

Travail de fin d'études

Modélisation hydromécanique de l'argile à Opalines:
retour d'expérience sur le micro-tunnel HG-A

BERTRAND François

Université de Liège

Juin 2014

Fission nucléaire

→ Déchets radioactifs

→ Stockage ? Couches géologiques profondes

→ Etudes laboratoires souterrains

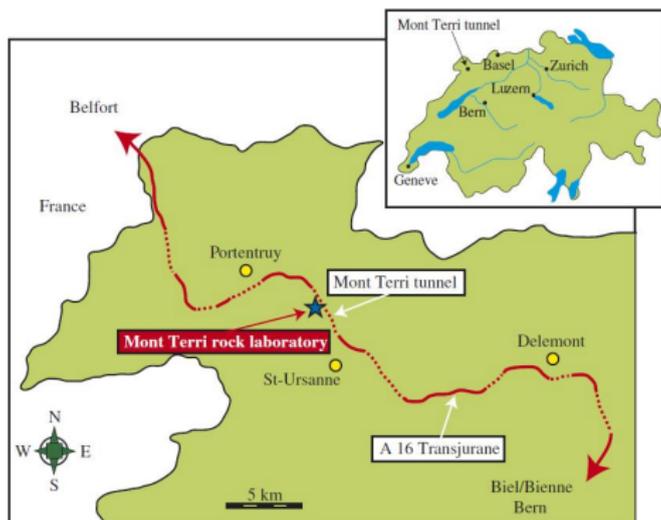


FIGURE: Localisation laboratoire Mont-Terri - Autoroute A16. *Source :* mont-terri.ch.

- 1 Contexte
- 2 Laboratoire du Mont-Terri
- 3 Modèles physiques
- 4 Modélisation

1 Contexte

- Constat
- Conséquence
- Solution

2 Laboratoire du Mont-Terri

3 Modèles physiques

4 Modélisation

Utilisation de la **fission nucléaire** pour **produire de l'électricité** 15% de l'électricité mondiale

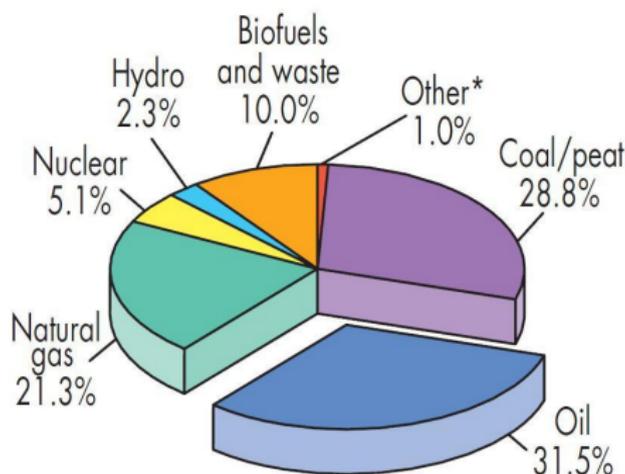
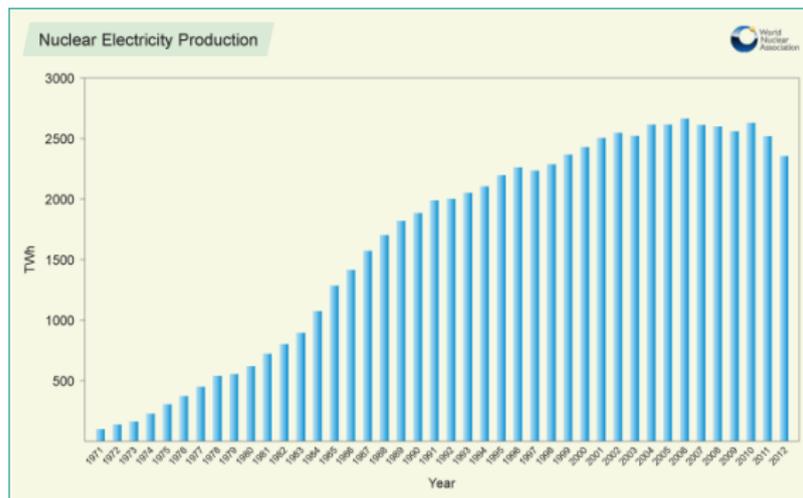


FIGURE: Part mondiale de chaque carburant dans la production d'énergie primaire en 2011. * « Other » inclus les énergies renouvelables autres que l'hydroélectricité et les biocarburants. *Source* : IEA 2013.

FIGURE: Evolution de la production d'électricité par fission nucléaire (en TWh).

Source : WNA 2014.



Nette baisse en 2012 suite à l'accident de **Fukushima**. Sortie programmée du nucléaire pour l'Allemagne, la Belgique et la **Suisse**.

Production de **déchets radioactifs**.

→ Rayonnement ionisant **dommageable** pour les êtres vivants

→ **Isoler** de la biosphère

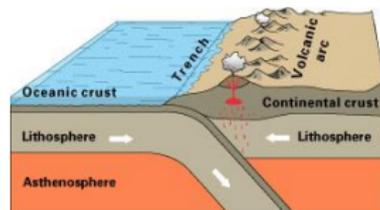


Suisse : 100 000 m^3 de déchets radioactifs à terme



Largage en mer

Envoi dans l'espace



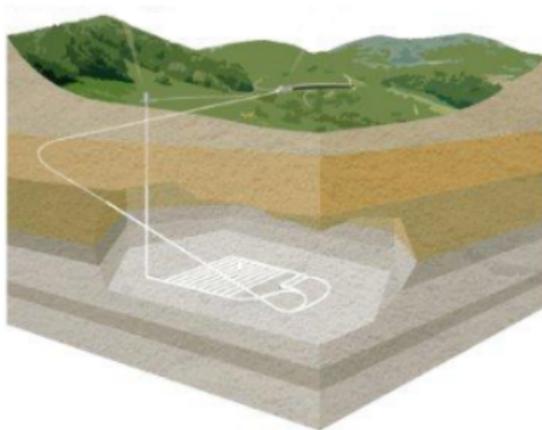
Oceanic-continental convergence

Zone de subduction

Solution

Stockage en couches géologiques profondes

Au vu des connaissances actuelles, solution privilégiée = **stockage en couches géologiques profondes.**



Exigences : roche stable, pas de ressources rares exploitables, profondeur et extension suffisantes, roche **la moins perméable possible.**

1 Contexte

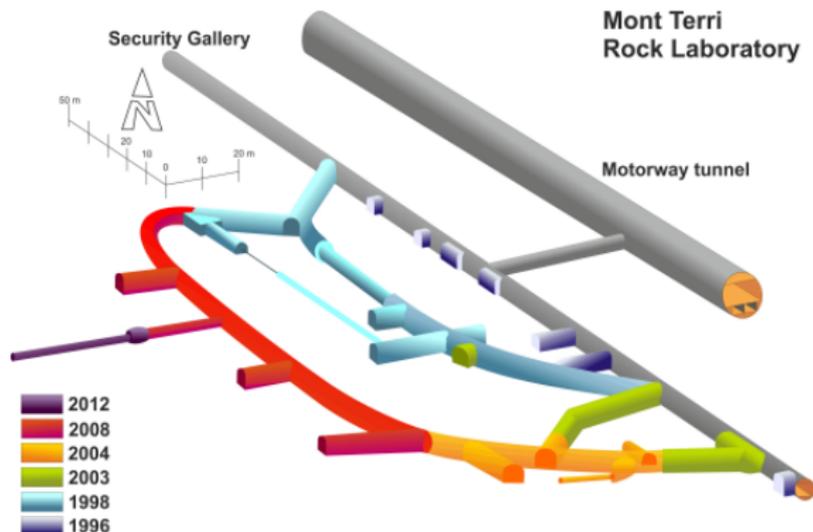
2 Laboratoire du Mont-Terri

- Le projet Mont-Terri
- La géologie du site
- L'argile à Opalines
- Expérience HG-A

3 Modèles physiques

4 Modélisation

Projet international de recherche.



Objectifs : analyser **propriétés** hydrogéologiques, géochimiques et mécaniques de l'**argile à Opalines** + variations induites par l'excavation.

Pendage des couches de **45°** vers le SSE aux environs du laboratoire.
≈ 300m de roches surincombantes (jusqu'à 1000m dans le passé).

