

# 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

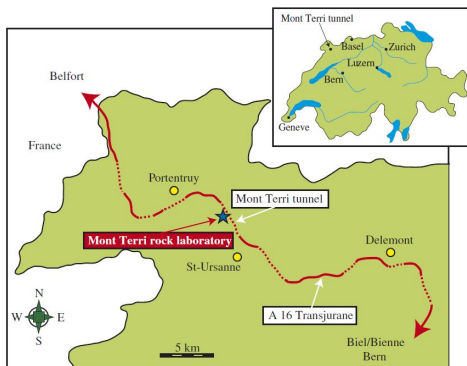
Juin 2014

## 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

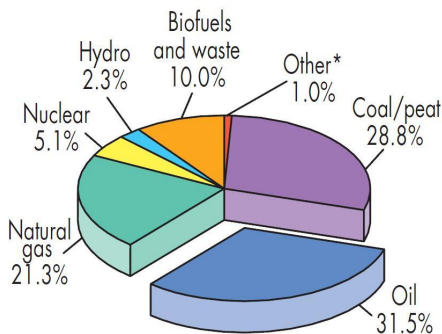
- Constat
- Conséquence
- Solution

## 2 Laboratoire du Mont-Terri

## 3 Modèles physiques

## 4 Modélisation

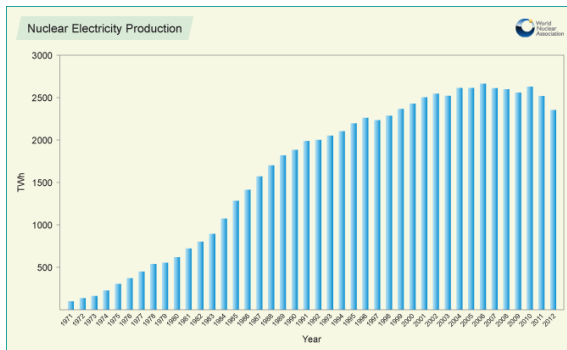
## Utilisation de la **fission nucléaire** pour **produire de l'électricité** 15% de l'électricité mondiale



**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

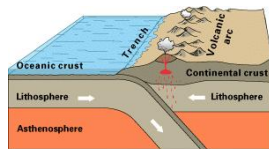


Suisse : 100 000  $m^3$  de déchets radioactifs à terme



Largage en mer

Envoi dans l'espace



Oceanic-continental convergence

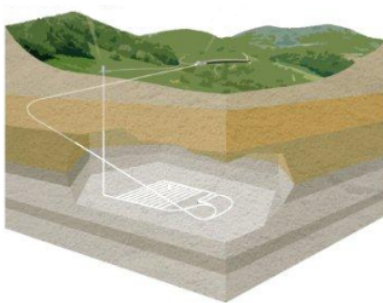
Zone de subduction



# 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

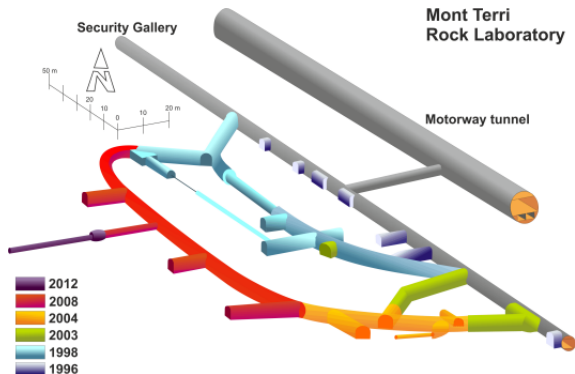
## 2 Laboratoire du Mont-Terri

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

## 3 Modèles physiques

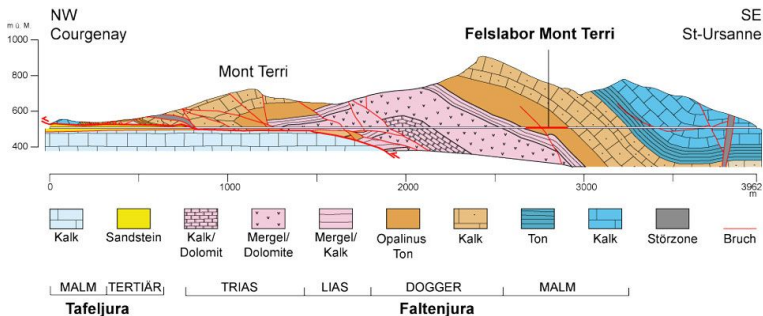
## 4 Modélisation

Projet international de recherche.



