



# Modélisation hydromécanique d'une excavation souterraine avec une loi de comportement élastoviscoplastique et régularisation

**Journée Technique CFMR  
27 Octobre 2011, Paris**

Présenté au 12<sup>ème</sup> Congrès International de  
Mécanique des Roches à Pékin (Chine)

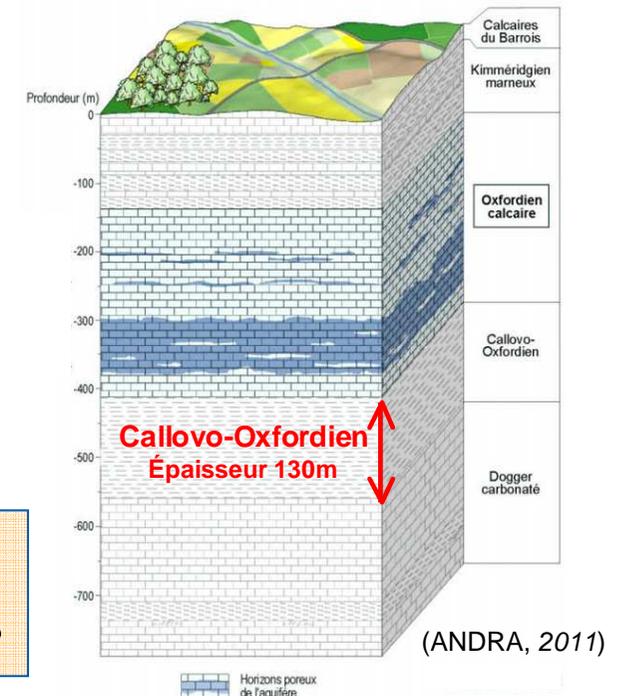
**Dr. Roland Plassart**  
EDF & Laego (INPL, Nancy)



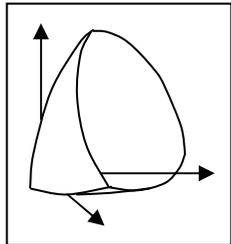
# Introduction

- ▶ Nécessité de gérer les déchets nucléaires HAVL (Haute Activité Vie Longue)
  - Solution envisagée : enfouissement en couche géologique profonde
  - ANDRA : Laboratoire de recherche souterrain de Bure (Centre de Meuse/Haute-Marne)
- ▶ Géomorphologie et géologie favorables
  - Argilite du Callovo-Oxfordien (COx)
- ▶ Stockage : plusieurs milliers d'années...
  - dimensionnement des ouvrages de génie civil : ~100 ans
- ▶ EDF producteur de déchets (~80%)
  - Projet HAVL : optimisation des ouvrages

Modélisation prenant en compte le couplage hydromécanique et les effets mécaniques différés



# Sommaire



**Cadre de l'étude et problématique**

**Partie 1 : Le modèle**

- 1. Modèle utilisé**
- 2. Calage**

**Partie 2 : Application sur ouvrage**

- 3. Présentation de l'étude**
- 4. Principaux résultats**

**Conclusions et perspectives**

# 1. Modèle L&K (1/3)

- Loi de comportement élastoviscoplastique : modèle L&K (Kleine, 2007)
- Le massif rocheux est assimilé à un milieu continu
- Le tenseur des déformations est décomposé en 3 parties :

$$\underline{\underline{\dot{\epsilon}}} = \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^e + \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{ep} + \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{vp}$$

poroélasticité

(Coussy, 1991)  
→ Contrainte effective

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - b p_w \delta_{ij}$$

Coefficient de Biot  $0 \leq b \leq 1$

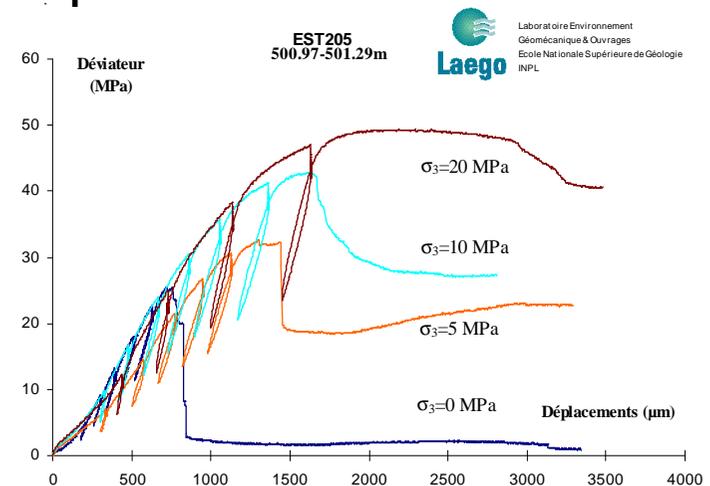
→ Loi de Darcy

élastoplasticité

→ Comportement fragile ou ductile selon le confinement

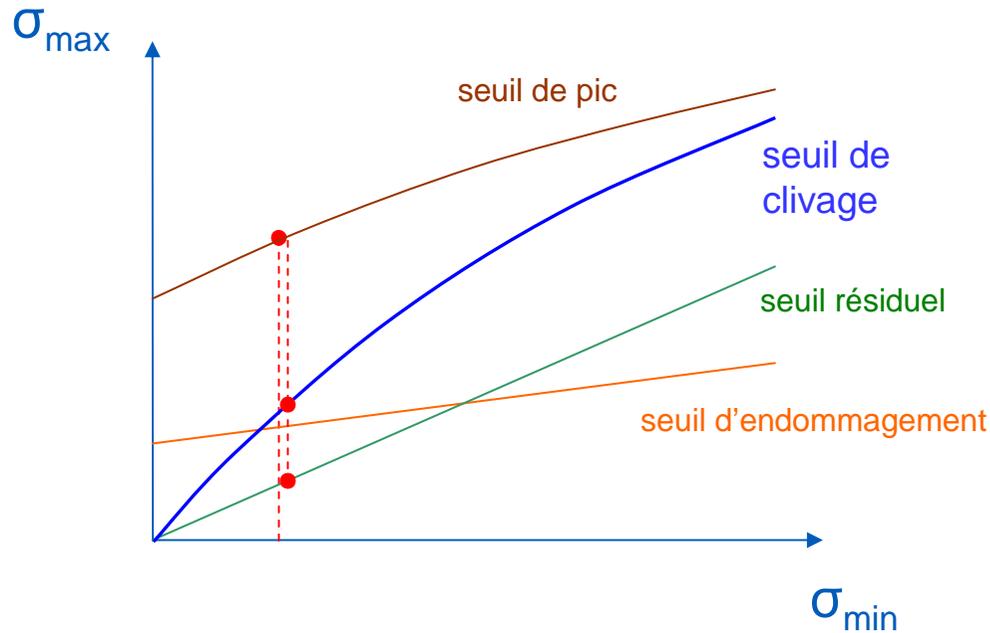
→ Loi de dilatance qui contrôle la déformation volumique

viscoplasticité

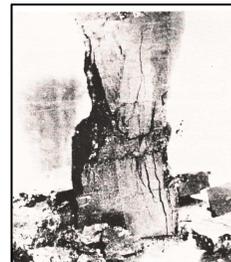


# 1. Modèle L&K (2/3)

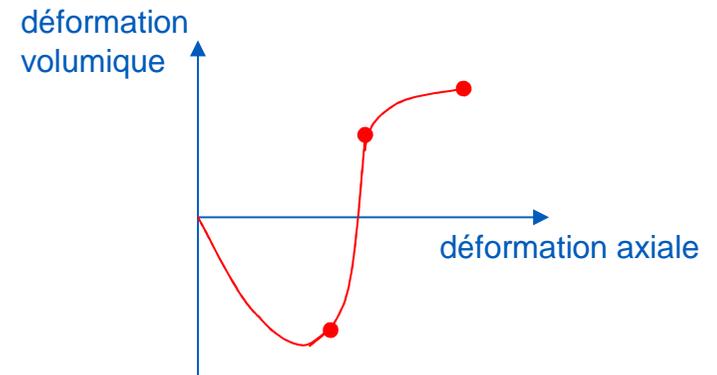
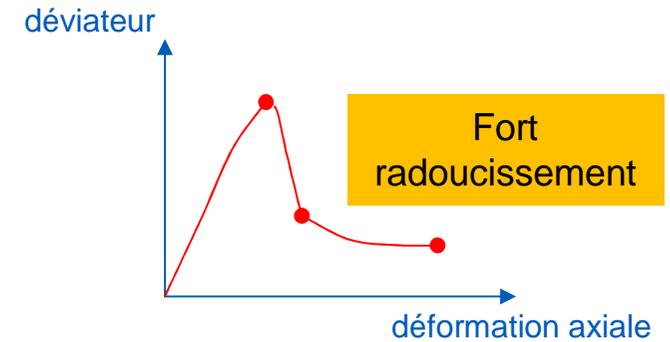
## ► Mécanisme élastoplastique :