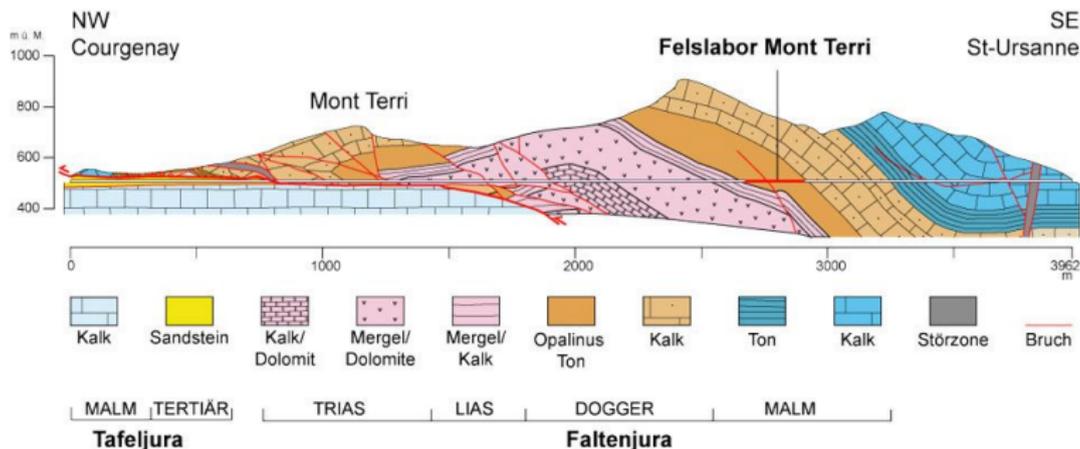


FIGURE: Source : mont-terri.ch, d'après Freivogel & Huggenberger, 2003.

Laboratoire compris dans une couche de 160m d'épaisseur :
argile à Opalines (*Leioceras Opalinum*).

L'argile à Opalines

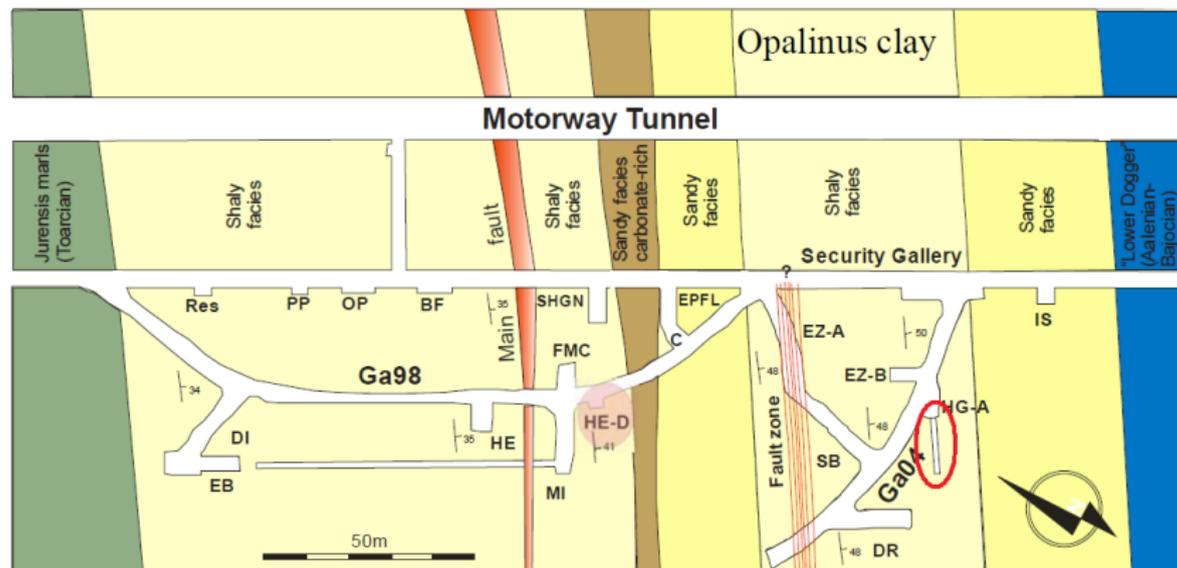
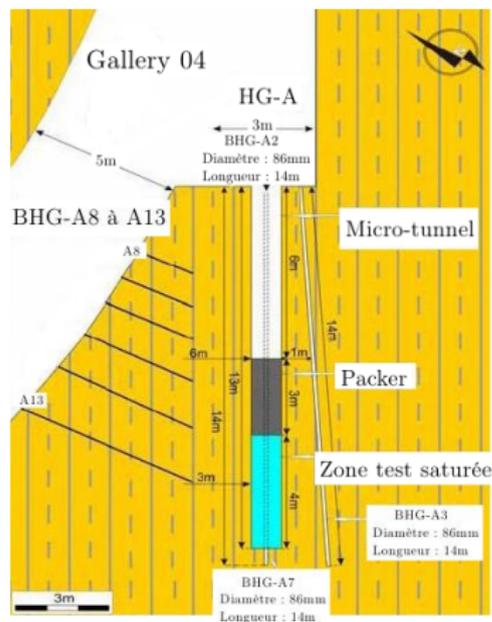
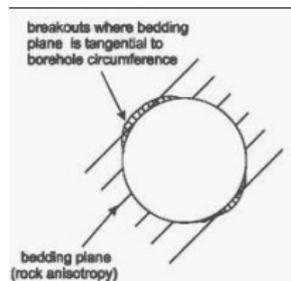


FIGURE: Carte géologique des faciès de l'argile à Opalines aux environs du laboratoire souterrain du Mont Terri. *Source* : [Wileveau, 2005].

Micro-tunnel creusé en février 2005, 1 semaine d'excavation
13m de long et 1036mm de diamètre



- Tunnel **parallèle** à la **stratification**
- Stratification inclinée de **45°**
→ Couches tangentes au tunnel entre 10 et 11 heures et entre 4 et 5 heures.



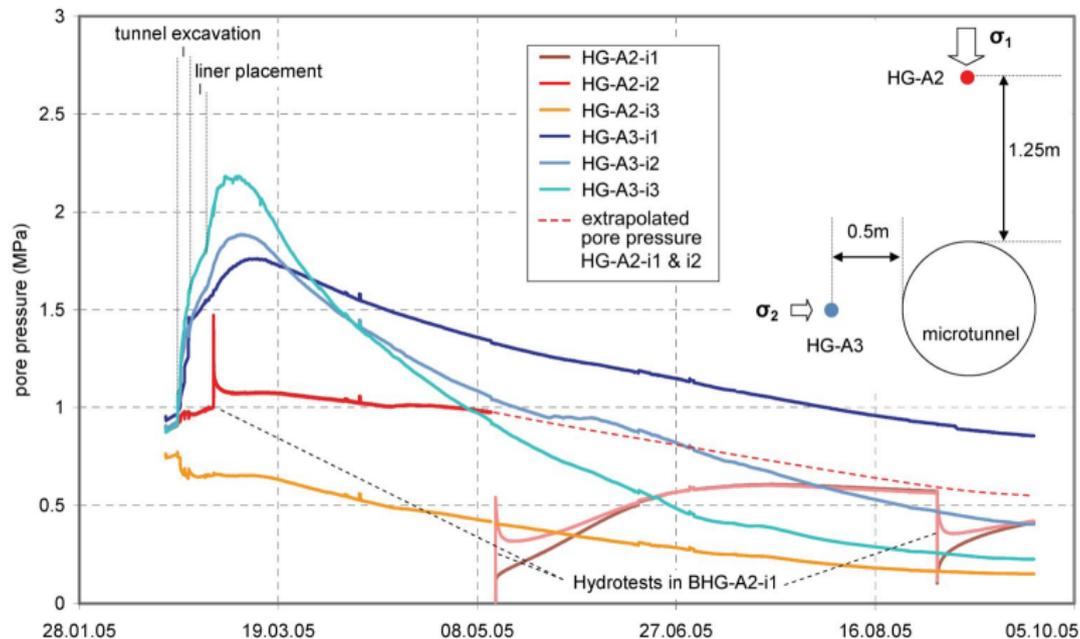


FIGURE: Evolution des pressions d'eau. Source : [Marshall, 2006].

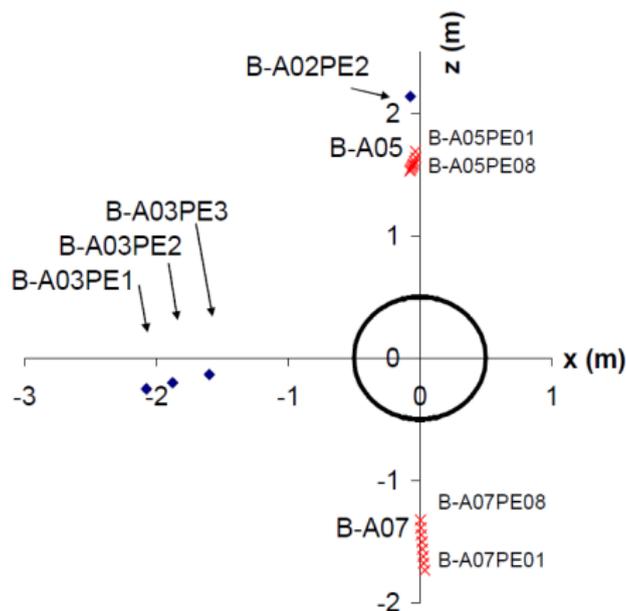


FIGURE: Positions des capteurs. *Source* : [Collin, 2012].