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

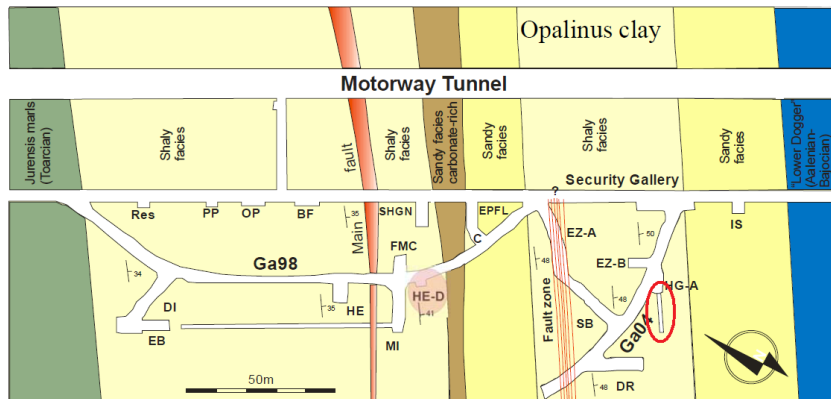
Pendage des couches de **45°** vers le SSE aux environs du laboratoire.  
≈ 300m de roches surincombantes (jusqu'à 1000m dans le passé).



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

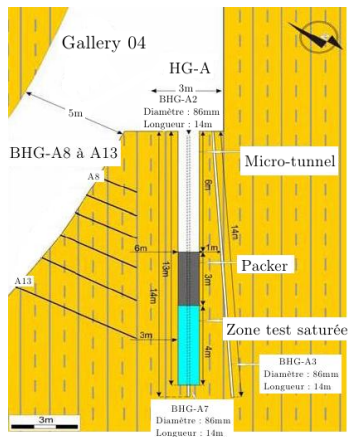
Laboratoire compris dans une couche de 160m d'épaisseur :  
argile à Opalines (*Leioceras Opalinum*).

# L'argile à Opalines

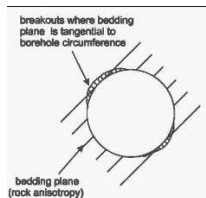


**FIGURE:** Carte géologique des faciès de l'argile à Opalines aux environs du laboratoire souterrain du Mont Terri. *Source :* [Wileveau, 2005].

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.



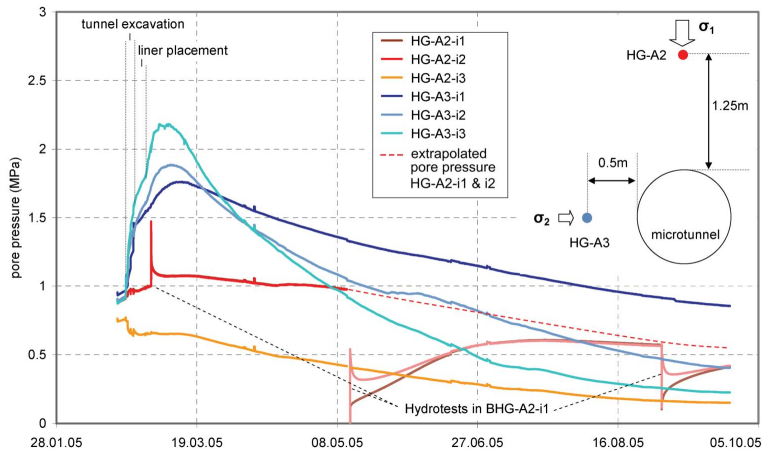


FIGURE: Evolution des pressions d'eau. Source : [Marshall, 2006].

