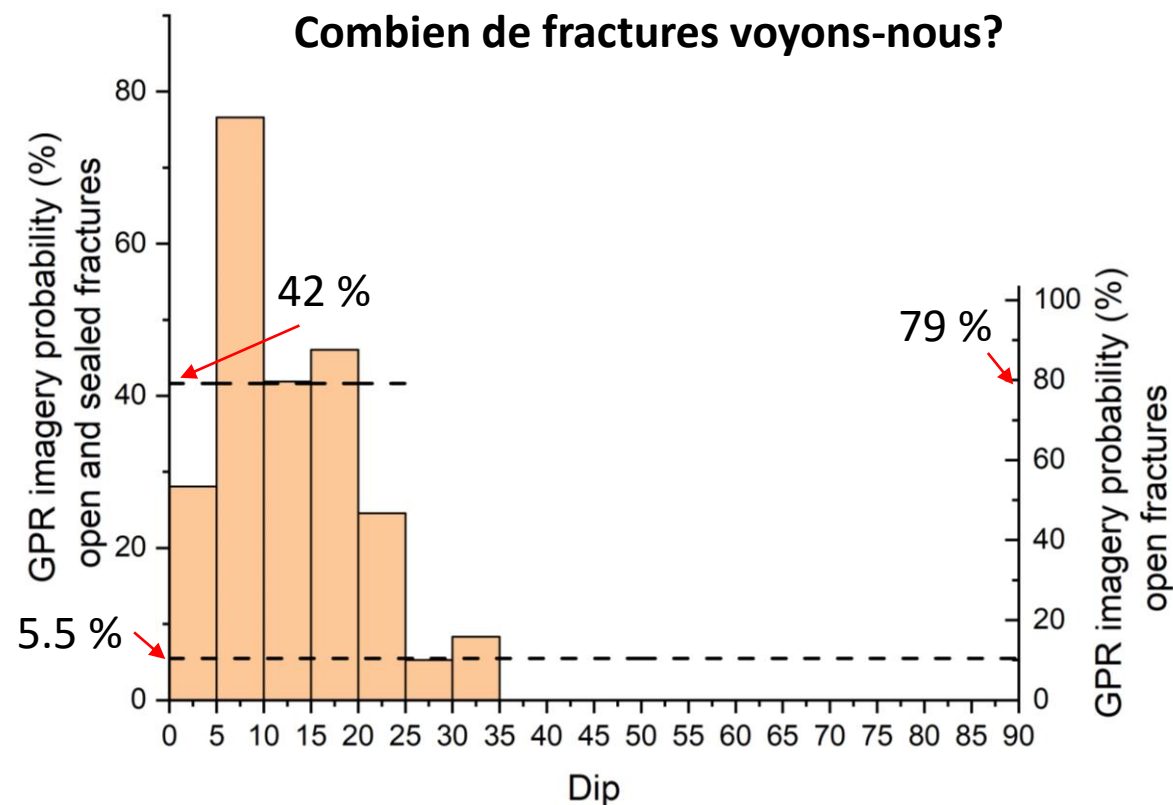
## Densité des fractures GPR vs densité des fractures du modèle statistique 3D