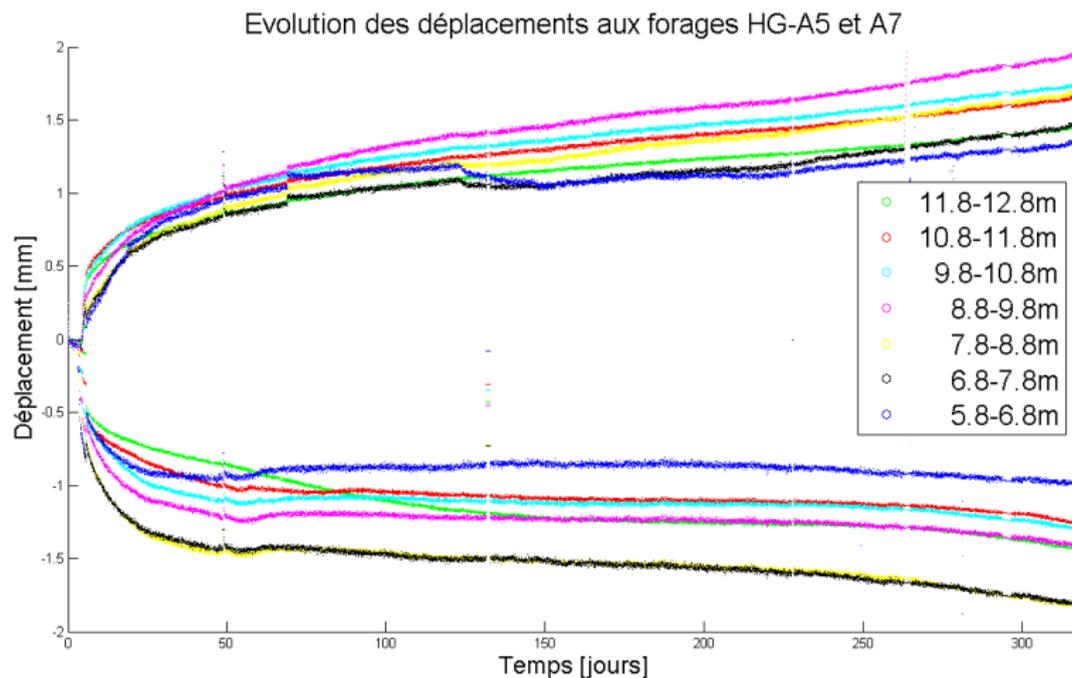


FIGURE: Déplacements totaux enregistrés aux forages HG-A5 et HG-A7.

1 Contexte

2 Laboratoire du Mont-Terri

3 Modèles physiques

- Paramètres hydromécaniques
- Caractérisation

4 Modélisation

Comportement du matériau représenté par un **modèle** dépendant d'un certain nombre de **paramètres**.

- **Hydraulique** :

$k_{=w,sat}$, ρ_w , μ_w , χ_w , CSR1 et CSR2, CKW1.

- **Mécanique** :

E , ν , c , ϕ .

→ Paramètres déterminés au moyen d'essais de caractérisation
(+ littérature scientifique)

Comportement du matériau représenté par un **modèle** dépendant d'un certain nombre de **paramètres**.

- **Hydraulique :**

$k_{w,sat}$, ρ_w , μ_w , χ_w , CSR1 et CSR2, CKW1.

- **Mécanique :**

E , ν , c , ϕ .

→ Paramètres déterminés au moyen d'essais de caractérisation
(+ littérature scientifique)

Comportement du matériau représenté par un **modèle** dépendant d'un certain nombre de **paramètres**.

- **Hydraulique :**

$k_{w,sat}$, ρ_w , μ_w , χ_w , CSR1 et CSR2, CKW1.

- **Mécanique :**

E , ν , c , ϕ .

→ Paramètres déterminés au moyen d'essais de caractérisation
(+ littérature scientifique)

Comportement **anisotrope**

→ Réponse mécanique affectée par la direction de chargement.

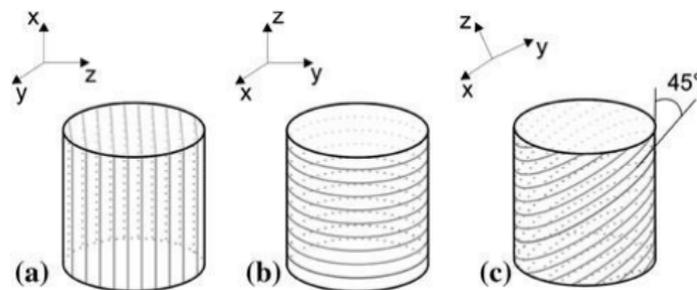
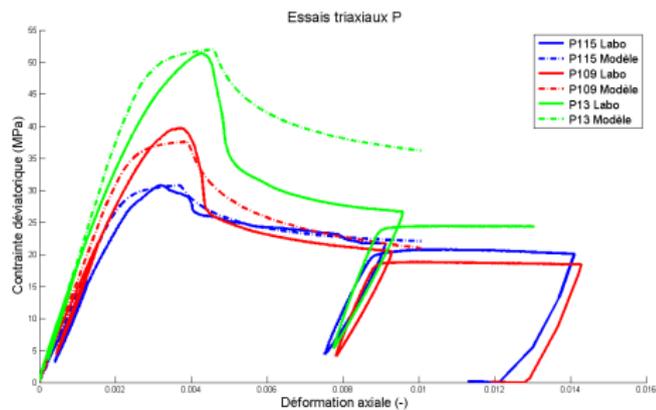


FIGURE: Directions de chargement par rapport au litage : (a) P-sample (b) S-sample (c) Z-sample. *Source* : [Salager, 2013].