**Rupture par fissures d'extension**

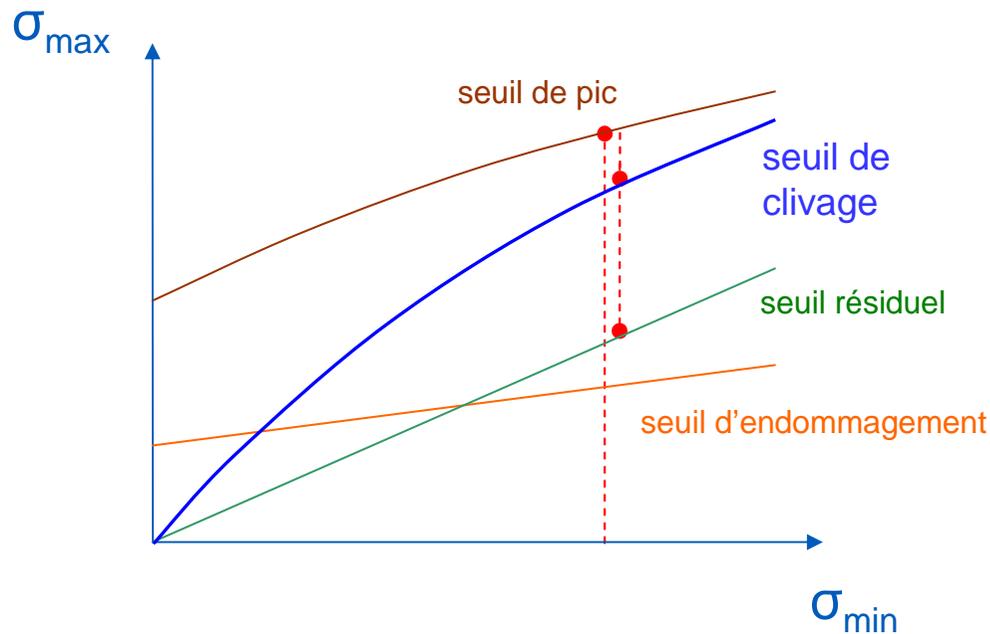


Faible confinement

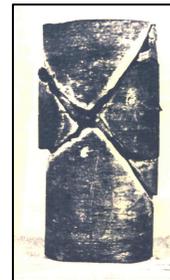


# 1. Modèle L&K (2/3)

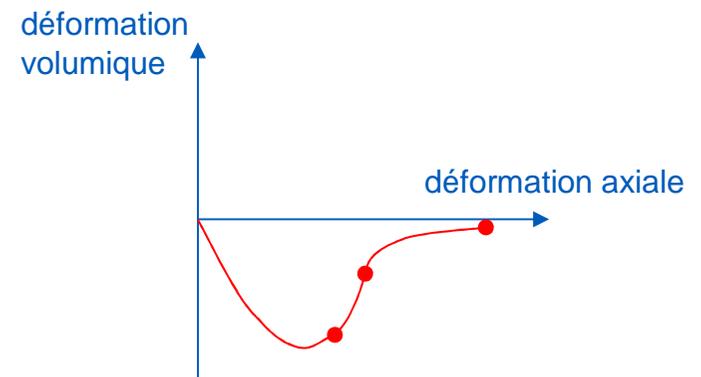
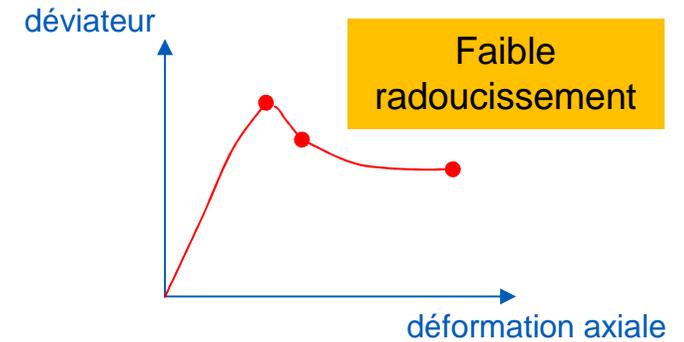
## ► Mécanisme élastoplastique :



**Rupture par bandes de cisaillement**



**Fort confinement**

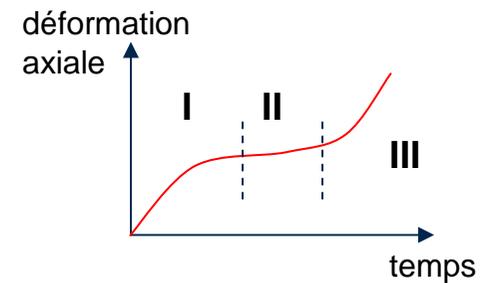
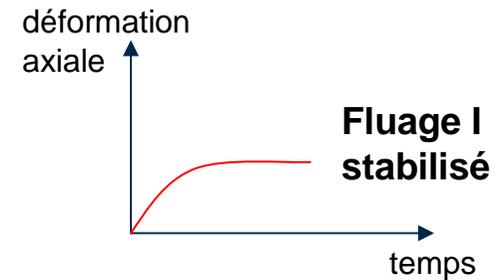
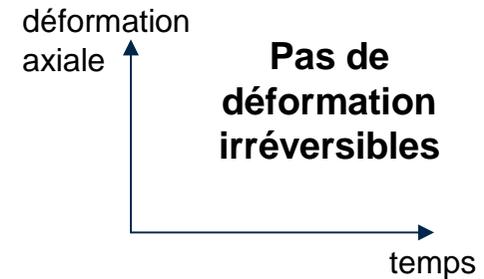
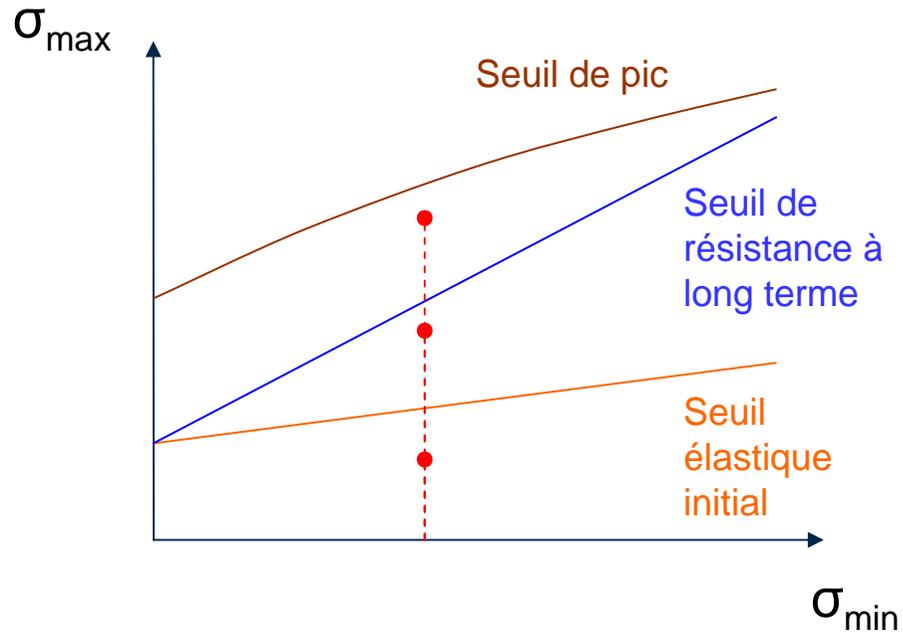


# 1. Modèle L&K (3/3)

## ► Mécanisme viscoplastique :

→ Théorie de Perzyna :

$$\Phi(F^{vp}) = A_v \left( \frac{\langle F^{vp} \rangle}{P_a} \right)^{n_v}$$



## 2. Paramètres de l'argilite du COx (1/2)

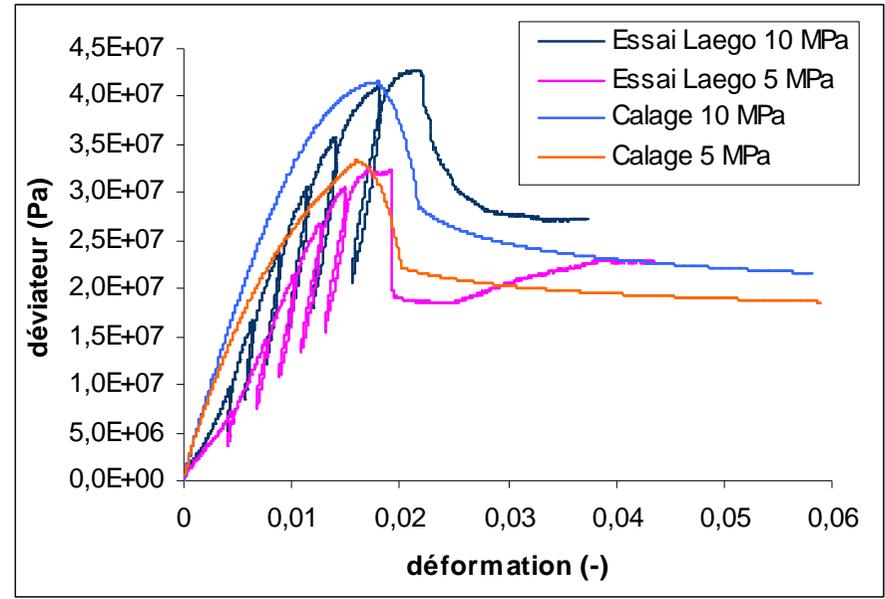
◆ Principaux paramètres :

Young's modulus E	4 GPa
Poisson's coefficient $\nu$	0.12
Volumetric mass	2470 kg / m <sup>3</sup>
Compression strength $\sigma_c$	22 MPa
Porosity n	18%
Biot's coefficient b	0.6
Intrinsic permeability $k_{int}$	1.10 <sup>-20</sup> m <sup>2</sup>

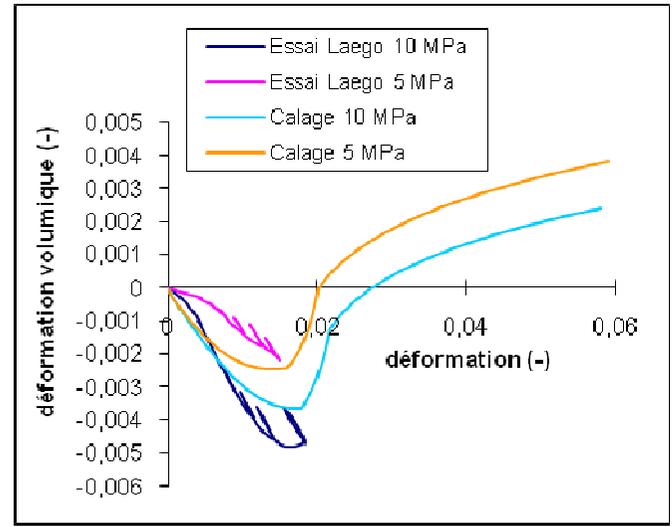
Propriétés HM

◆ Calage sur **essais triaxiaux non drainés** (Hoxha, 2004)