- Surface de fractures: 1-10 m<sup>2</sup>
- Pendage des fractures: 0 and 35°

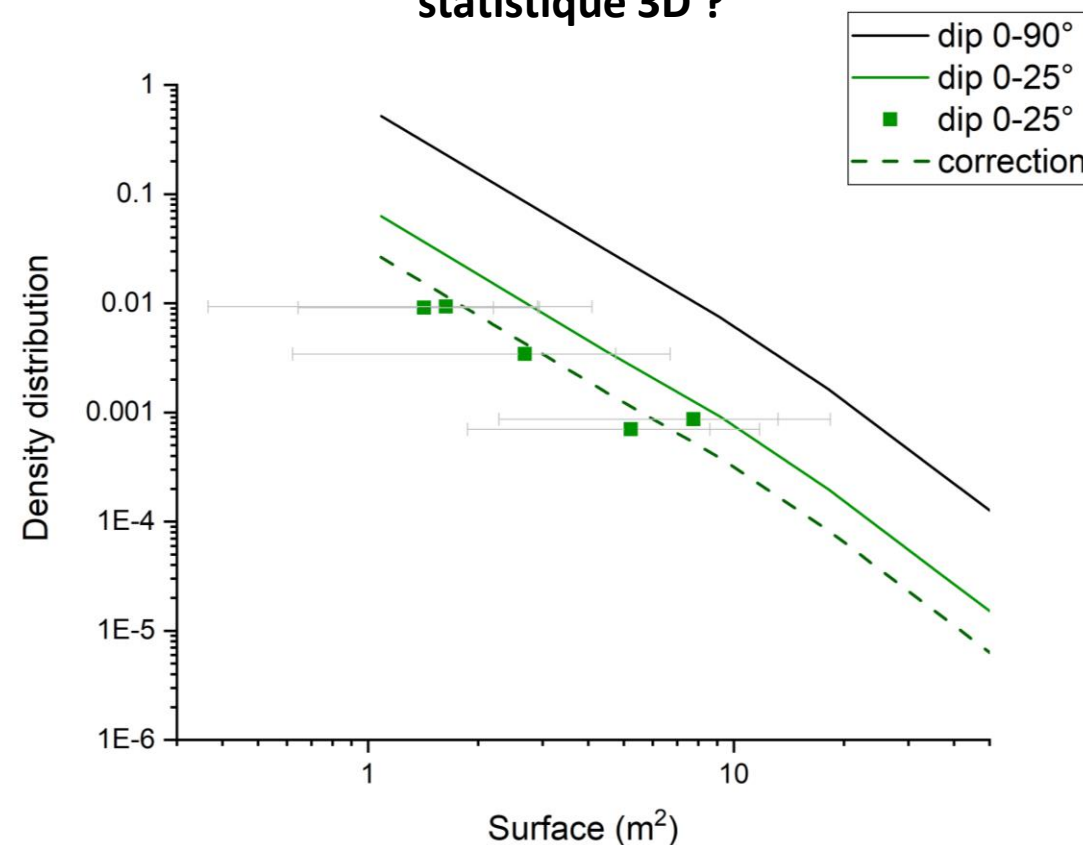


Modèle statistique de fractures

Capacité de détection du GPR



## Les fractures GPR suivent-elles le modèle statistique 3D ?



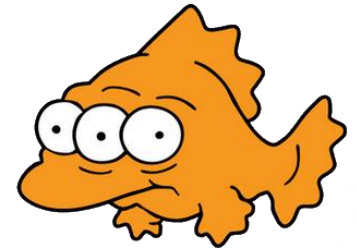
## Estimation de la capacité de détection du GPR:

Densité observée (GPR)/ densité modélisée (modèle statistique)