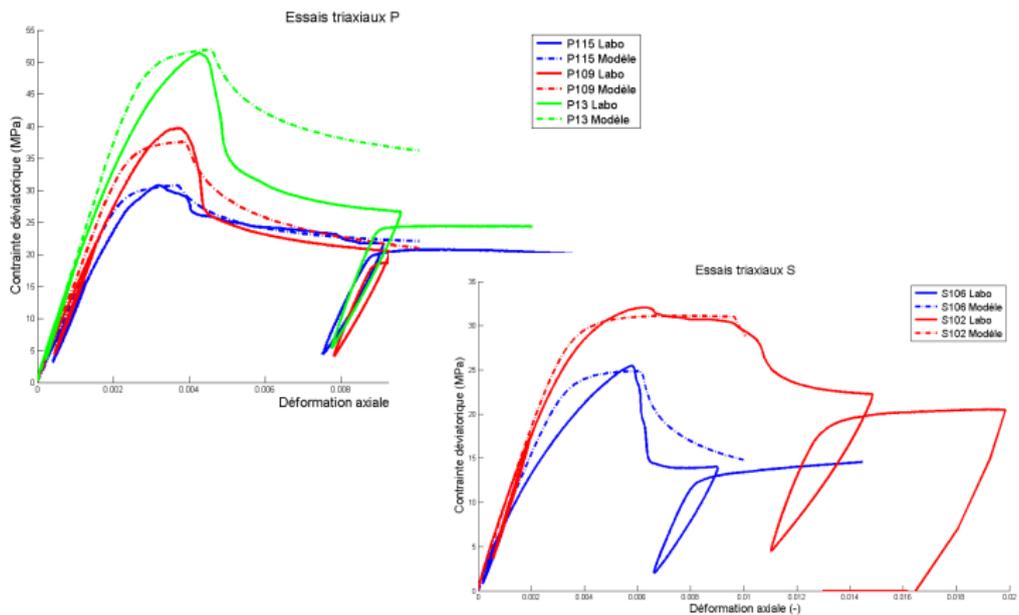
Caractérisation

Essais triaxiaux



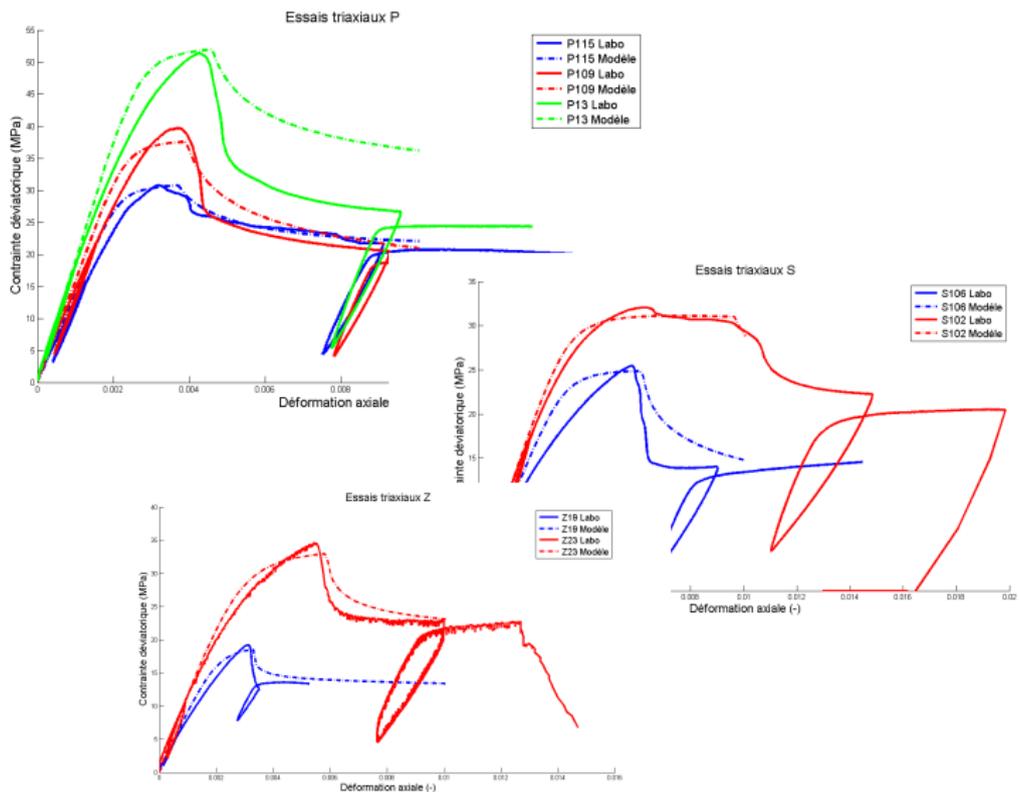
Caractérisation

Essais triaxiaux



Caractérisation

Essais triaxiaux



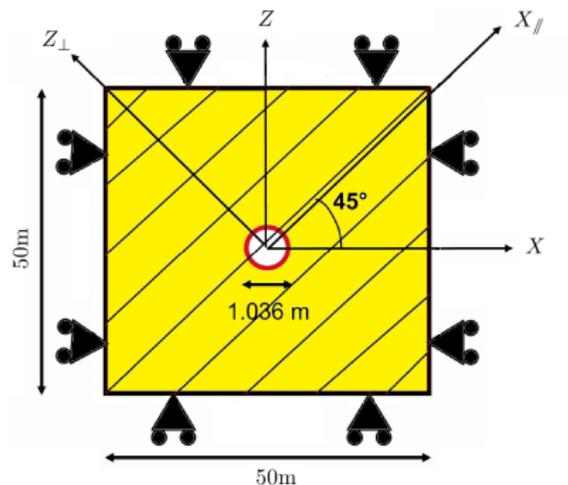
1 Contexte

2 Laboratoire du Mont-Terri

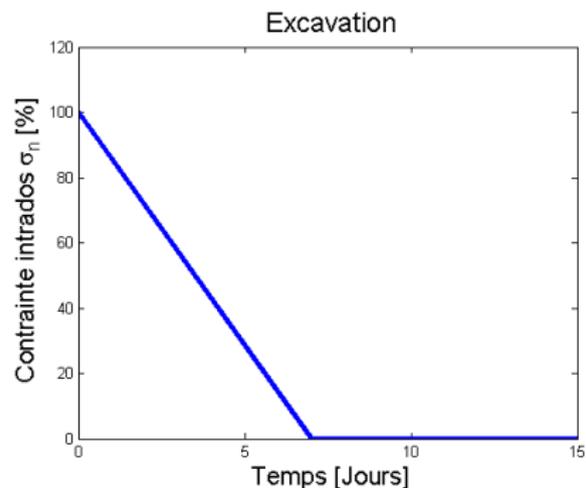
3 Modèles physiques

4 **Modélisation**

- Géométrie, conditions frontières et chargement
- Analyse des effets des différentes anisotropies
- Confrontation simulation et données expérimentales
- Introduction d'une zone endommagée
- Gonflement du MegaPacker



- Etude en 2D : état plan de déformation
- Anisotropies → section complète
- Conditions frontières :
 - nœuds fixes en périphérie
 - force linéique décroissante + pression d'eau décroissante en paroi du tunnel



Paroi du tunnel :

- Contraintes initiales = contraintes *in situ*
- 100% à 0 en une semaine (décroissance linéaire)

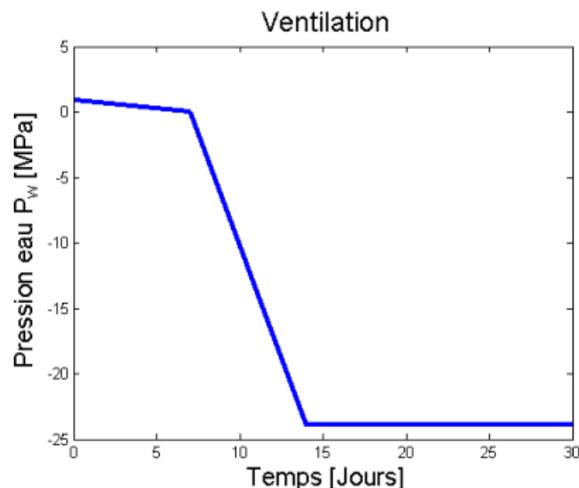
Paroi du tunnel :

- Pression d'eau initiale = 0.9MPa
- 0.9 à 0MPa en une semaine
- 0 à -23.8MPa en une semaine

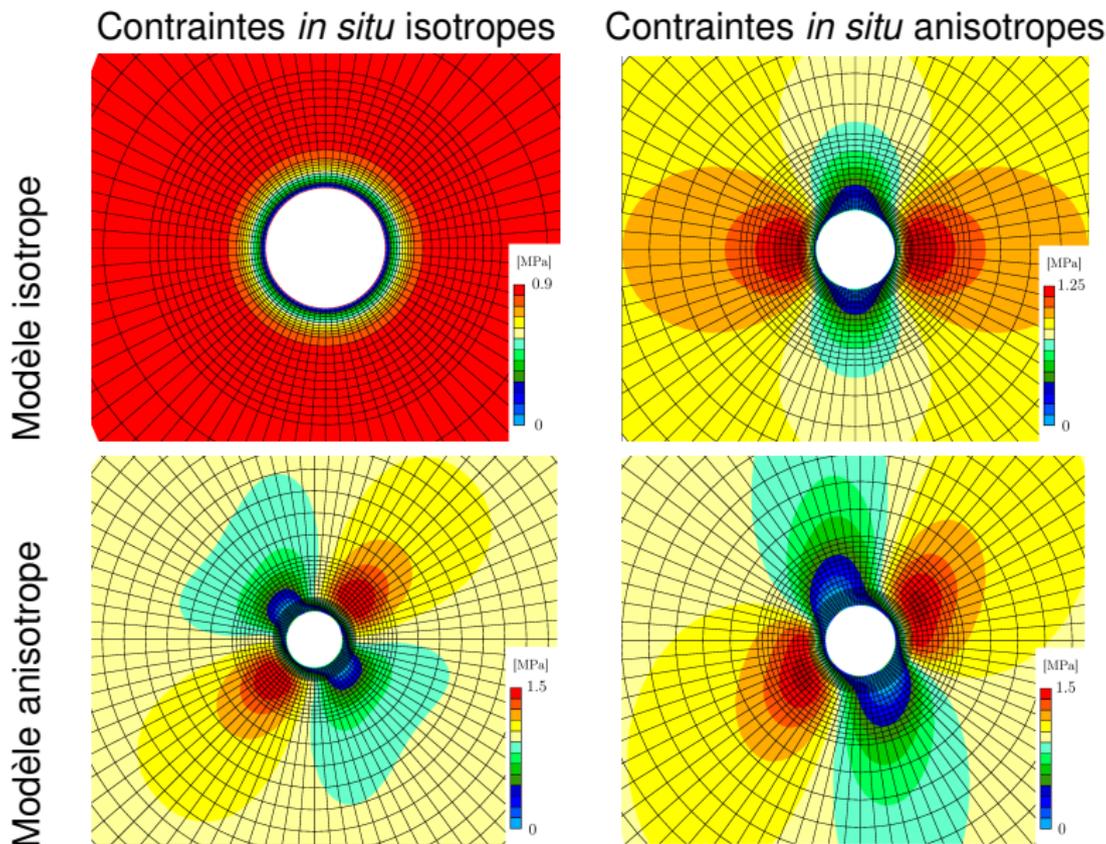
Succion :

$$\Delta P = P_w - P_v = \frac{\rho_w \cdot R \cdot T}{M_w} \cdot \ln(RH)$$

Pour $RH = 83\%$ et $T = 13^\circ C$, $\Delta P = -23.8MPa$.