Courbes contrainte-déformation

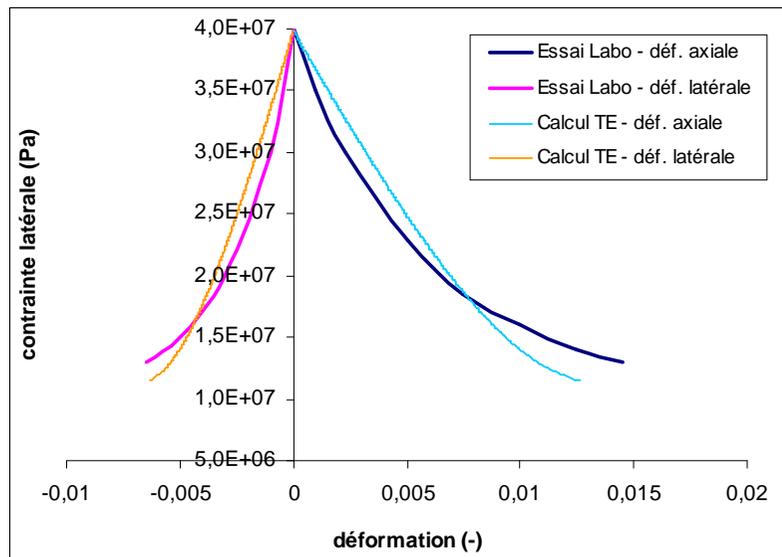


Courbes déformation volumique



## 2. Paramètres de l'argilite du COx (2/2)

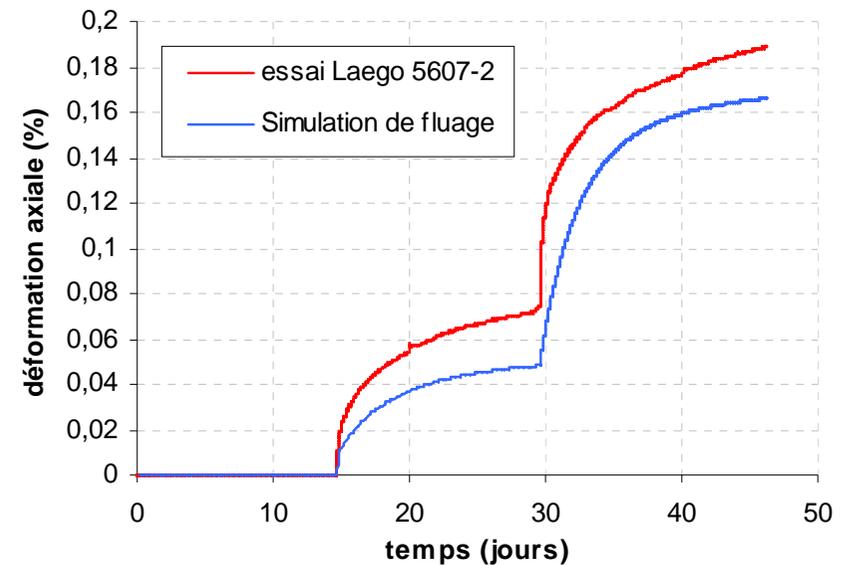
- ▶ Autre chemin de contrainte :  
→ Essai triaxial en extension à pression moyenne constante



Essai triaxial en extension

- ▶ Essai avec effet du temps :  
→ Détermination des paramètres de viscosité

### Essai de fluage



- Paramètres fixés et non modifiés par la suite
- Validé sur d'autres chemins de contrainte



## Partie 2 : Modélisation et principaux résultats

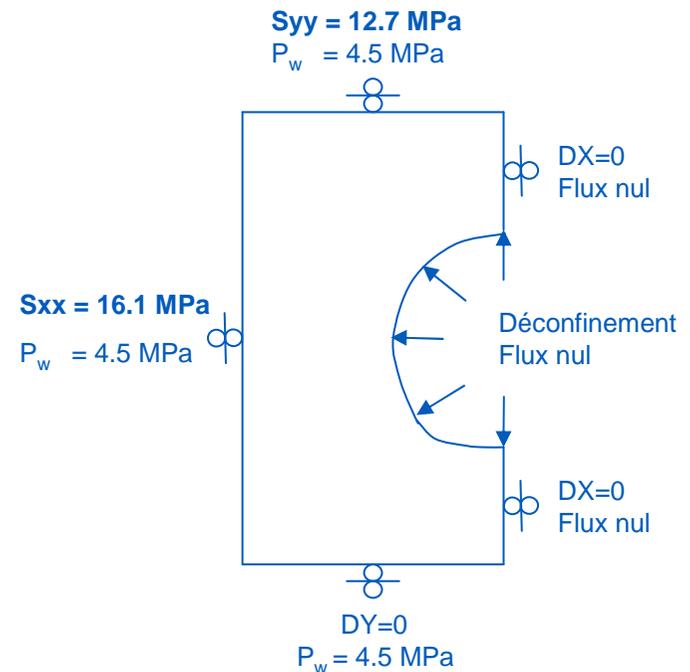
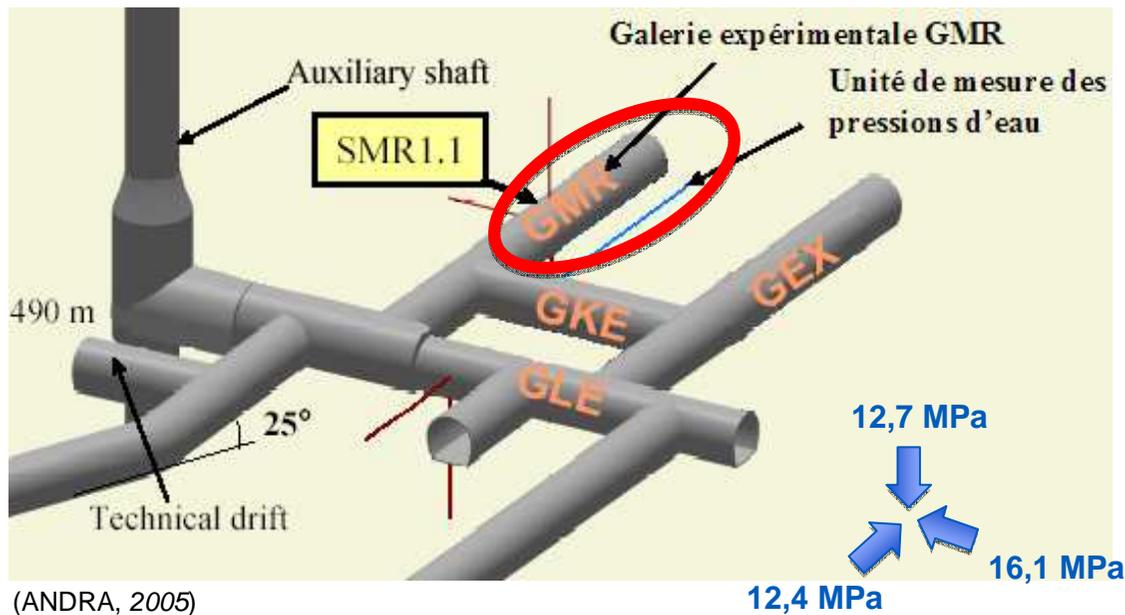
- 3. Cadre de la modélisation
- 4. Résultats

# 3. Cadre de la modélisation (1/2)



## ► Galerie GMR du centre de Meuse/Hte-Marne

- Excavation 2D en fer à cheval par déconfinement progressif pendant 20 jours (méthode convergence confinement)
- Pression d'eau initiale de 4,5 MPa et flux nul imposé en paroi

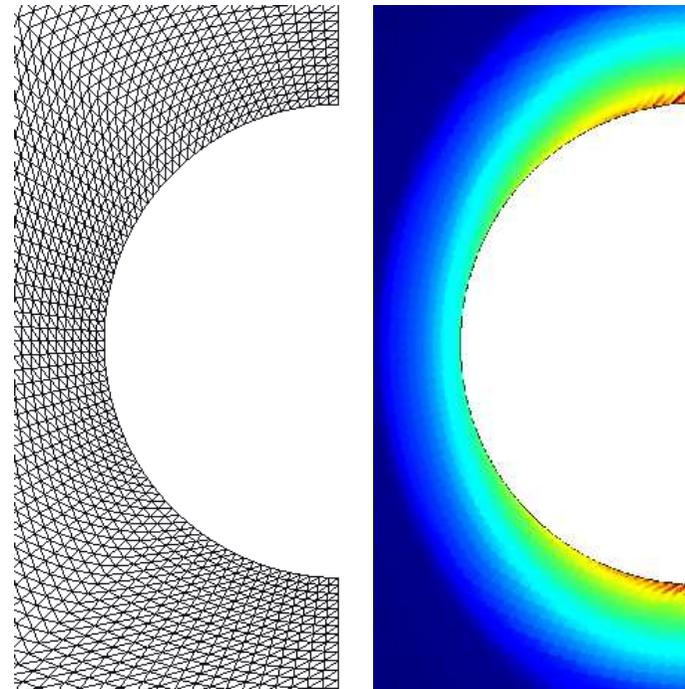


### 3. Cadre de la modélisation (2/2)

- ▶ Modélisation hydromécanique réalisée avec Code\_Aster  
([www.code-aster.org](http://www.code-aster.org))
  - Modèle *L&K*
  - Conditions isothermes et saturées en eau
- ▶ Un logiciel aux éléments finis couplé à un modèle radoucissant conduit à des localisations