## Conclusions & Perspectives

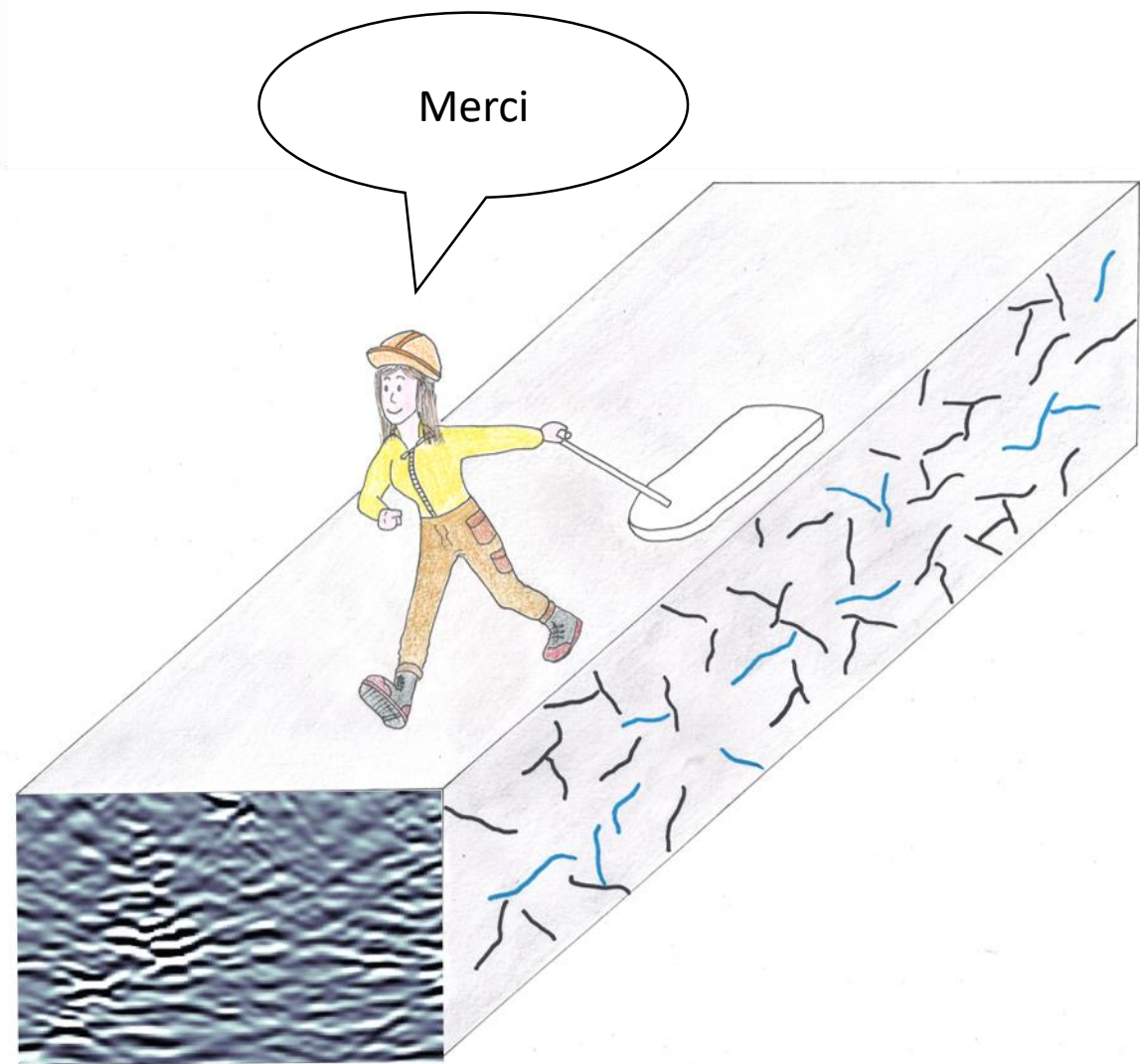
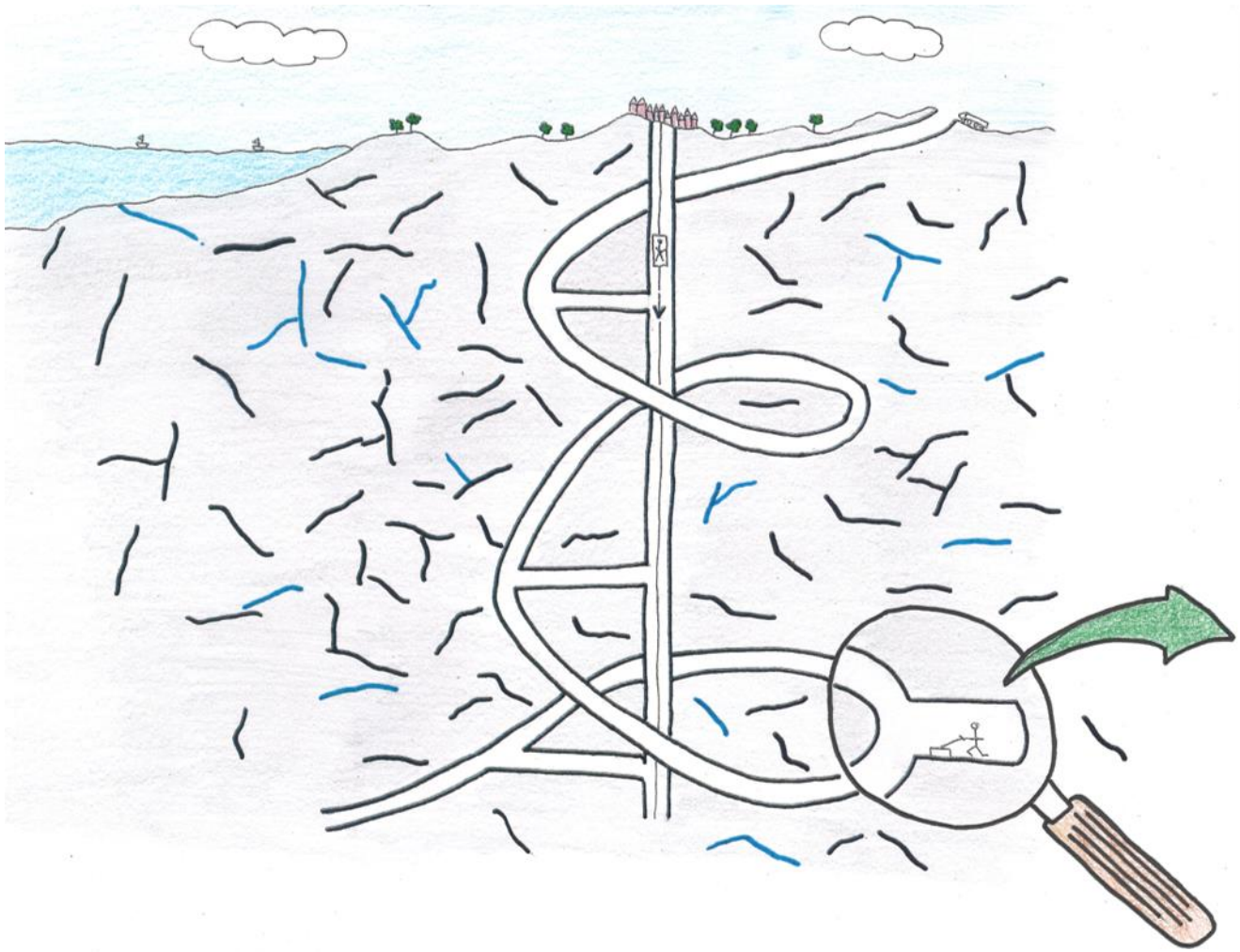