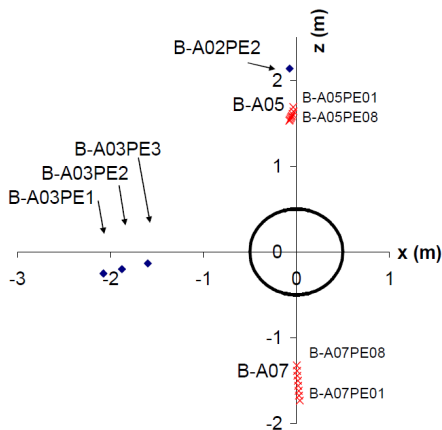
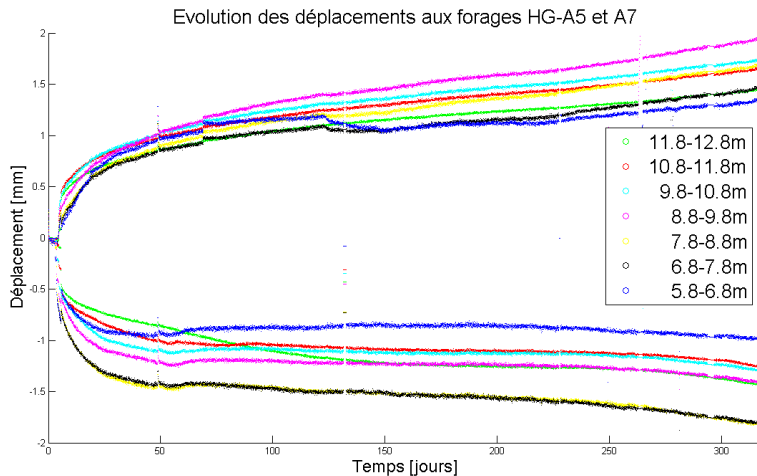


FIGURE: Positions des capteurs. *Source* : [Collin, 2012].





**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 :**

$k_{=w,sat}$ ,  $\rho_w$ ,  $\mu_w$ ,  $\chi_w$ , CSR1 et CSR2, CKW1.

- **Mécanique :**

$E$ ,  $\nu$ ,  $c$ ,  $\phi$ .

→ 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 :**

$k_{w,sat}$ ,  $\rho_w$ ,  $\mu_w$ ,  $\chi_w$ , CSR1 et CSR2, CKW1.

- **Mécanique :**

$E$ ,  $\nu$ ,  $c$ ,  $\phi$ .

→ 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 :**

$k_{w,sat}$ ,  $\rho_w$ ,  $\mu_w$ ,  $\chi_w$ , CSR1 et CSR2, CKW1.

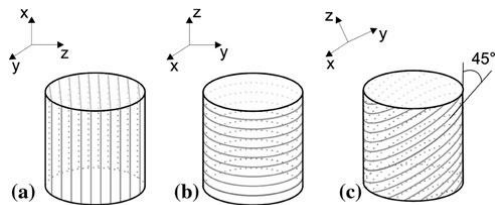
- **Mécanique :**

$E$ ,  $\nu$ ,  $c$ ,  $\phi$ .

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

## Comportement **anisotrope**

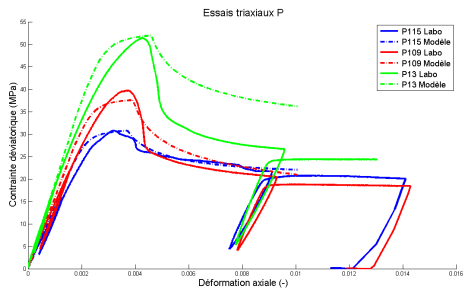
→ Réponse mécanique affectée par la direction de chargement.