#### Conséquences possibles :

- Rend difficile la convergence des calculs
- Biais liés à la taille et/ou à l'orientation des mailles



### 3. Cadre de la modélisation (2/2)

#### ► Méthode de régularisation par second gradient de dilatation

→ Thèse de Roméo Fernandes (2009)

**Principe = « moyenne » entre mailles voisines**

#### ► Avantage de la méthode :

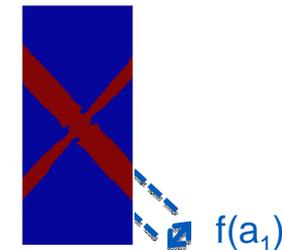
- Permet de rester dans le cadre des milieux continus
- Se concentre sur la déformation volumique

#### ► Intérêt :

- Rend le calcul indépendant du maillage
- Évite ou limite les phénomènes de localisation numérique
- Améliore la convergence des calculs couplés

#### ► Nécessite un paramètre de régularisation : $a_1$

→ contrôle numérique de la largeur de la bande de localisation



## 4. Résultats (1/4)

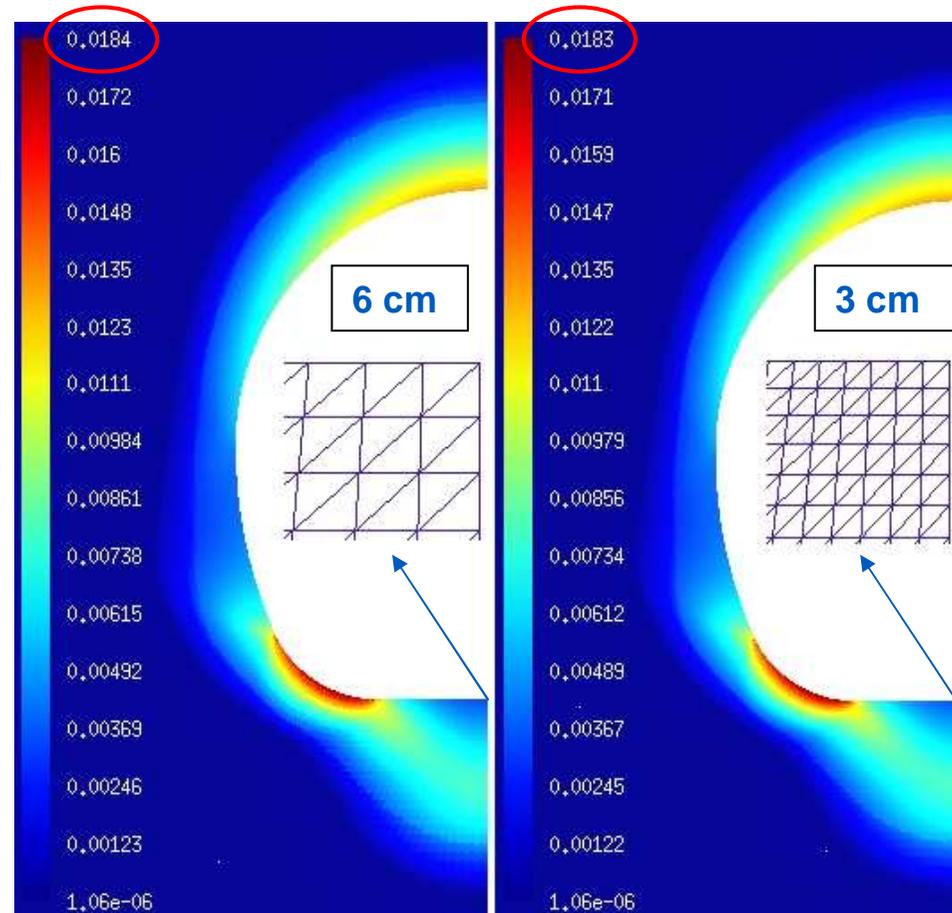
▶ Avec la régularisation, le calcul converge.

▶ Le calcul est indépendant de la finesse du maillage.

**Comparaison du paramètre de déformation plastique après 40 jours pour deux tailles de maillage**

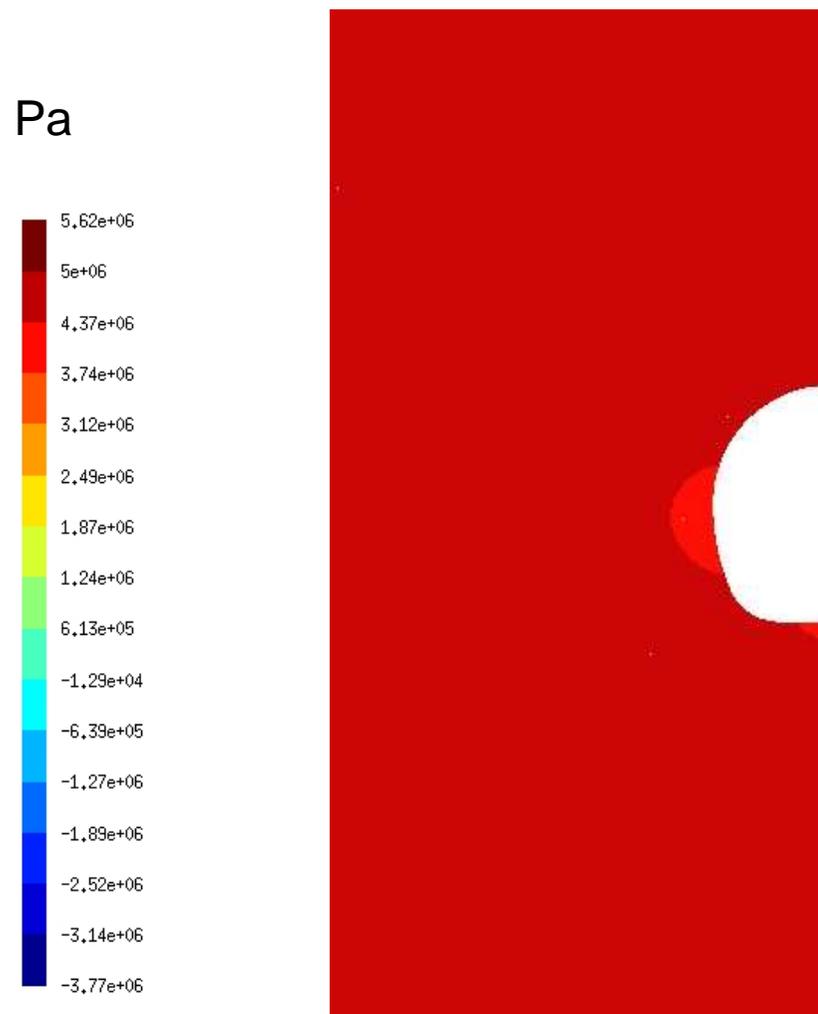


**Bonne régularisation**



## 4. Résultats (2/4)

► Evolution de la pression d'eau :