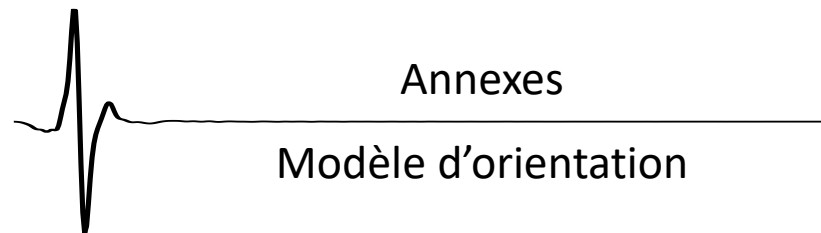
- Les réflexions GPR correspondent-elles aux fractures ouvertes et transmissives ou à d'autres discontinuités géologiques ?
  - ⇒ Fractures ouvertes (données de forages)
  - ⇒ principalement situées dans les zones les plus transmissives (données hydrogéologiques)
  - ⇒ ou dans une section connectée aux autre forages (données de pression)
- Quelle est la résolution du GPR en terme de taille et orientation de fractures ?
  - ⇒ 5.5 % de détection : fractures ouvertes et fermées, tout pendage confondu, surface entre 1-10 m<sup>2</sup>
  - ⇒ 42 % de détection : fractures ouvertes et fermées, pendage < 25°, surface entre 1-10 m<sup>2</sup>
  - ⇒ 79% de détection : fractures ouvertes, pendage < 25°, pas d'information sur la surface

NB: pour imager des fractures sub-verticales, placez le GPR dans les forages ... 😊