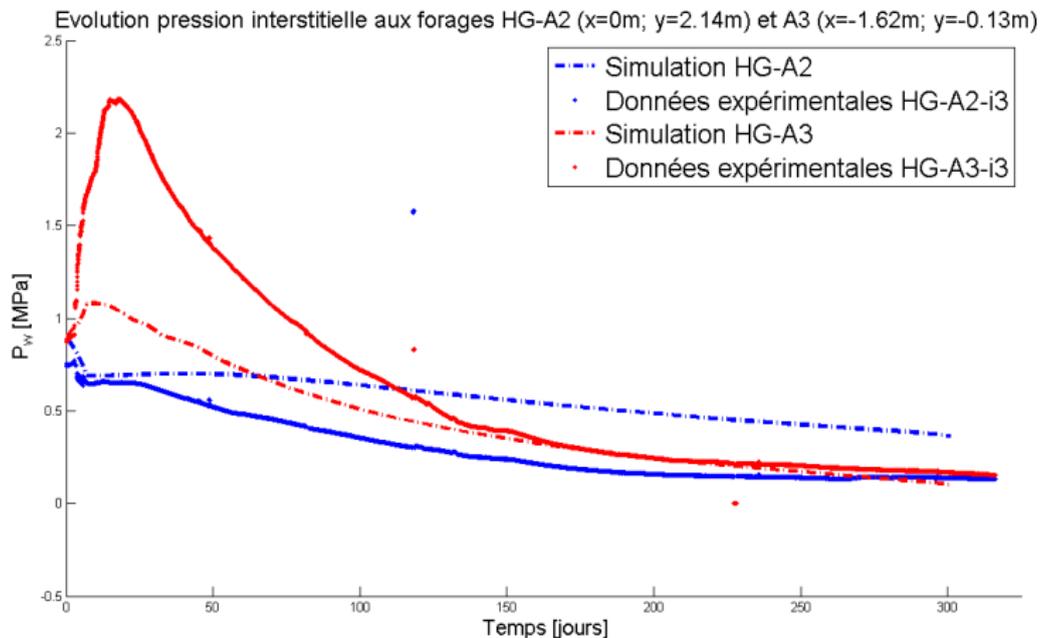


Analyse des effets des différentes anisotropies



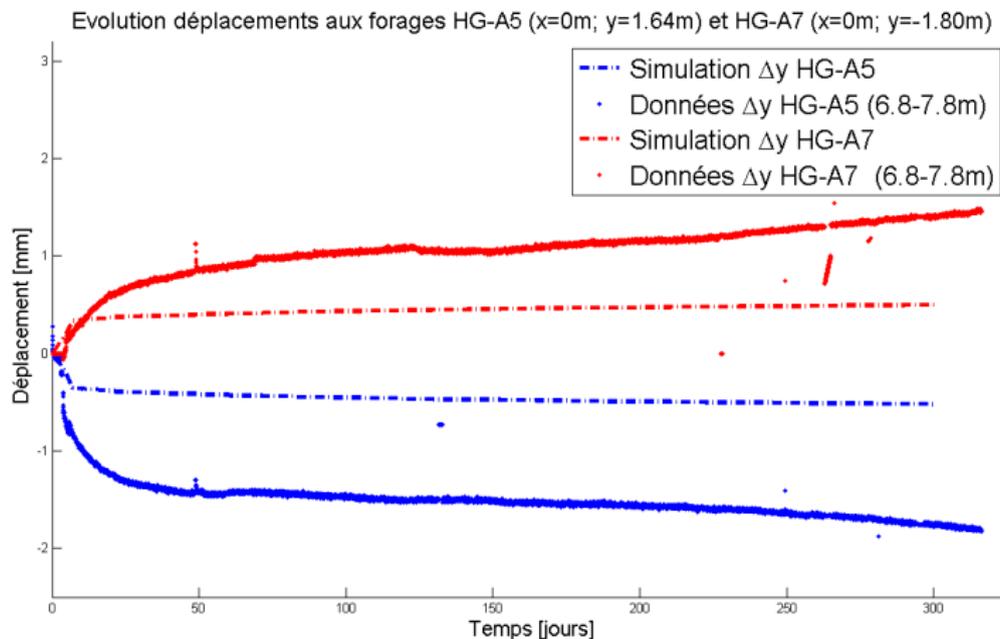
Simulation *versus* Données expérimentales

Pressions d'eau



Simulation *versus* Données expérimentales

Déplacements



Introduction d'une zone endommagée (EDZ)

Géométrie

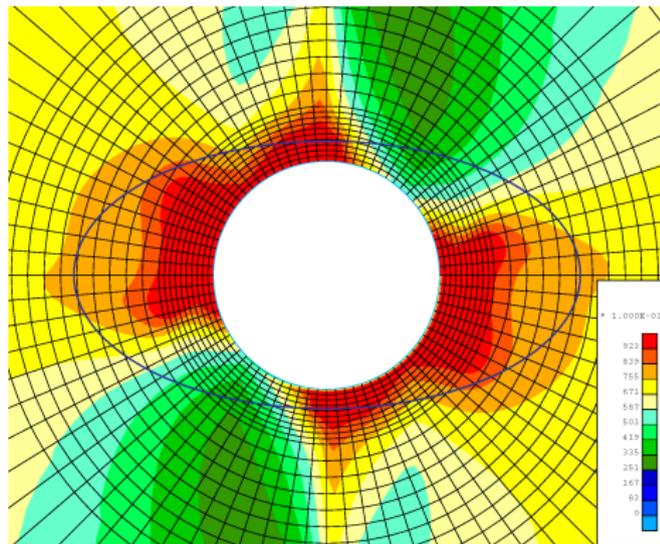
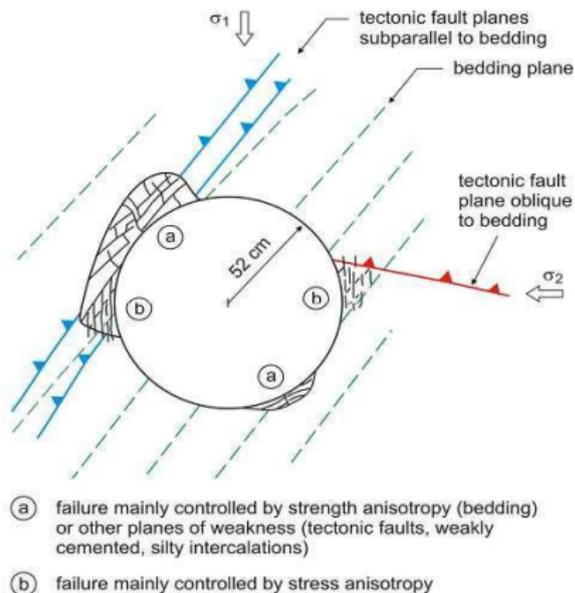


FIGURE: Source : [Marshall, 2006].

FIGURE: Indicateur plastique.

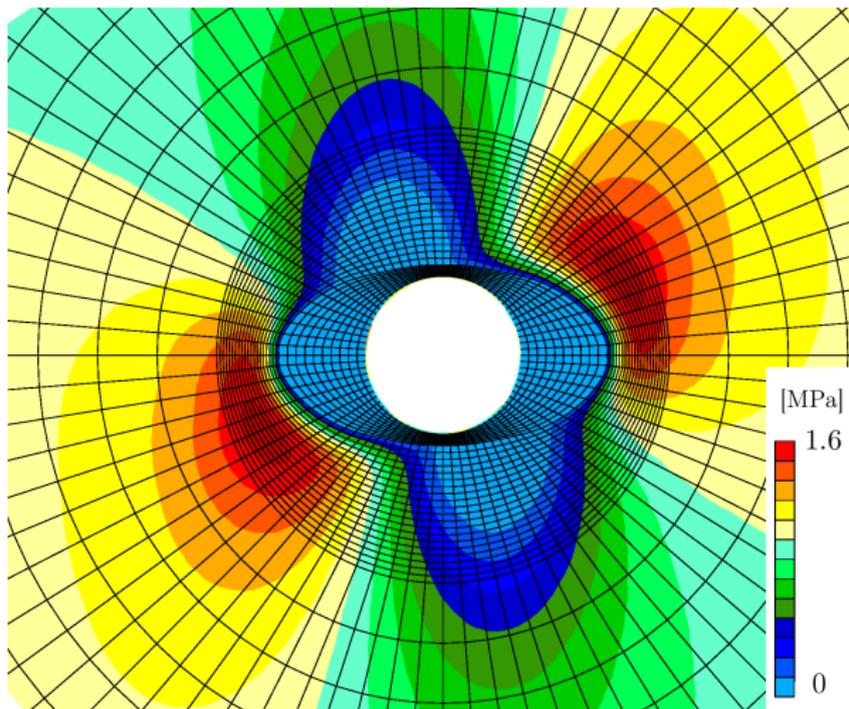
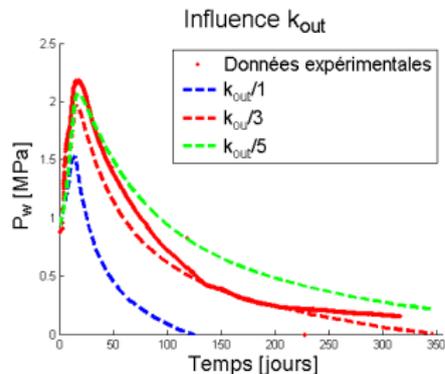
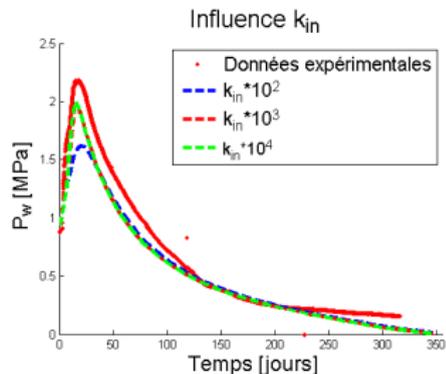
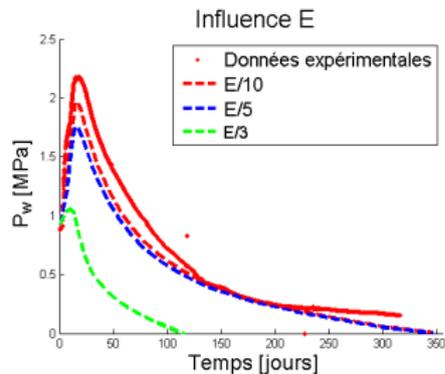
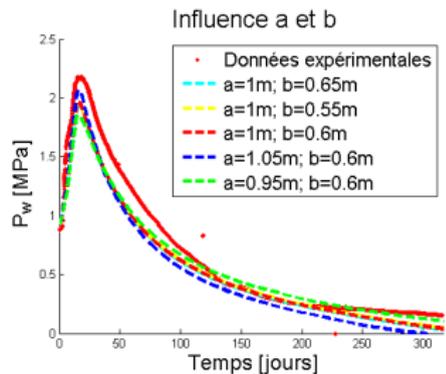


