



# Effondrement de la cavité saline de Cerville–Buissoncourt

## MODELISATIONS & ANALYSES

Farid LAOUAFA

# Analyses prédictives

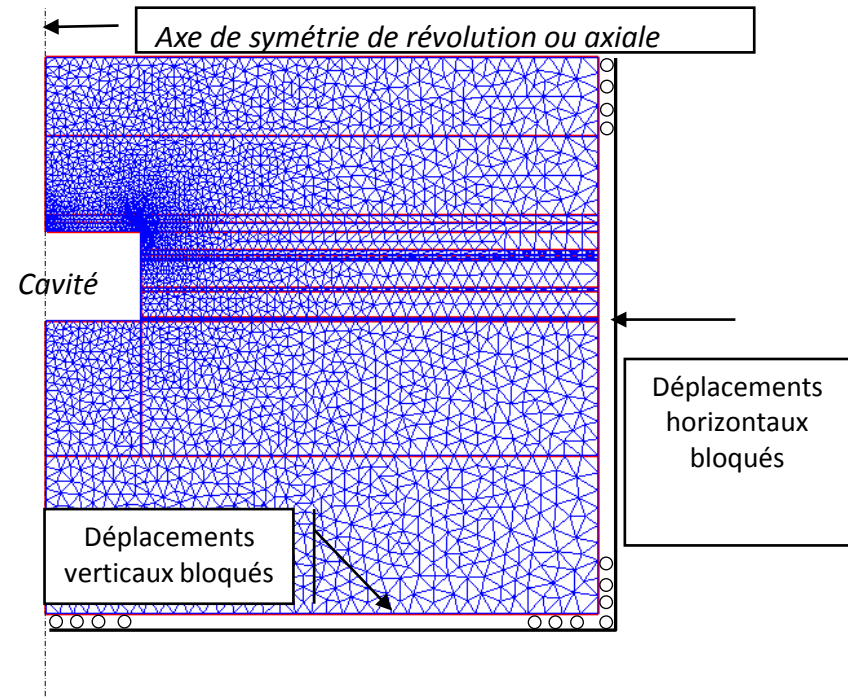
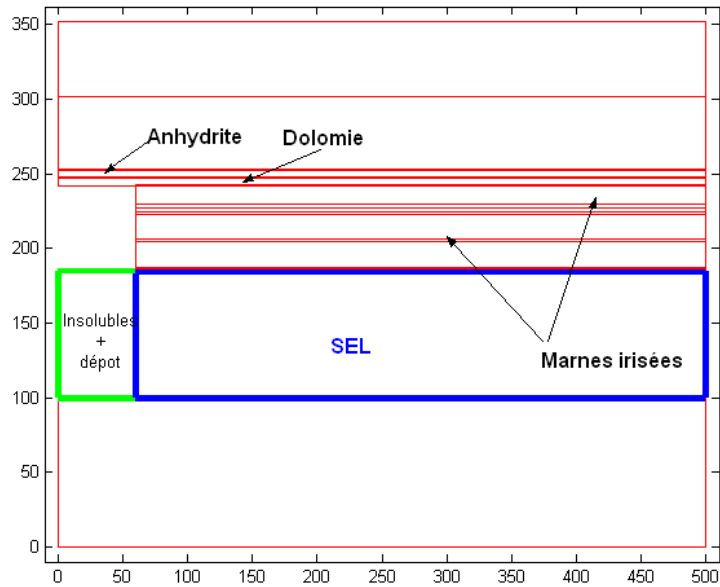


Figure : Modèle géométrique axisymétrique- Maillage et C.L.