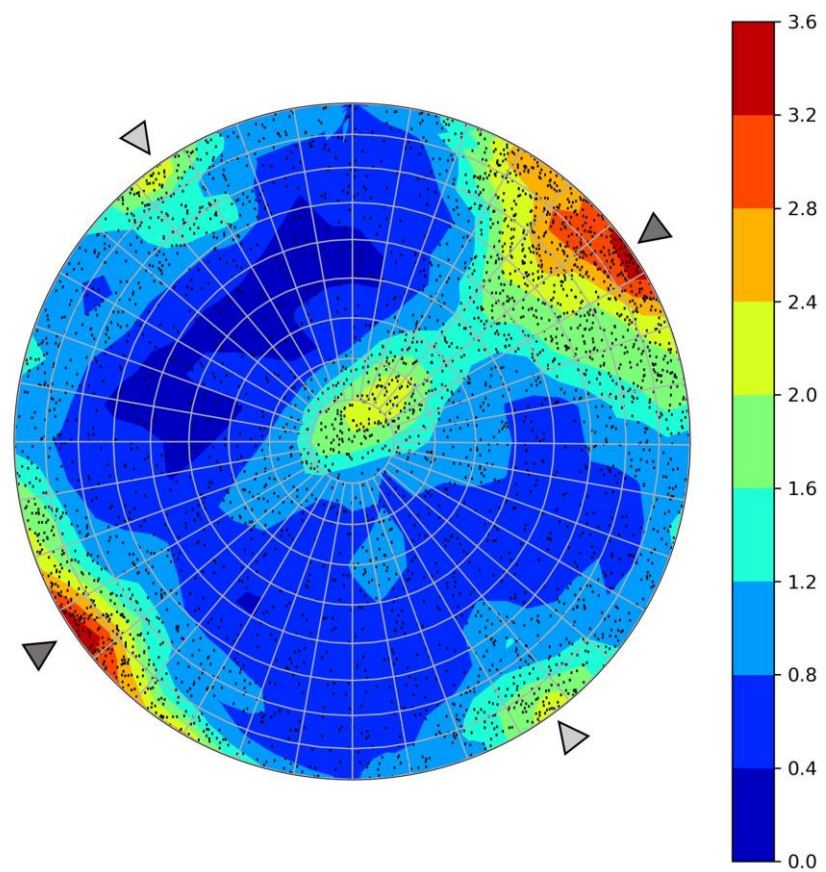
### Perspectives:

- Conditionner les modèles DFN avec les données GPR (méthodologie à développer)
- Expérience n°2: imager le trajet d'un traceur dans les fractures afin d'obtenir une image de la connectivité des fractures

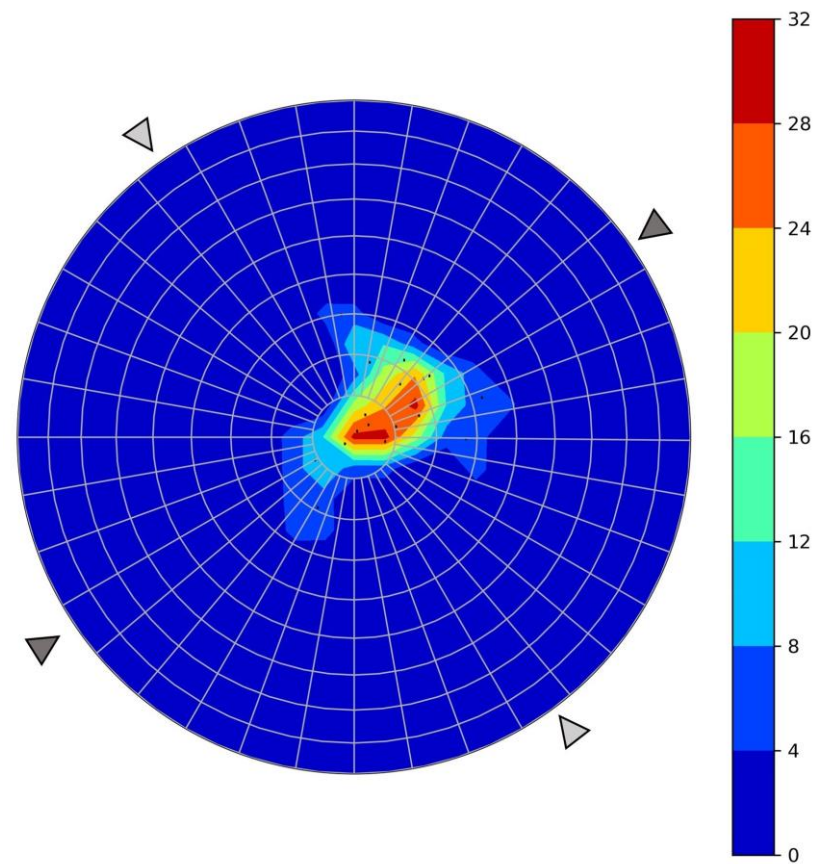





Modèle statistique



GPR





# Annexes

---

## Fractures dans les forages

Parameters		Fractures in boreholes		GPR fractures
Aperture	Dip	Number	Percentage	Imagery probability
open + sealed	0-90°	188	100.0 %	5.5 %
open	0-90°	40	21.3 %	25.8 %
open + sealed	dips < 25°	19	10.1 %	41.6 %
open	dips < 25°	10	5.3 %	79.1 %