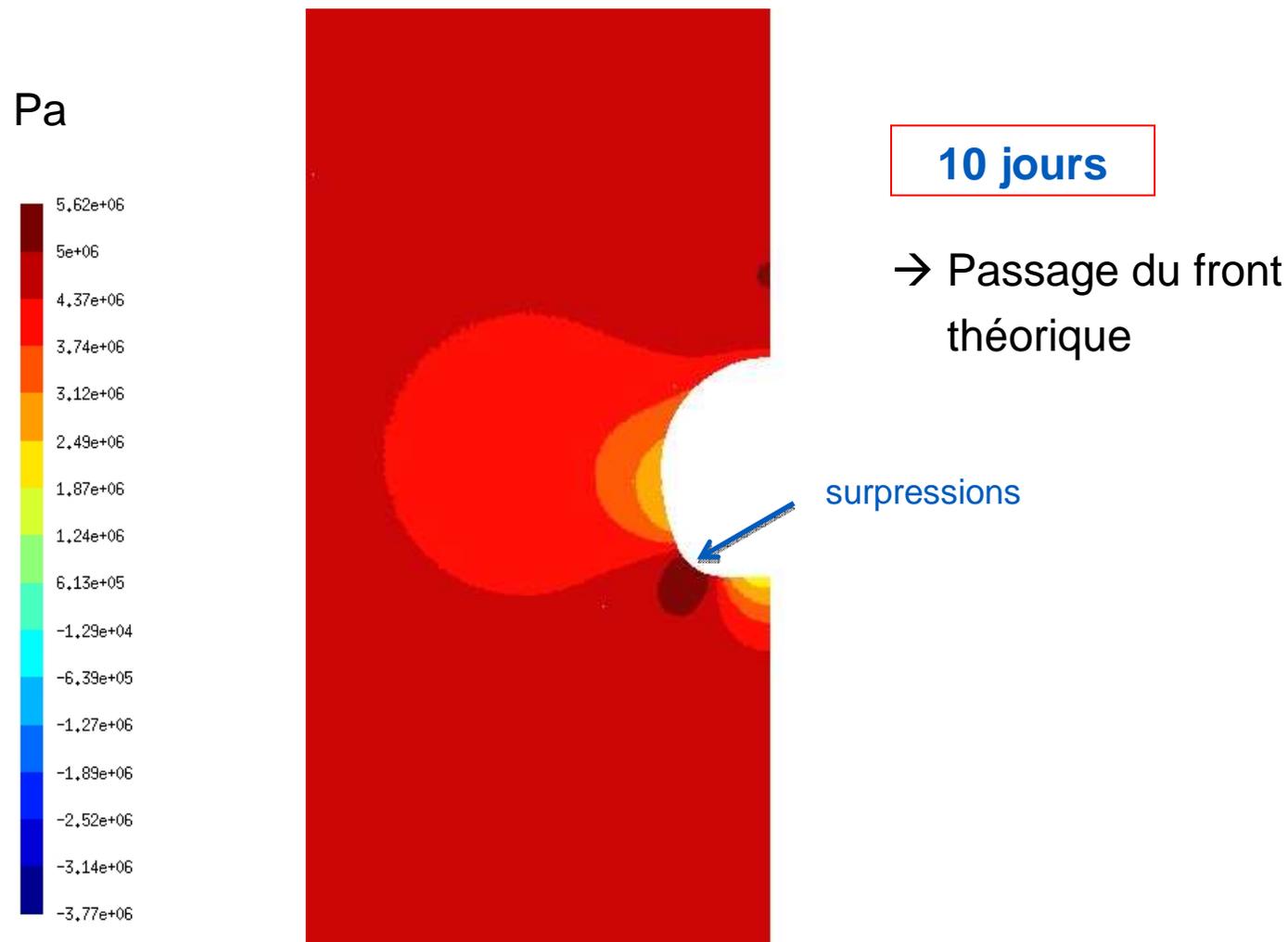


5 jours

→  $p_w$  initiale = 4,5 MPa

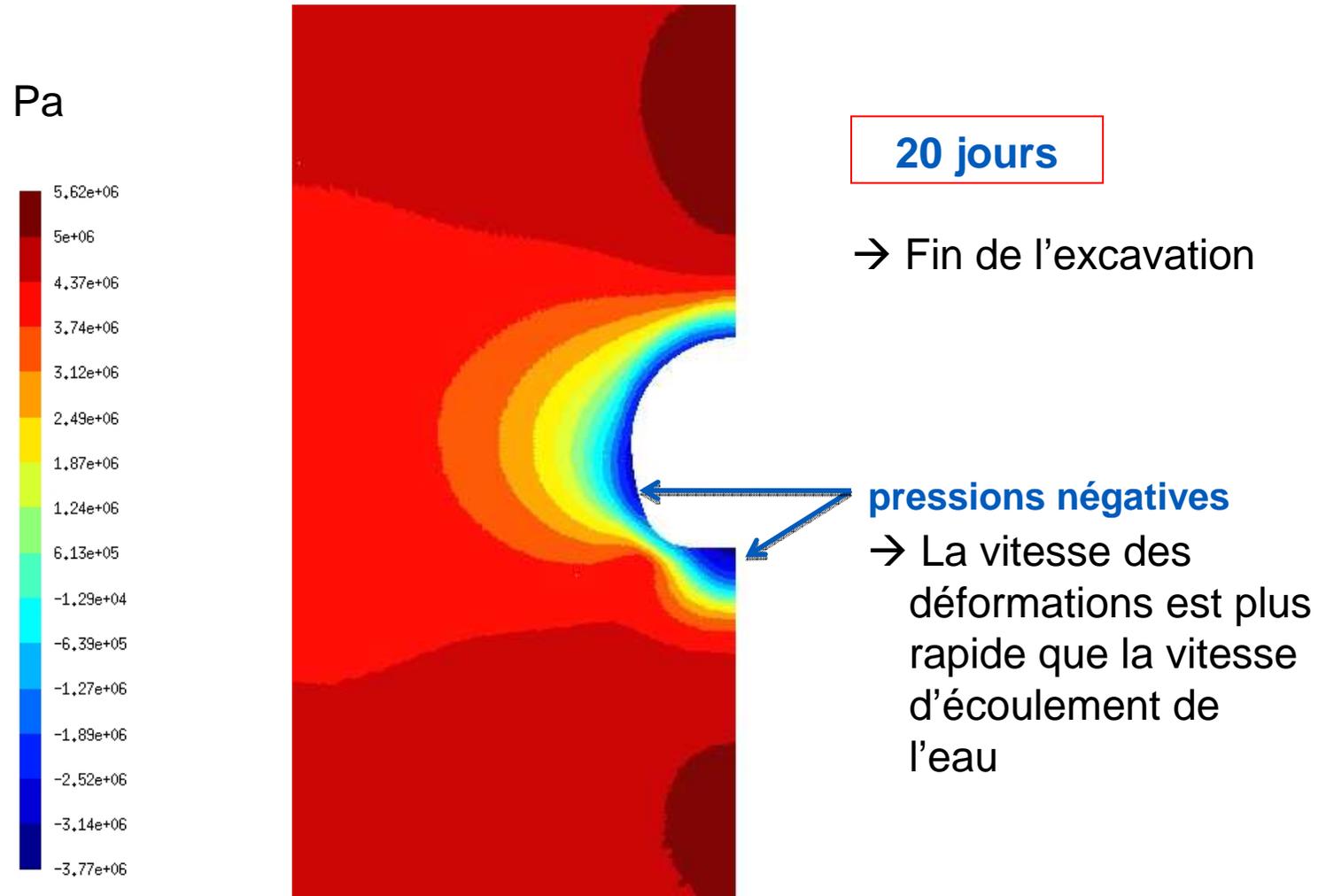
## 4. Résultats (2/4)

► Evolution de la pression d'eau :



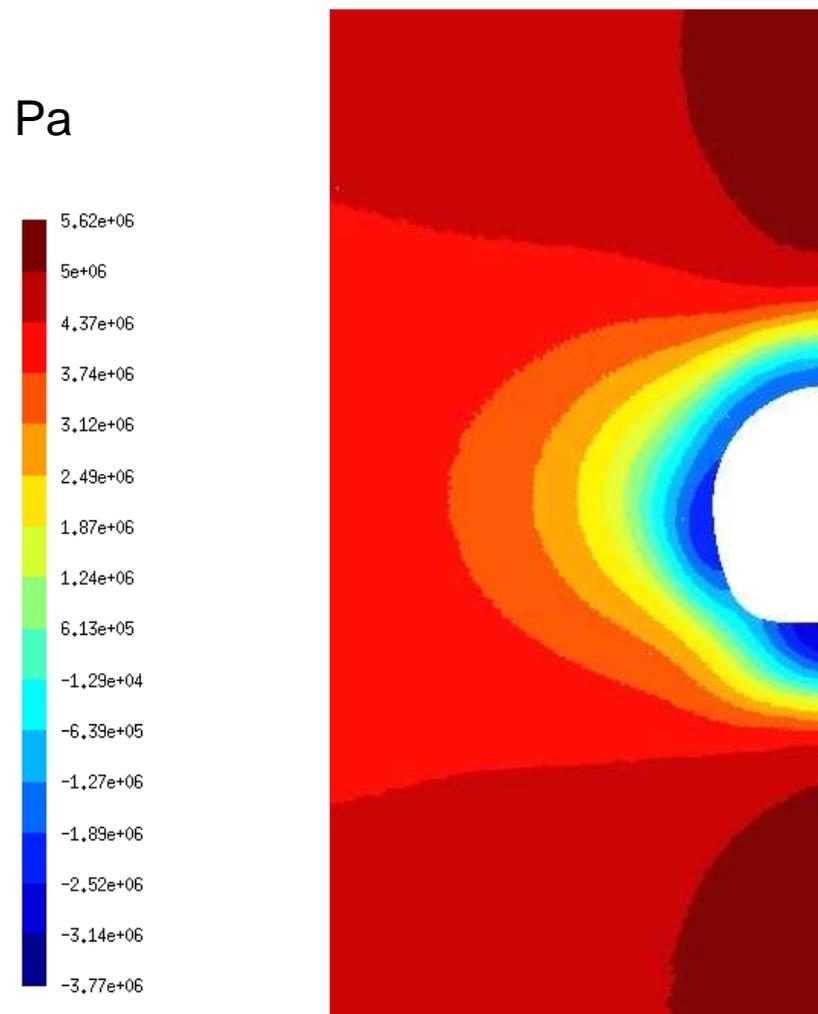
## 4. Résultats (2/4)

► Evolution de la pression d'eau :