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

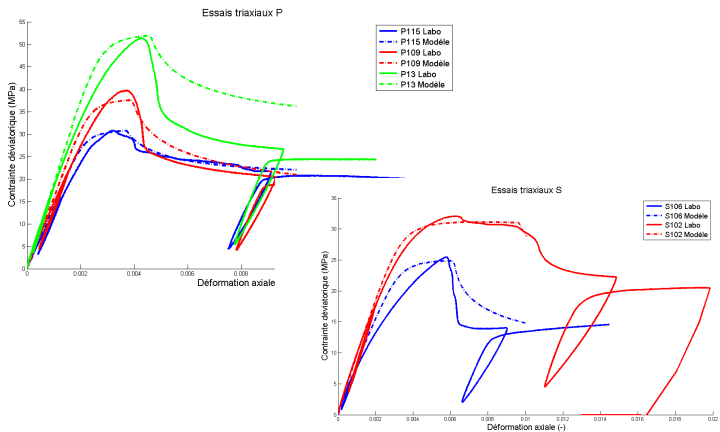
# Caractérisation

## Essais triaxiaux



# Caractérisation

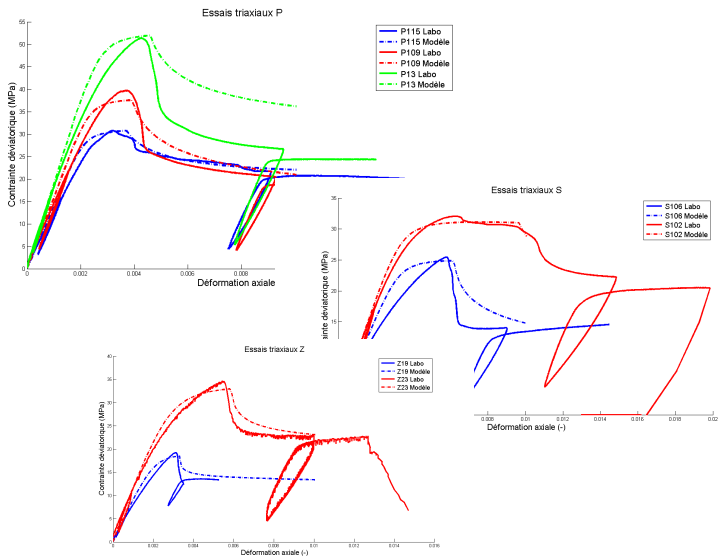
## Essais triaxiaux





# Caractérisation

## Essais triaxiaux



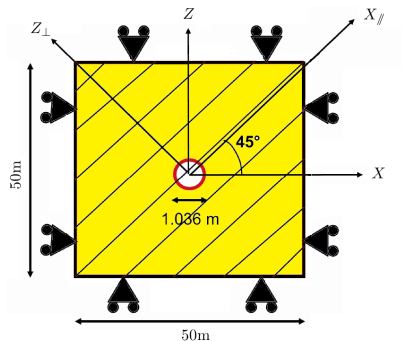
1 Contexte

2 Laboratoire du Mont-Terri

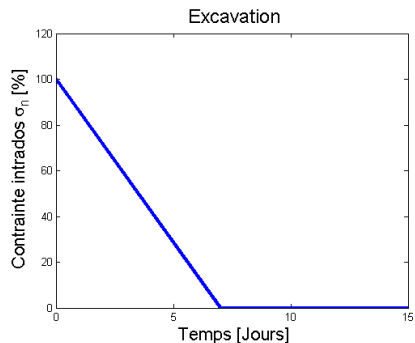
3 Modèles physiques

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)

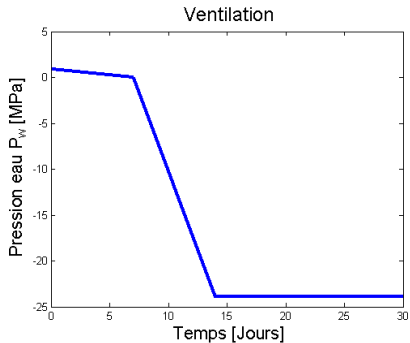
Paroi du tunnel :

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

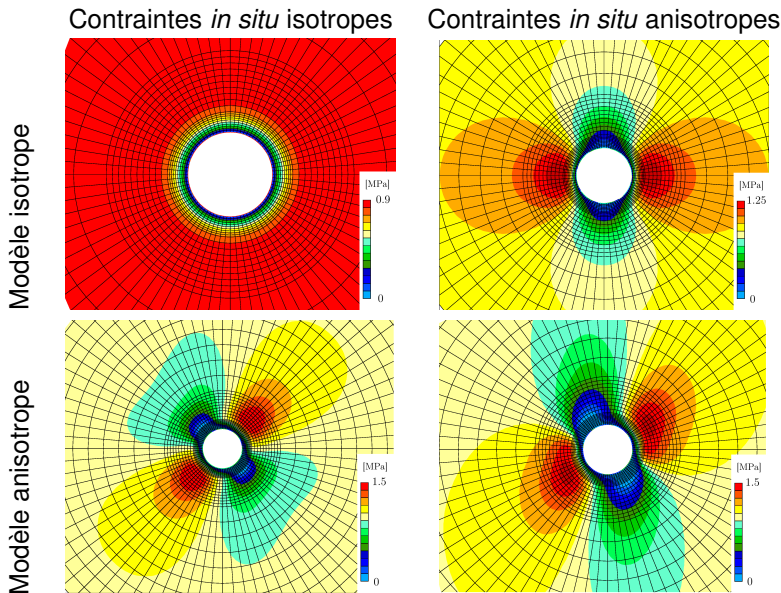
Succion :