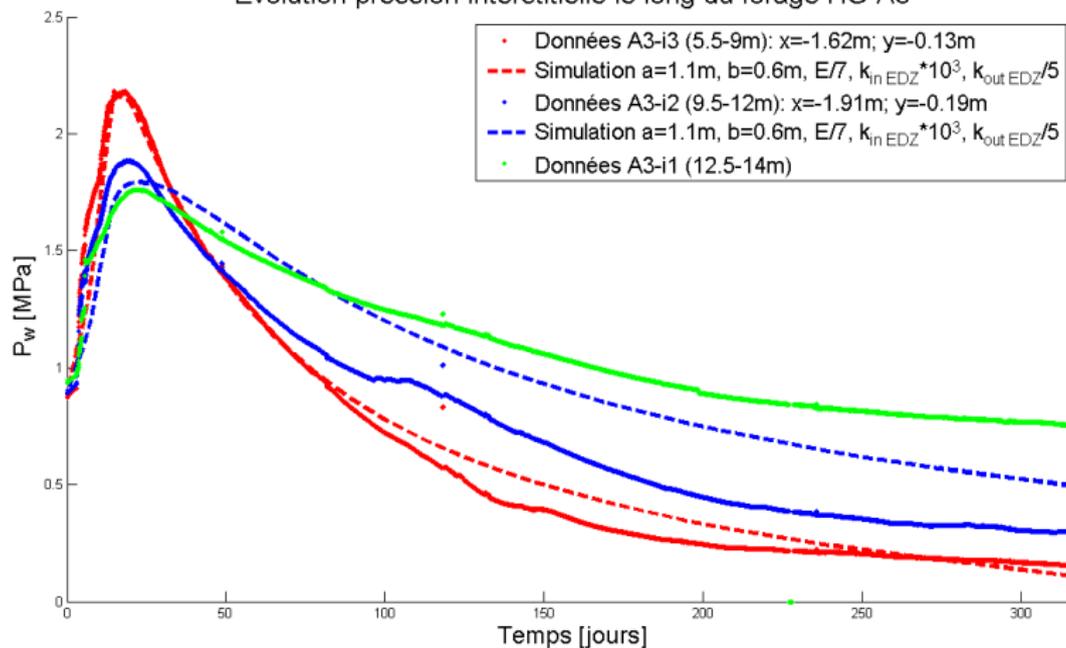
FIGURE: Pressions d'eau en fin d'excavation.



		a	E	k_{in}	k_{out}
Hauteur du pic	↗	↗	↘	↗	↘
	↘	↘	↗	↘	↗
Arrivée du pic	→	↗	↘	↘	↘
	←	↘	↗	↗	↗
Trainée de la courbe	↗	↘	—	—	↘
	↘	↗	—	—	↗

TABLE: Influence des paramètres sur la courbe des pressions d'eau.

Evolution pression interstitielle le long du forage HG-A3



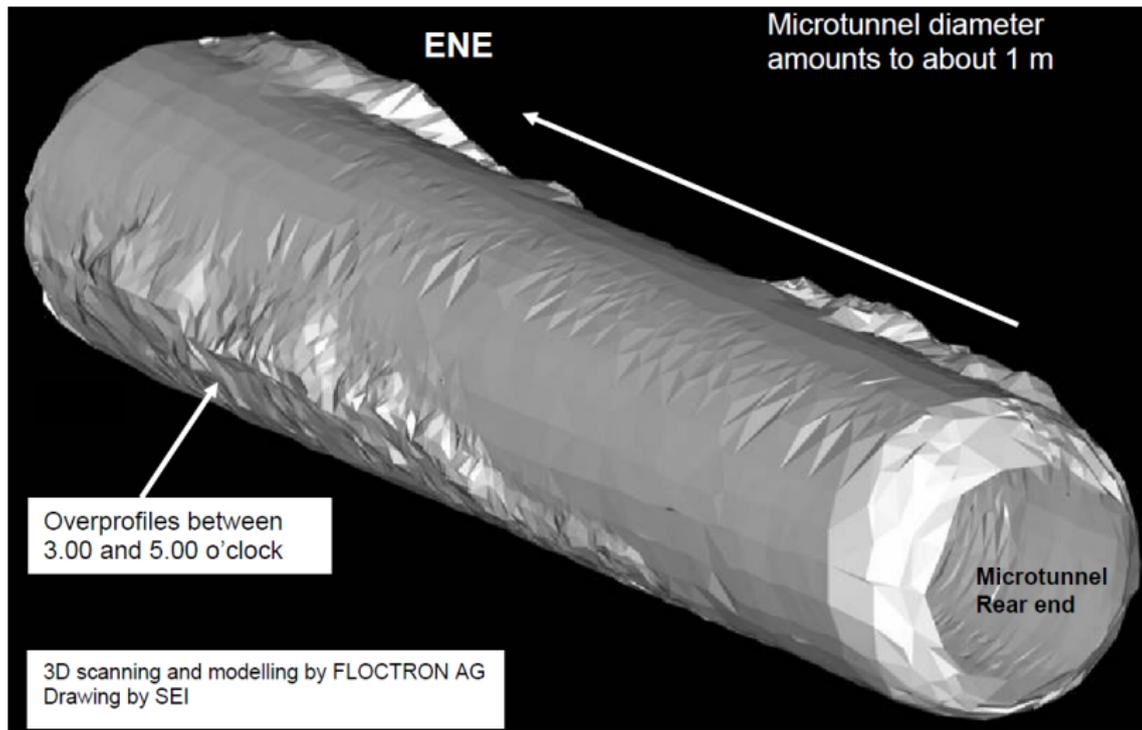
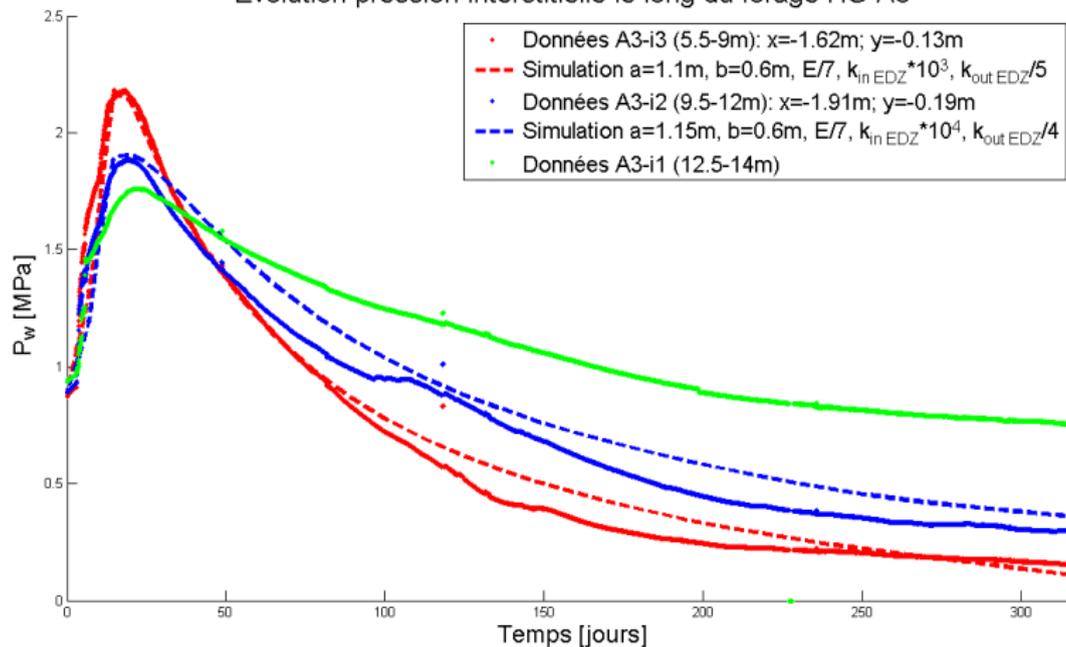
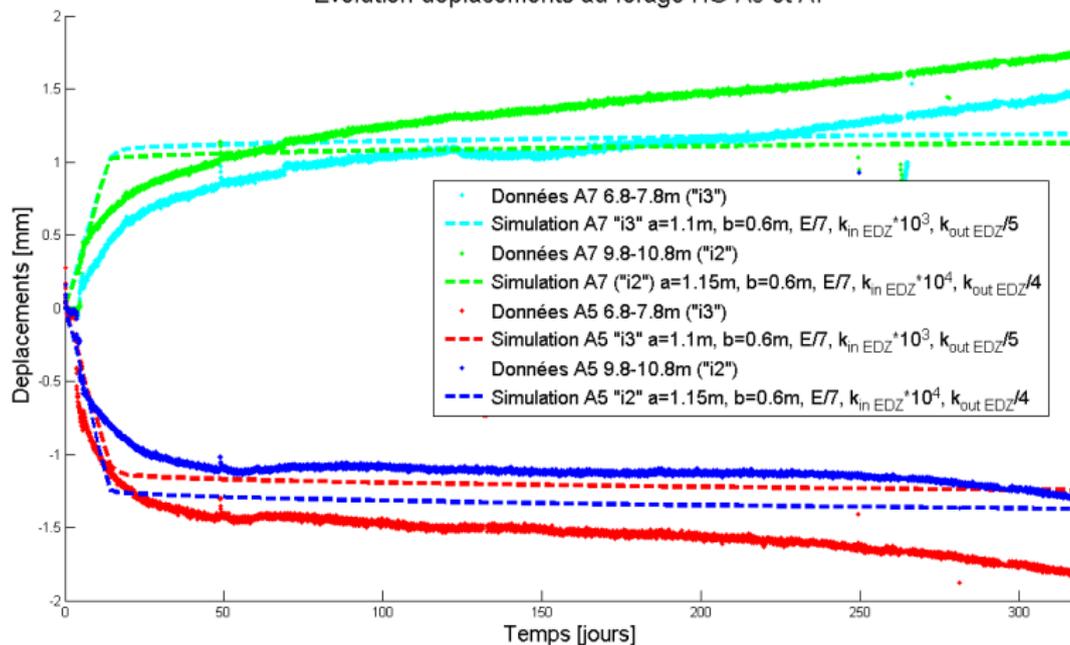