## 4. Résultats (2/4)

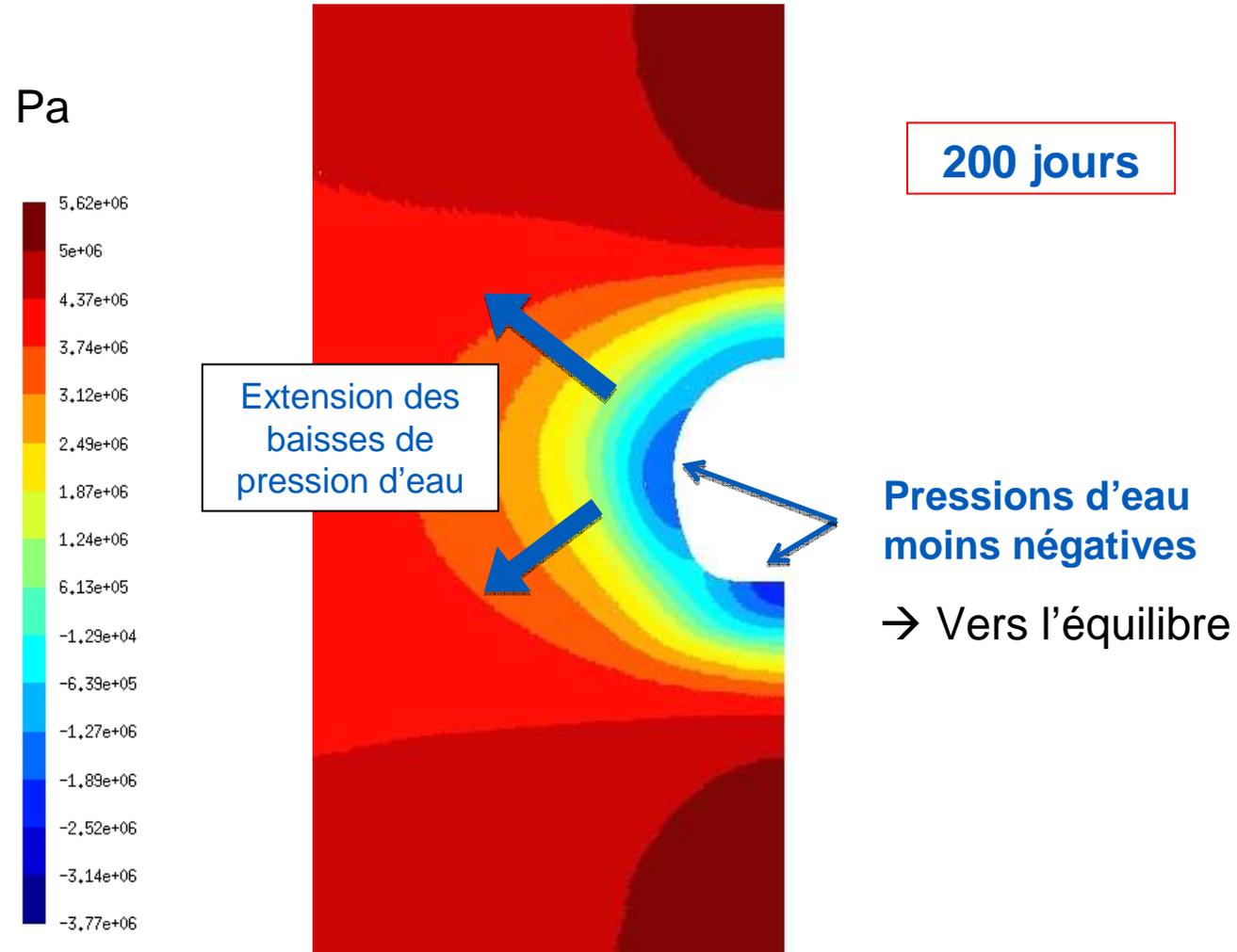
► Evolution de la pression d'eau :



100 jours

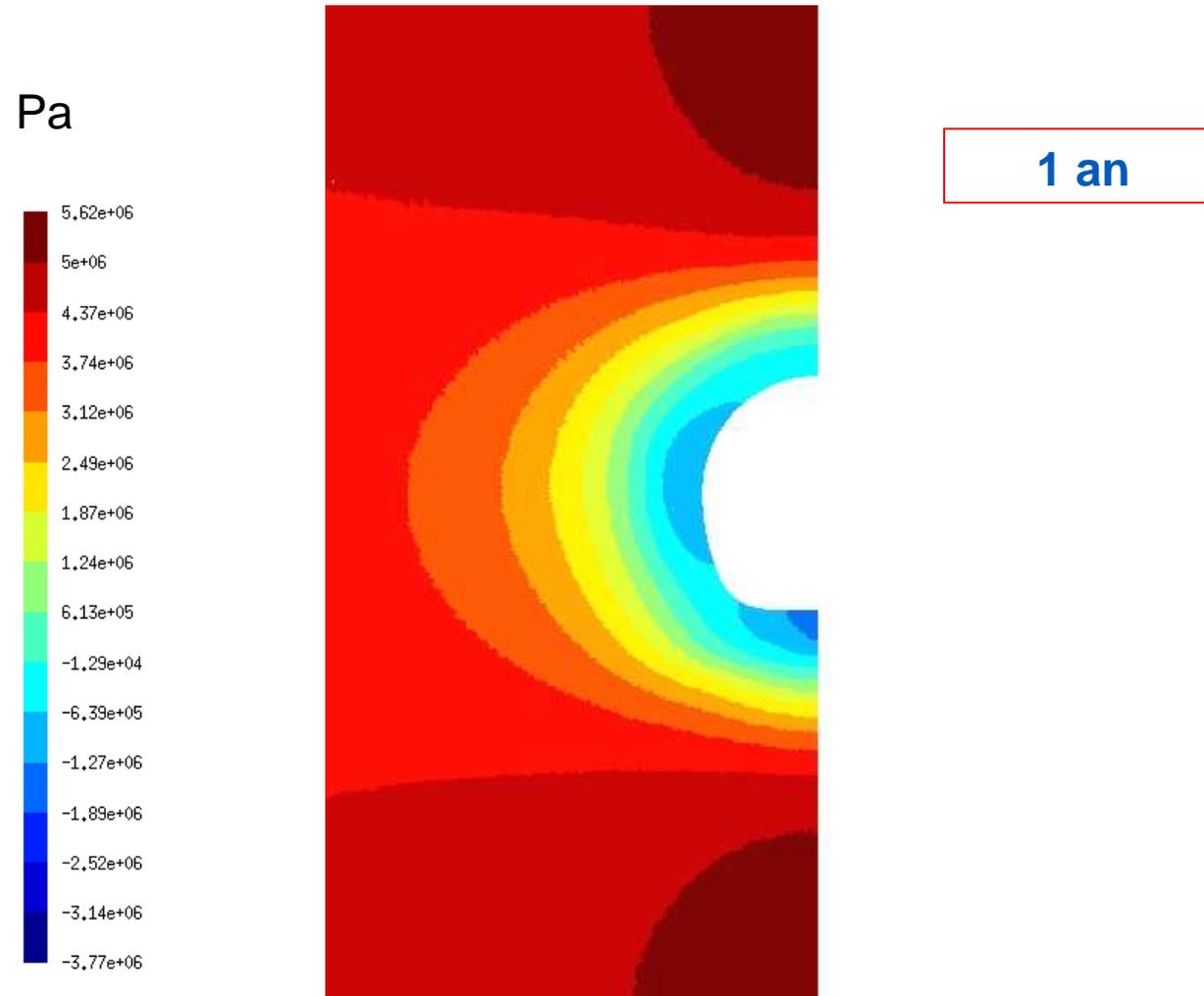
## 4. Résultats (2/4)

► Evolution de la pression d'eau :



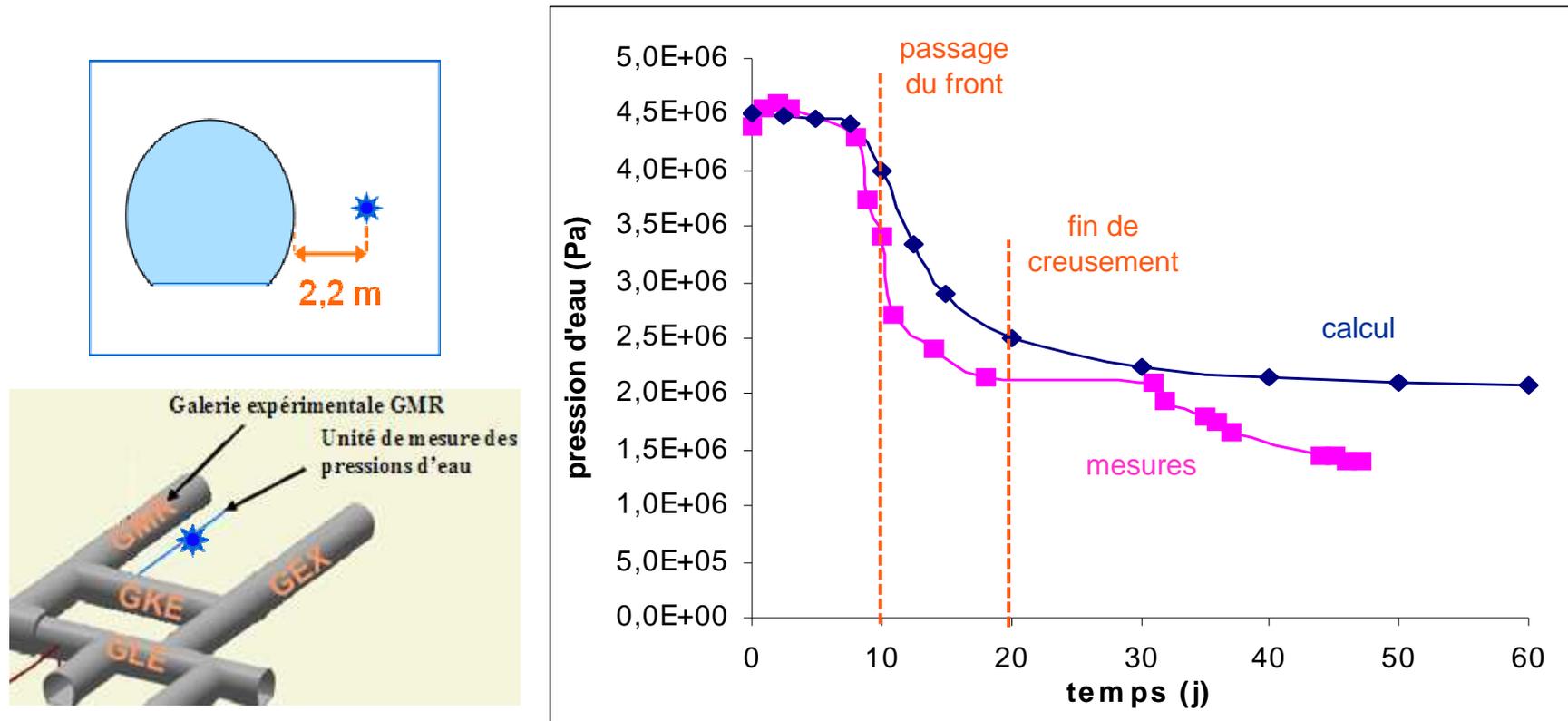
## 4. Résultats (2/4)

► Evolution de la pression d'eau :