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

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

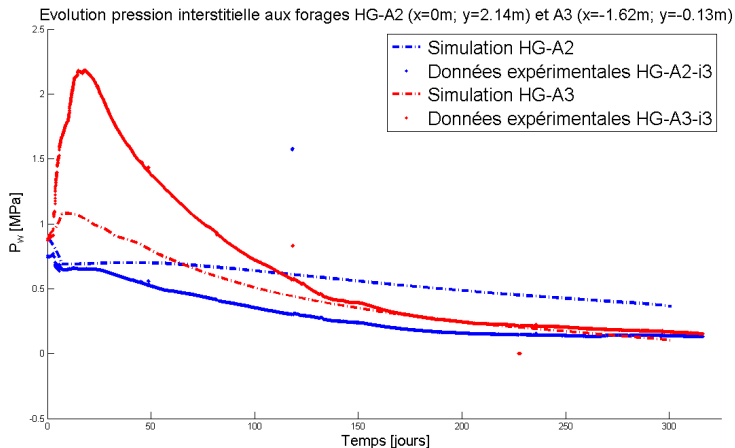


# Analyse des effets des différentes anisotropies



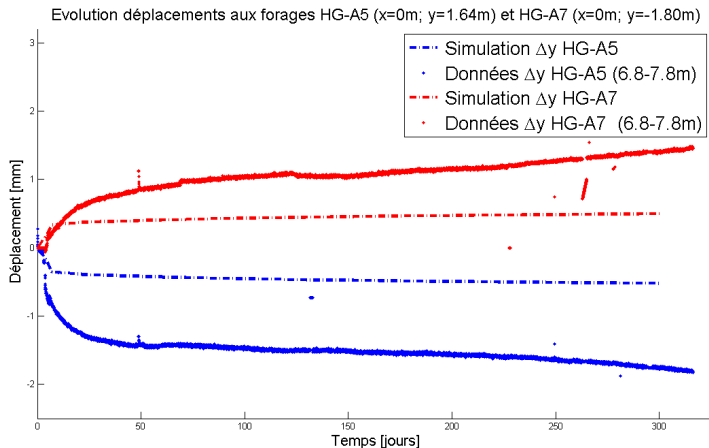
# Simulation *versus* Données expérimentales

## Pressions d'eau



# Simulation *versus* Données expérimentales

## Déplacements





# Introduction d'une zone endommagée (EDZ)

## Géométrie

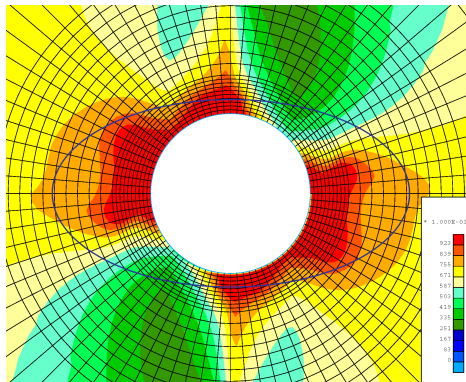
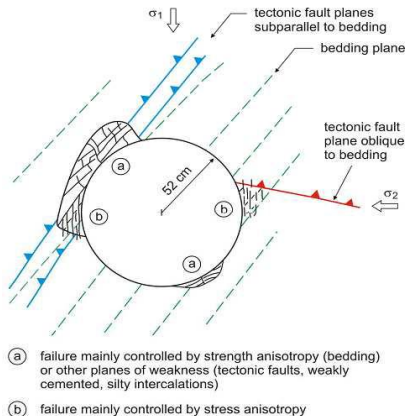
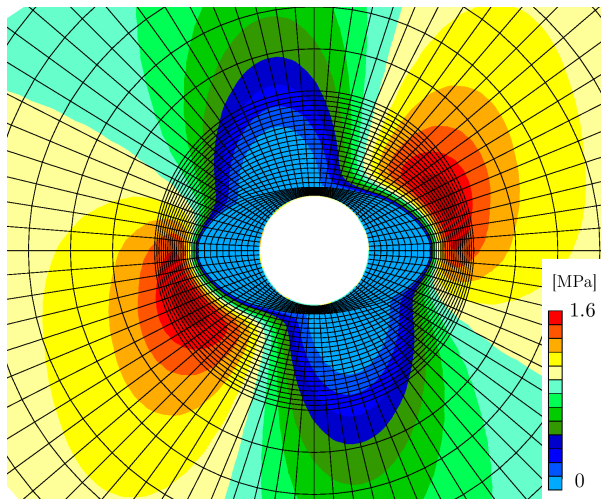
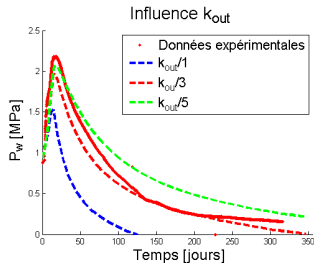
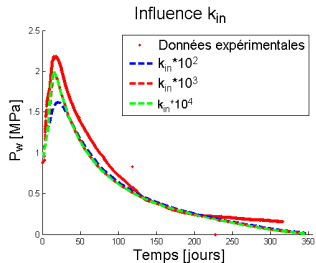
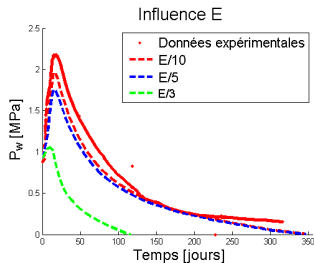
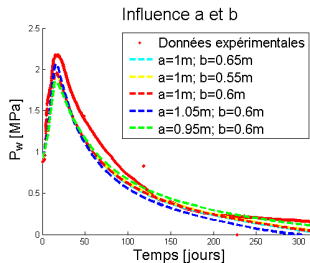