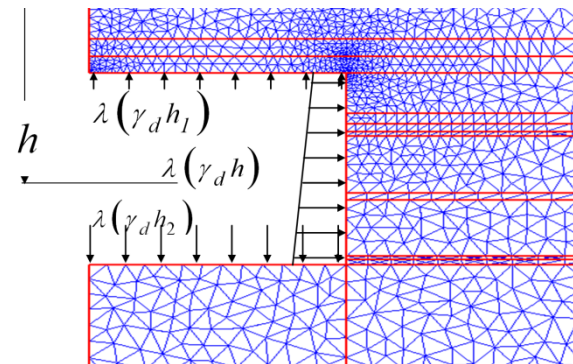
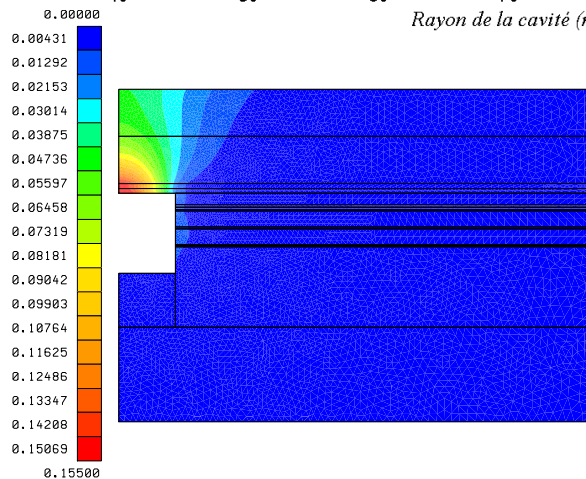
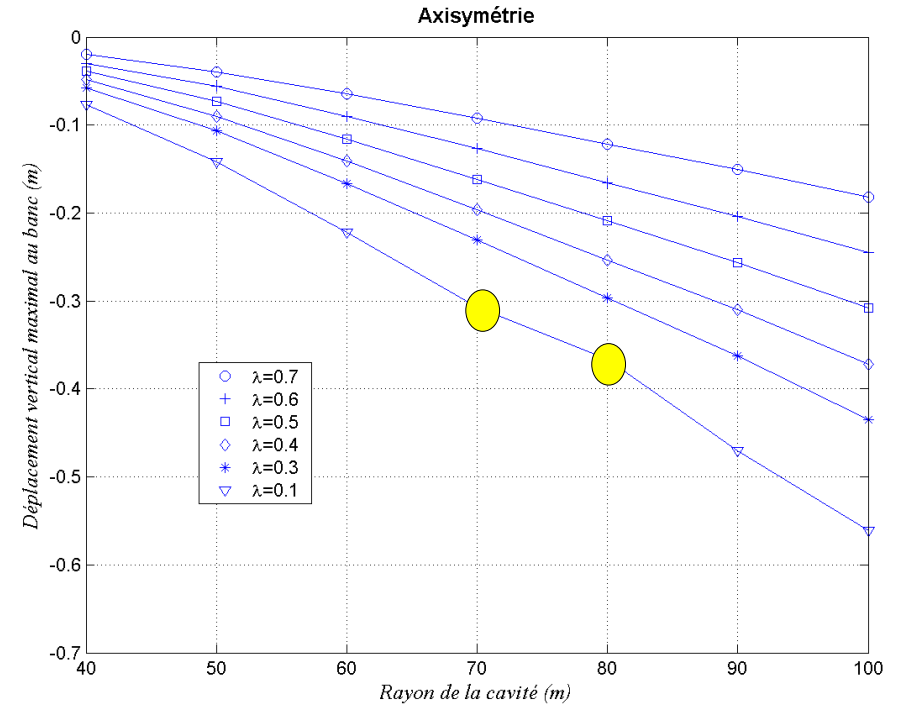
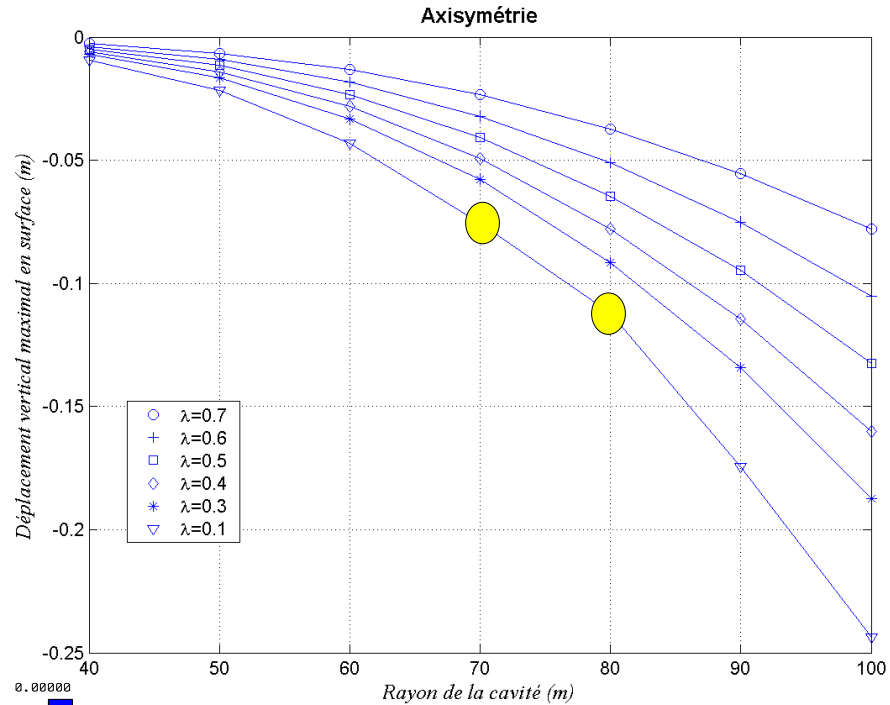