## 4. Résultats (2/4)

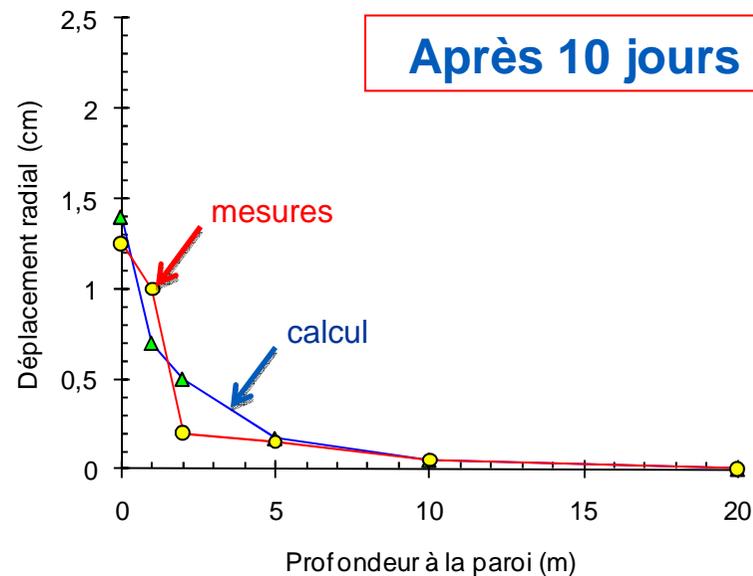
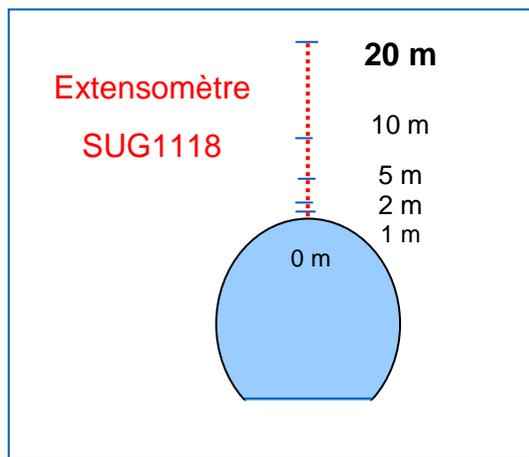
► Evolution de la pression d'eau à 2,2 m de la paroi latérale :



► Bon accord entre modélisation et mesures expérimentales

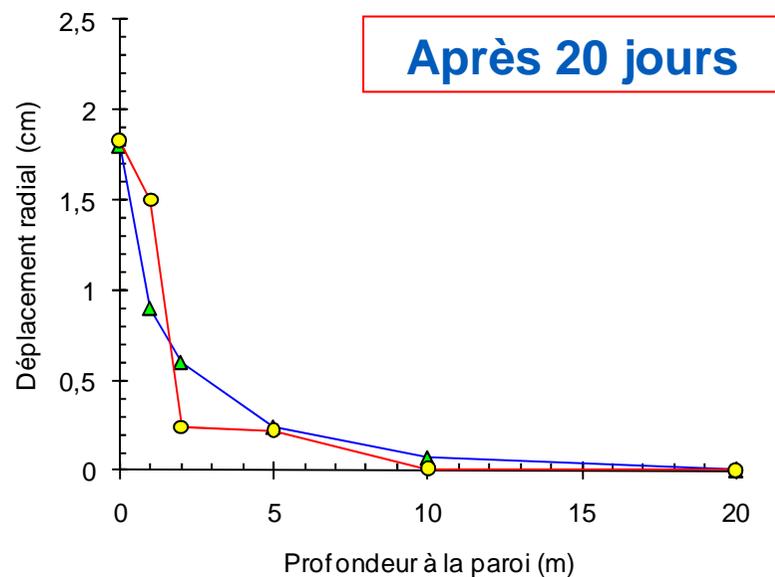
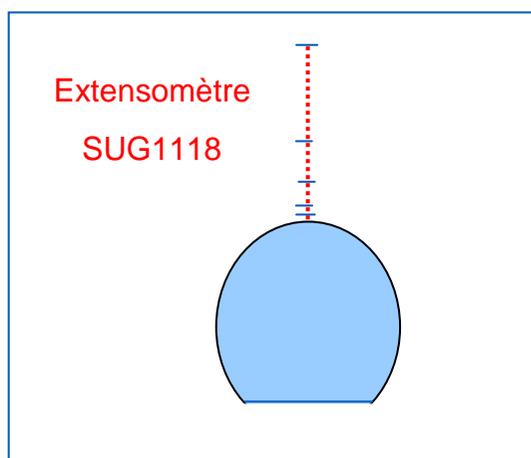
## 4. Résultats (3/4) : déplacements

- Evolution des déplacements en voûte et à différentes distances de la paroi (extensomètre) :



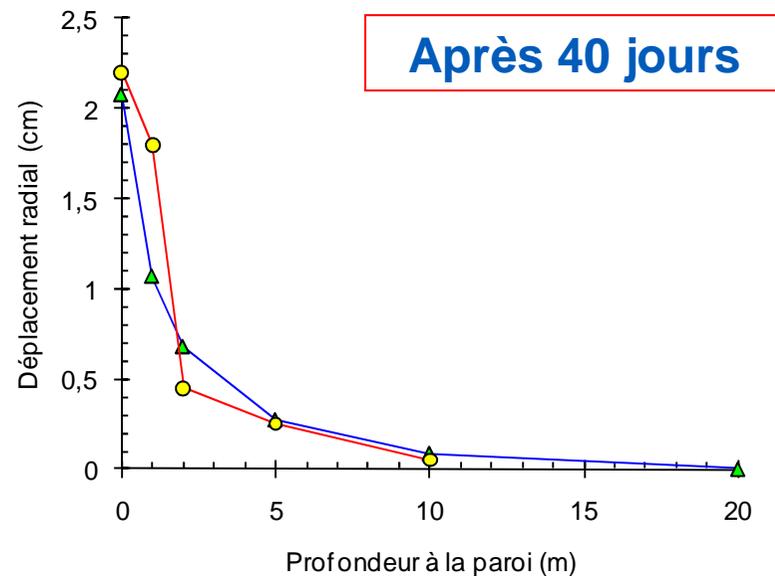
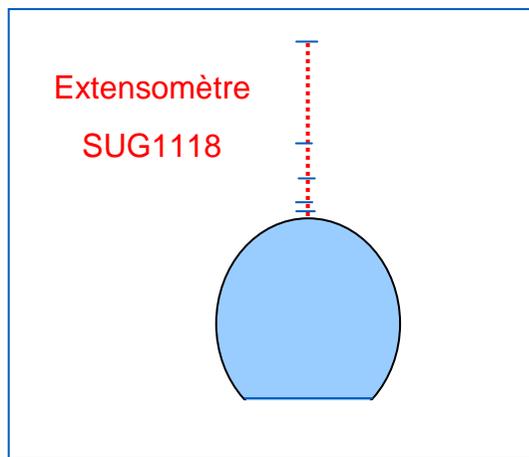
## 4. Résultats (3/4) : déplacements

- ▶ Evolution des déplacements en voûte et à différentes distances de la paroi (extensomètre) :



## 4. Résultats (3/4) : déplacements

- ▶ Evolution des déplacements en voûte et à différentes distances de la paroi (extensomètre) :

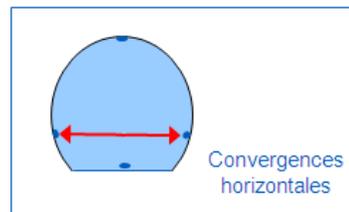
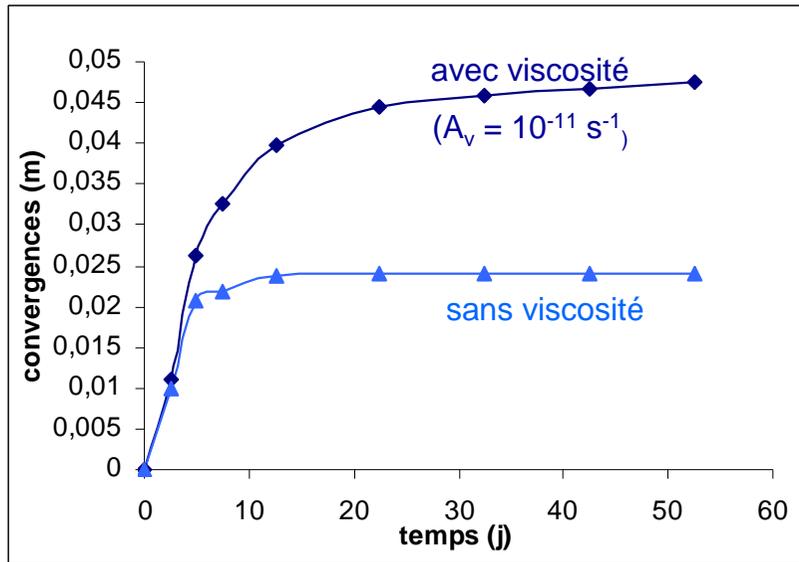