FIGURE: Source : [Marshall, 2006].

FIGURE: Indicateur plastique.



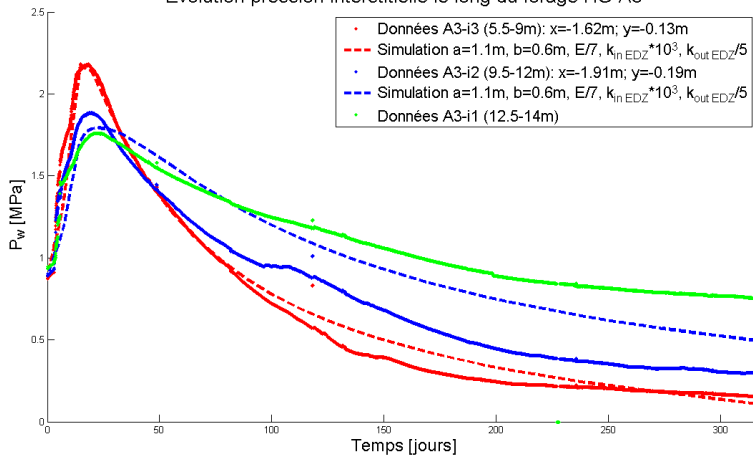
**FIGURE:** Pressions d'eau en fin d'excavation.

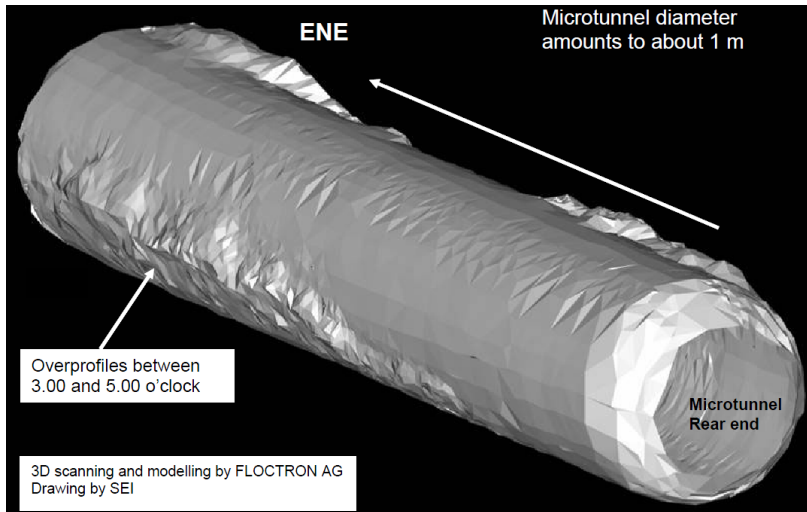


		$a$	$E$	$k_{in}$	$k_{out}$
Hauteur du pic	↗	↗	↘	↗	↘
	↘	↘	↗	↘	↗
Arrivée du pic	→	↗	↘	↘	↘
	←	↘	↗	↗	↗
Trainée de la courbe	↗	↘	—	—	↘
	↘	↗	—	—	↗