Figure : Pression saumure

(source Solvay)

# Affaissements & flèches



Mesures in-situ :

Affaissement à l'instabilité : 10 cm

Flèche du banc à l'instabilité : 14 cm

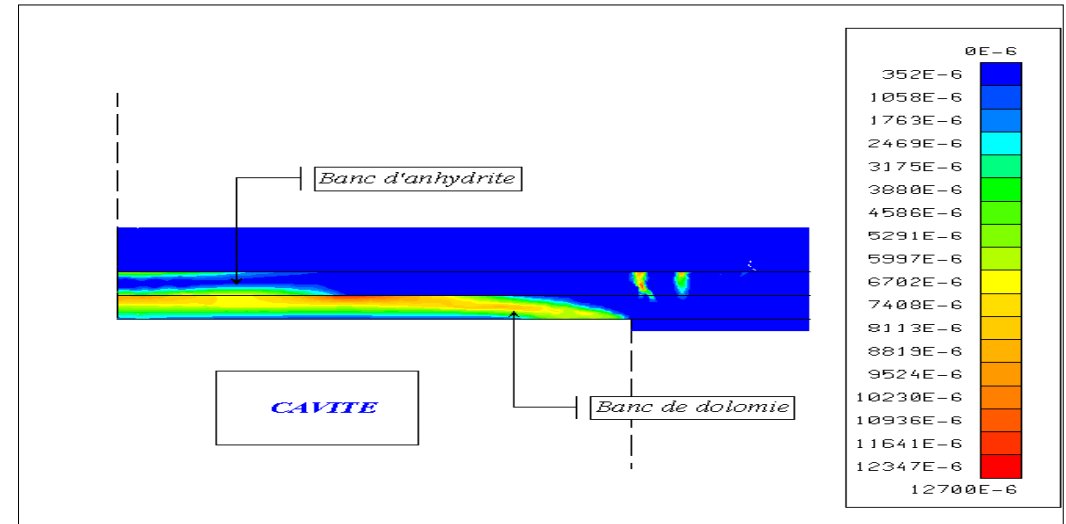
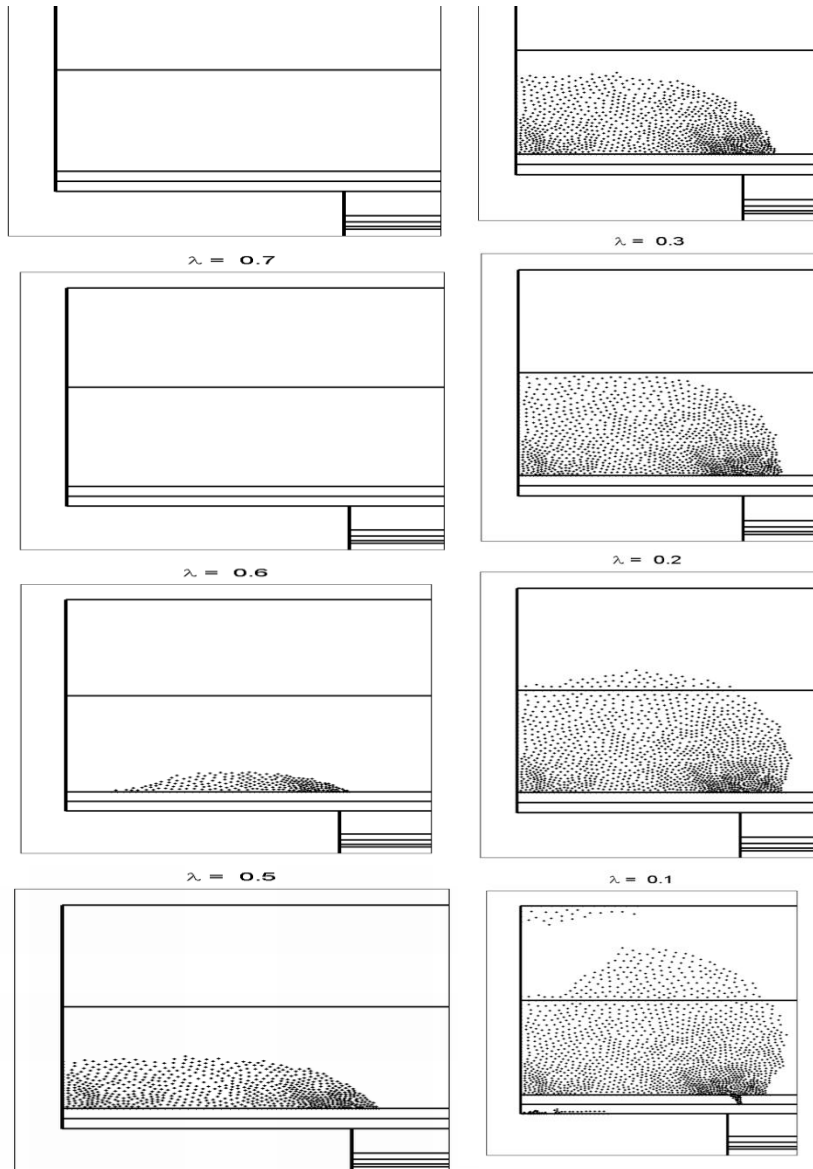
$\varepsilon_{zz} = 0,03 \%$