FIGURE: Source : [Xu et al, 2013].

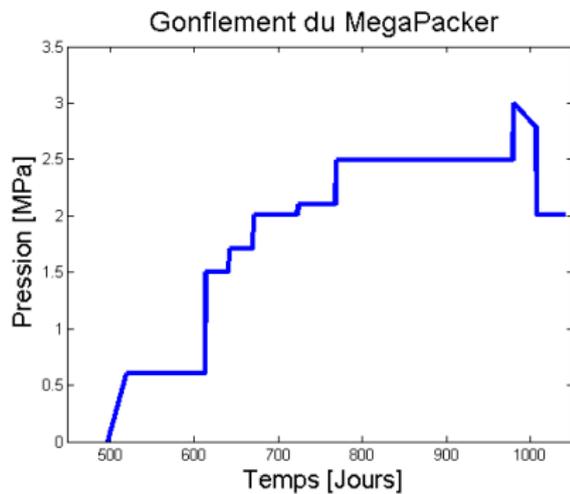
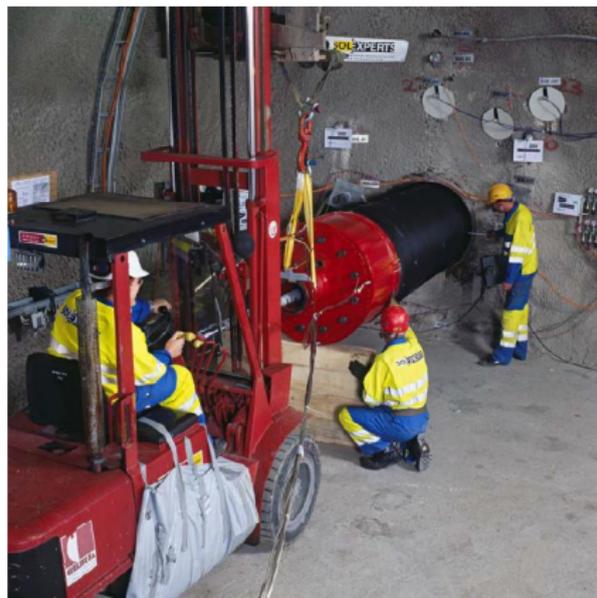
Evolution pression interstitielle le long du forage HG-A3



Evolution déplacements au forage HG-A5 et A7



Gonflement du MegaPacker



Evolution pression interstitielle HG-A3-i3

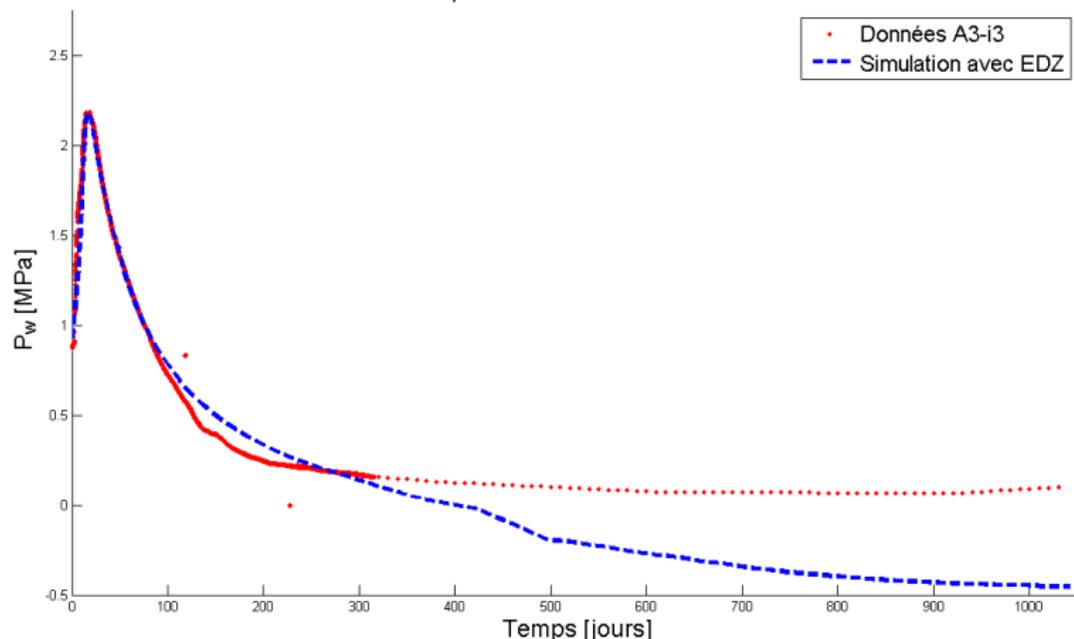


FIGURE: Evolution des pressions d'eau A3-i3 suite au gonflement du mega-packer.

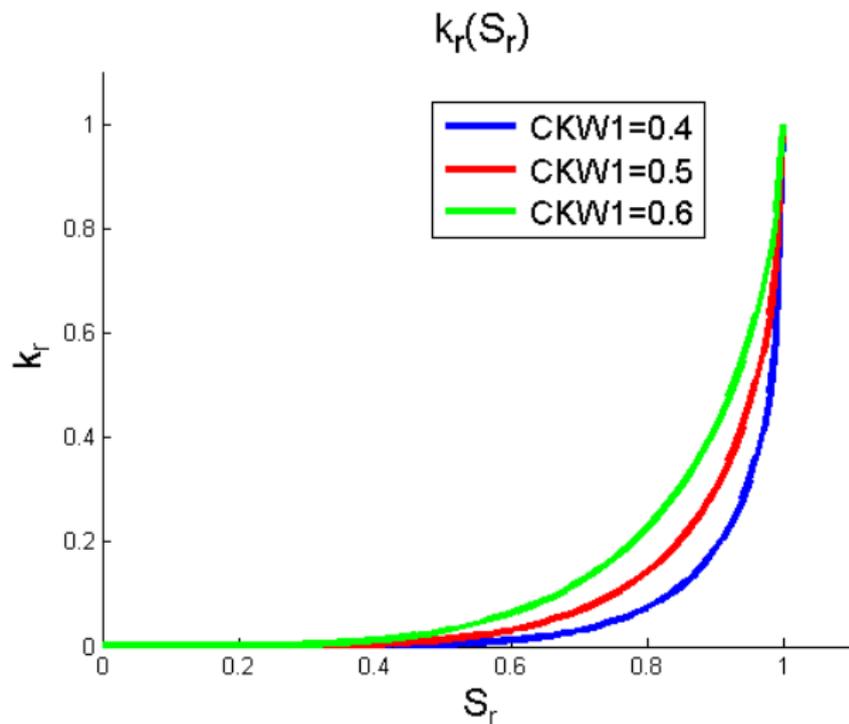


FIGURE: Evolution de k_r avec le degré de saturation S_r .