- ▶ Les évolutions dans le temps concordent

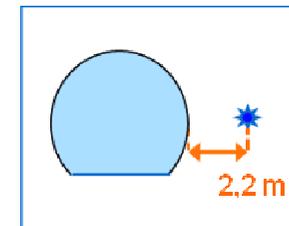
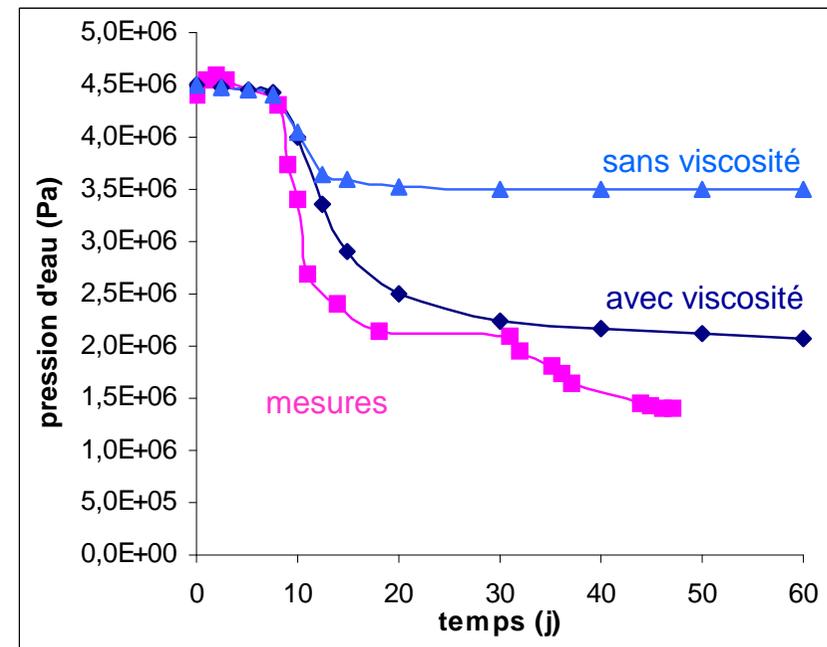
# 4. Résultats (4/4) : importance de la viscosité

► Comparaison sans viscosité : paramètres de viscosité nuls

### Évolution des convergences horizontales



### Évolution des pressions d'eau



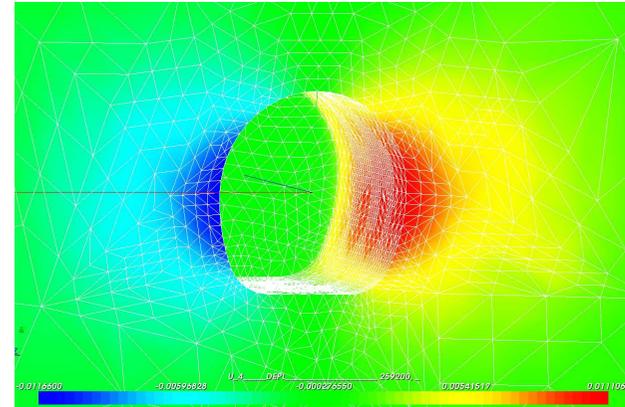
# Conclusions

- ▶ Validation de la modélisation avec Code\_Aster
  - Modèle radoucissant avec viscosité (modèle *L&K*)
  - Couplage HM
  - Régularisation (second gradient de dilatation)
- ▶ Calcul entièrement prédictif : pas de recalage des paramètres avec des mesures *in situ*
- ▶ La dilatance et la viscosité sont essentielles pour décrire le comportement des roches dans le cadre du stockage des déchets HAVL

## Perspectives

- ▶ Poursuivre la modélisation 3D

Déplacements horizontaux



- ▶ Poursuivre la validation de l'étude avec de nouvelles mesures provenant du Centre de Meuse/Haute-Marne
- ▶ Faire évoluer le modèle *L&K* pour prendre en compte les aspects thermiques (fluage)

## Remerciements

**François Laigle** – EDF, CIH

**Roméo Fernandes** – EDF, R&D-AMA

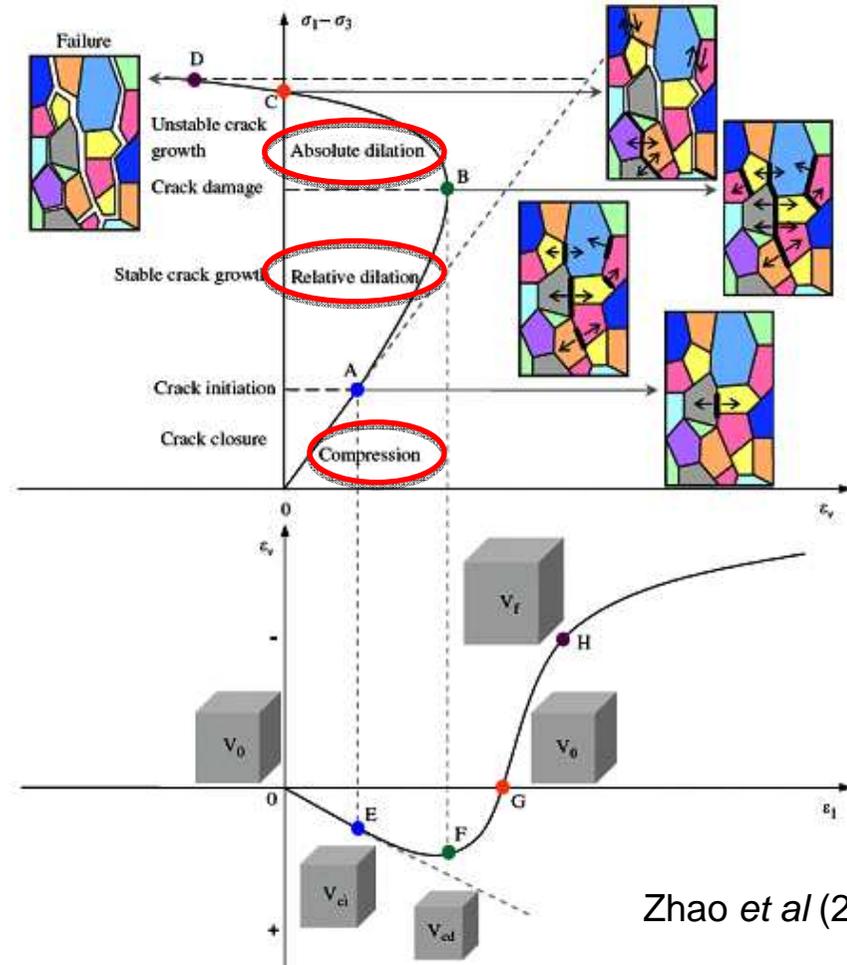
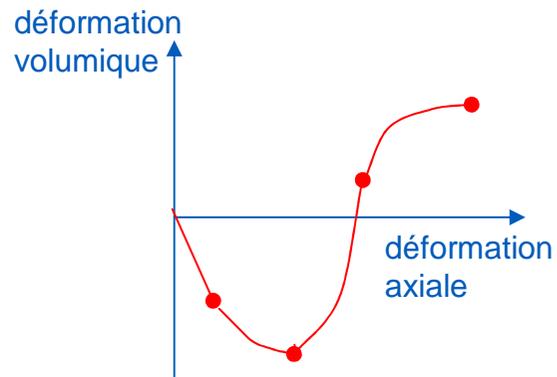
**Albert Giraud** – LaEGO, ENSG-INPL, Nancy

**Dashnor Hoxha** – Prisme, Polytech'Orléans

**Merci de votre attention**

**Merci de votre attention**

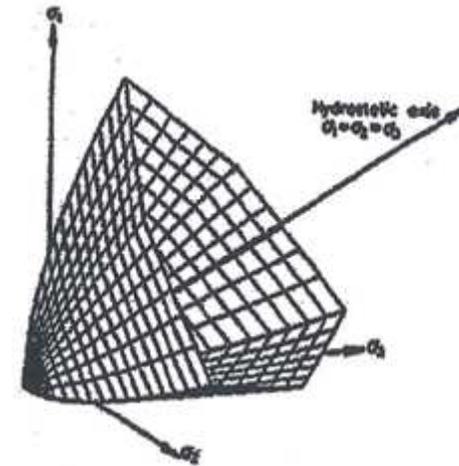
► Loi de dilatance spécifique



Zhao *et al* (2010)

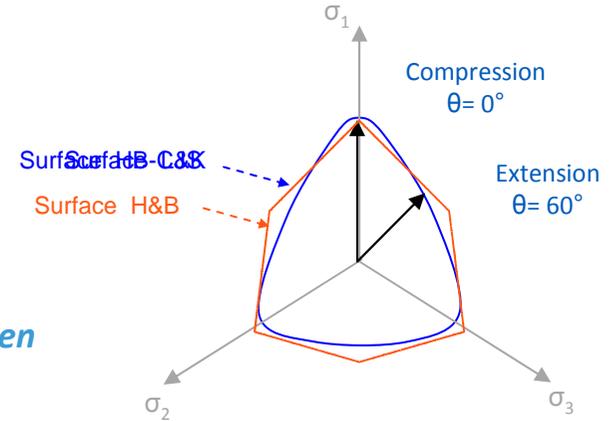
- ▶ Déformation élastoplastique :  $\dot{\varepsilon}_{ij}^{ep} = \dot{\lambda}_{ep} G_{ij}^{ep}$
- ▶ Forme et paramètres de la surface et des seuils basés sur le modèle Hoek & Brown

$$F(\underline{\underline{\sigma}}) = \sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_c \left( m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad \text{Hoek \& Brown}$$



*Ajout de la contrainte intermédiaire  $\sigma_2$   
Remplacement de  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  par  $J_2$  et de  $\sigma_3$  par  $I_1$  (invariants)  
Régularisation de la forme de la surface dans le plan  $\pi$*

$$\sqrt{2J_2} - \sigma_c [A(h(\theta))\sqrt{2J_2} + BI_1 + D]^a = 0 \quad \text{HB-CJS}$$



*Ajout de  $H(\theta)$  pour pouvoir piloter la résistance en extension et en compression en même temps*

$$\sqrt{2J_2} H(\theta) - \sigma_c H_0^c [A\sqrt{2J_2} H(\theta) + BI_1 + D]^a = 0 \quad \text{L\&K}$$

- ◆ Déformation viscoplastique :  $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \langle \Phi(F^{vp}) \rangle G_{ij}^{vp}$
- ◆ Basé sur la théorie de Perzyna (1966) :  $\Phi(F^{vp}) = A_v \left( \frac{\langle F^{vp} \rangle}{P_a} \right)^{n_v}$
- ◆ Seuil de résistance à long terme → seuil caractéristique