Figure : Déplacement vertical  
(avant non convergence)

(source Solvay)

INERIS

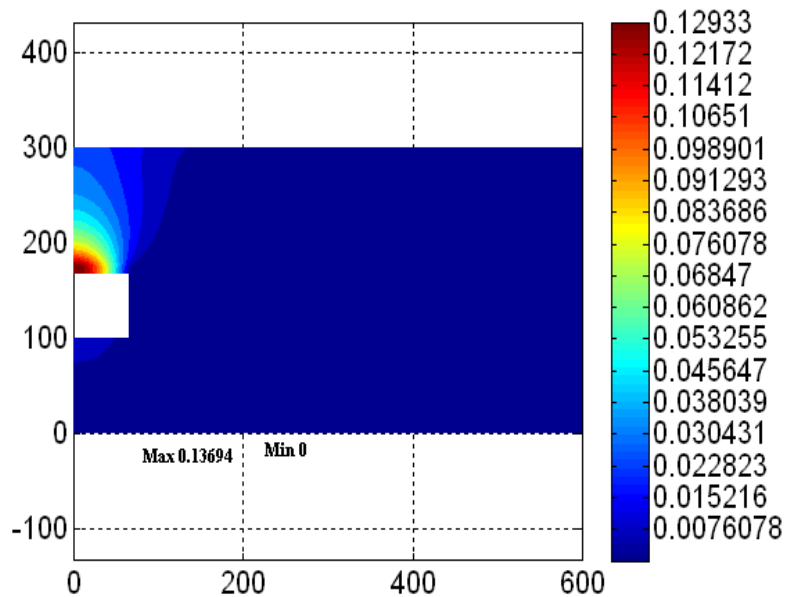
# Distribution et évolution de la plasticité