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

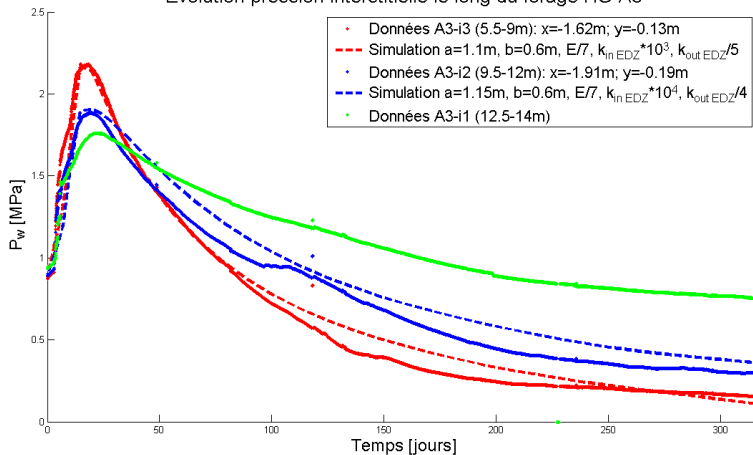
## Evolution pression interstitielle le long du forage HG-A3



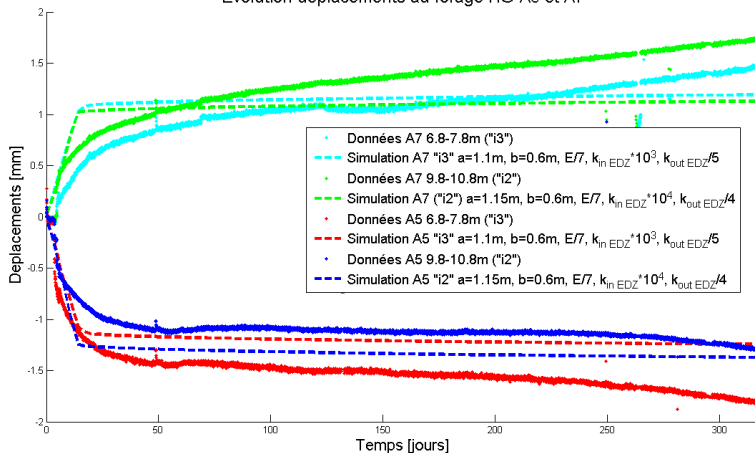


**FIGURE:** Source : [Xu et al, 2013].

Evolution pression interstitielle le long du forage HG-A3

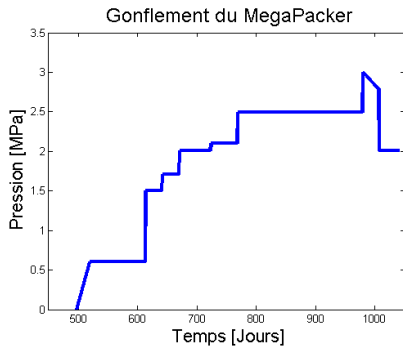
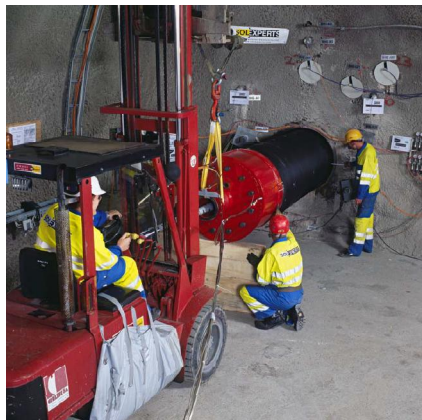