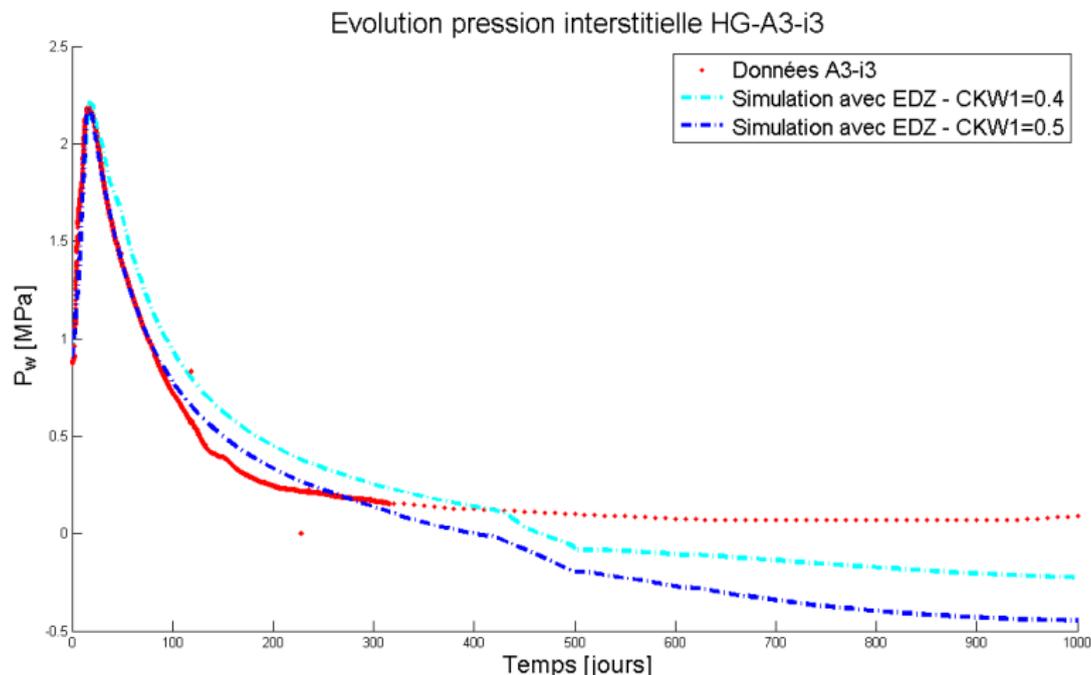


FIGURE: Evolution des pressions d'eau A3-i3 suite au gonflement du mega-packer. Modification du paramètre CKW.

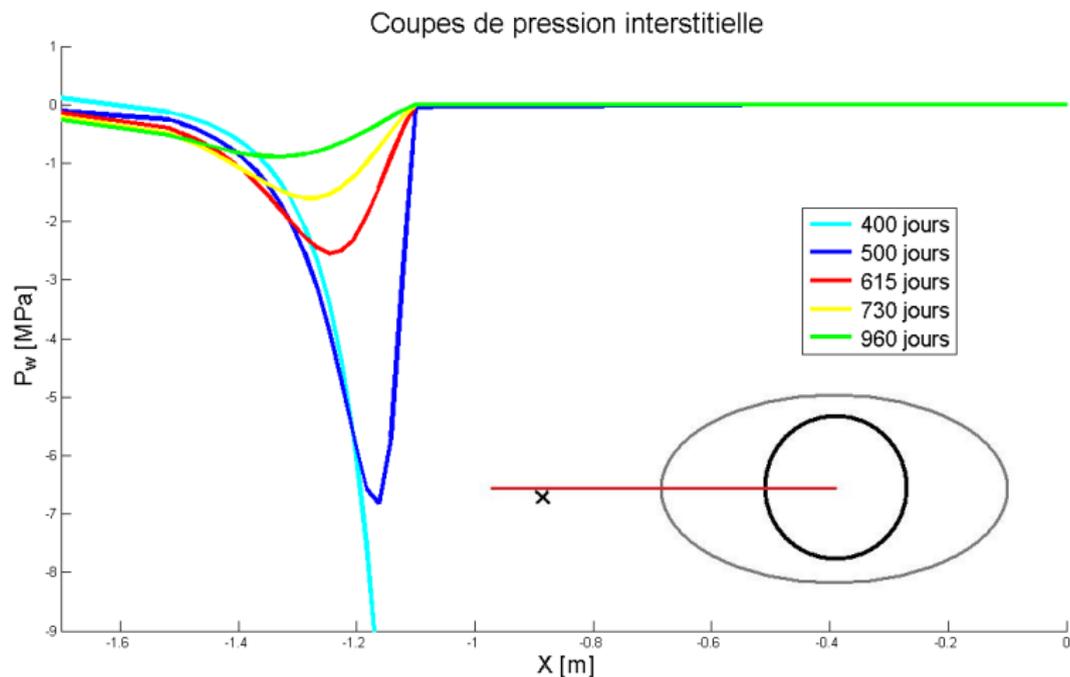


FIGURE: Coupes des pressions interstitielles à différents temps

- Nécessité d'**isoler** les **déchets radioactifs** de notre environnement.
- En Suisse, étude de l'**argile à Opalines** pour un **stockage en couche géologique profonde**.
- **Expériences** menées au laboratoire du Mont-Terri : **caractérisation** du comportement de la roche + **données**.
- Besoin d'un **modèle** pour simuler le comportement à long terme du site.
- **Paramètres** du modèle testés (et validés) *via* données des expériences. Exemple expérience *in situ* : Micro-tunnel **HG-A**
- **Proposition** d'un set de **paramètres** tenant compte d'une **EDZ** pour expliquer les pressions d'eau et déplacements lors de l'excavation-ventilation.

- Nécessité d'**isoler** les **déchets radioactifs** de notre environnement.
- En Suisse, étude de l'**argile à Opalines** pour un **stockage en couche géologique profonde**.
- **Expériences** menées au laboratoire du Mont-Terri : **caractérisation** du comportement de la roche + **données**.
- Besoin d'un **modèle** pour simuler le comportement à long terme du site.
- **Paramètres** du modèle testés (et validés) *via* données des expériences. Exemple expérience *in situ* : Micro-tunnel **HG-A**
- **Proposition** d'un set de **paramètres** tenant compte d'une **EDZ** pour expliquer les pressions d'eau et déplacements lors de l'excavation-ventilation.

- Nécessité d'**isoler** les **déchets radioactifs** de notre environnement.
- En Suisse, étude de l'**argile à Opalines** pour un **stockage en couche géologique profonde**.
- **Expériences** menées au laboratoire du Mont-Terri : **caractérisation** du comportement de la roche + **données**.
- Besoin d'un **modèle** pour simuler le comportement à long terme du site.
- **Paramètres** du modèle testés (et validés) *via* données des expériences. Exemple expérience *in situ* : Micro-tunnel **HG-A**
- **Proposition** d'un set de **paramètres** tenant compte d'une **EDZ** pour expliquer les pressions d'eau et déplacements lors de l'excavation-ventilation.

- Nécessité d'**isoler** les **déchets radioactifs** de notre environnement.
- En Suisse, étude de l'**argile à Opalines** pour un **stockage en couche géologique profonde**.
- **Expériences** menées au laboratoire du Mont-Terri : **caractérisation** du comportement de la roche + **données**.
- Besoin d'un **modèle** pour simuler le comportement à long terme du site.
- **Paramètres** du modèle testés (et validés) *via* données des expériences. Exemple expérience *in situ* : Micro-tunnel **HG-A**
- **Proposition** d'un set de **paramètres** tenant compte d'une **EDZ** pour expliquer les pressions d'eau et déplacements lors de l'excavation-ventilation.

- Nécessité d'**isoler** les **déchets radioactifs** de notre environnement.
- En Suisse, étude de l'**argile à Opalines** pour un **stockage en couche géologique profonde**.
- **Expériences** menées au laboratoire du Mont-Terri : **caractérisation** du comportement de la roche + **données**.
- Besoin d'un **modèle** pour simuler le comportement à long terme du site.
- **Paramètres** du modèle testés (et validés) *via* données des expériences. Exemple expérience *in situ* : Micro-tunnel **HG-A**
- **Proposition** d'un set de **paramètres** tenant compte d'une **EDZ** pour expliquer les pressions d'eau et déplacements lors de l'excavation-ventilation.

- Nécessité d'**isoler** les **déchets radioactifs** de notre environnement.
- En Suisse, étude de l'**argile à Opalines** pour un **stockage en couche géologique profonde**.
- **Expériences** menées au laboratoire du Mont-Terri : **caractérisation** du comportement de la roche + **données**.
- Besoin d'un **modèle** pour simuler le comportement à long terme du site.
- **Paramètres** du modèle testés (et validés) *via* données des expériences. Exemple expérience *in situ* : Micro-tunnel **HG-A**
- **Proposition** d'un set de **paramètres** tenant compte d'une **EDZ** pour expliquer les pressions d'eau et déplacements lors de l'excavation-ventilation.