Evolution déplacements au forage HG-A5 et A7

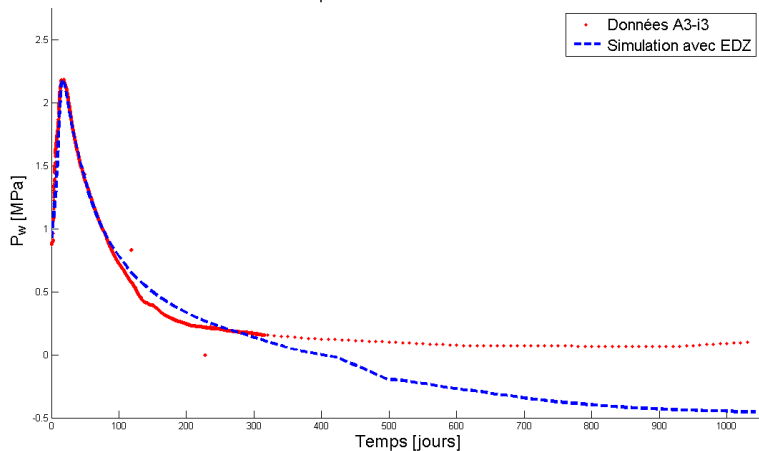




# Gonflement du MegaPacker



Evolution pression interstitielle HG-A3-i3



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

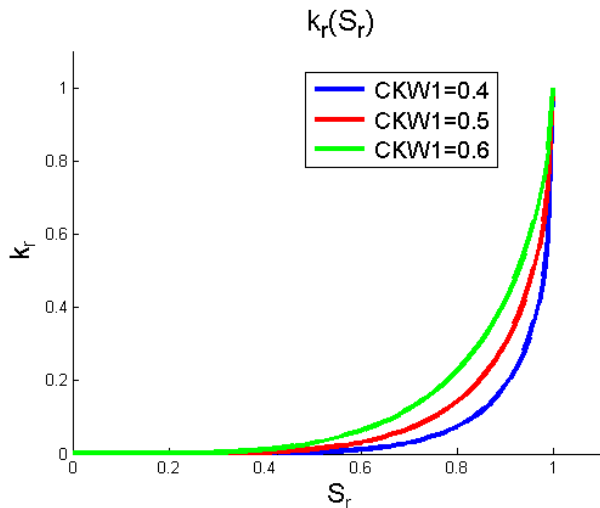
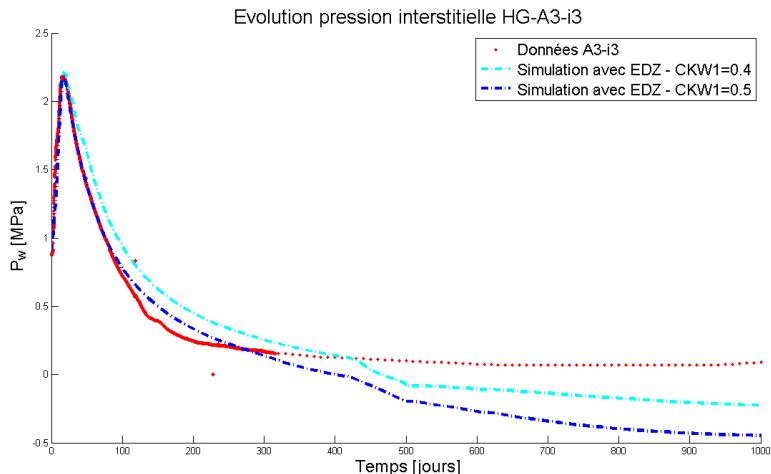


FIGURE: Evolution de  $k_r$  avec le degré de saturation  $S_r$ .



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

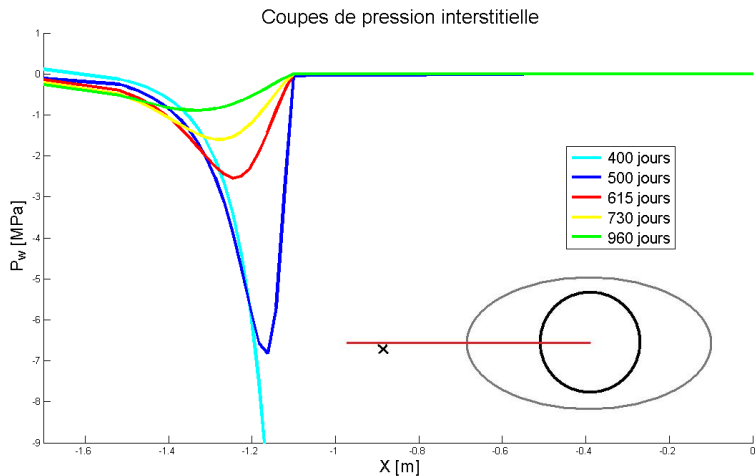


FIGURE: Coupes des pressions interstitielles à différents temps

- 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.