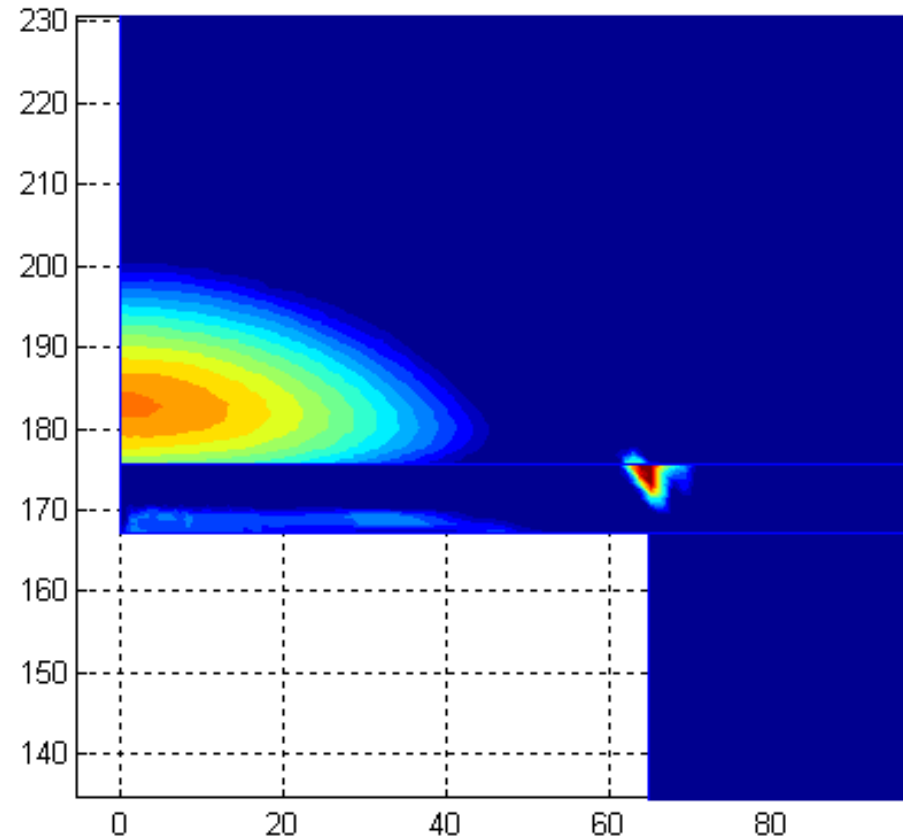
(source Solvay)

# Distribution de la plasticité dans le banc

Figure : Isovaleurs de  $U_y$  et de la norme de la déformation plastique (avant NC)



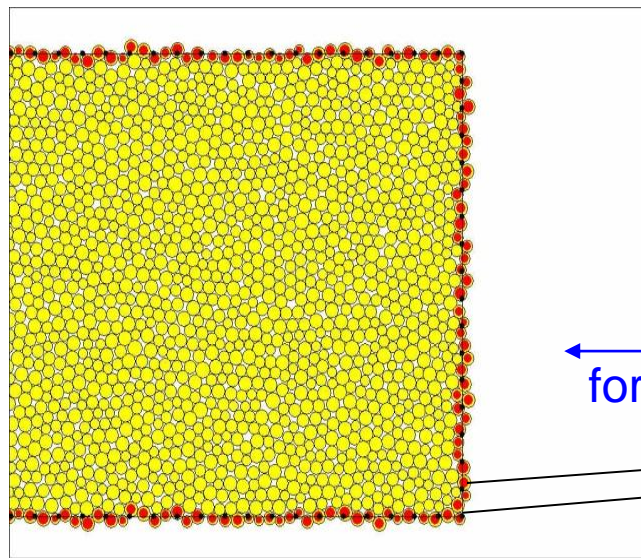
Cavité au niveau du banc  
Psaumure = 0.3 MPa



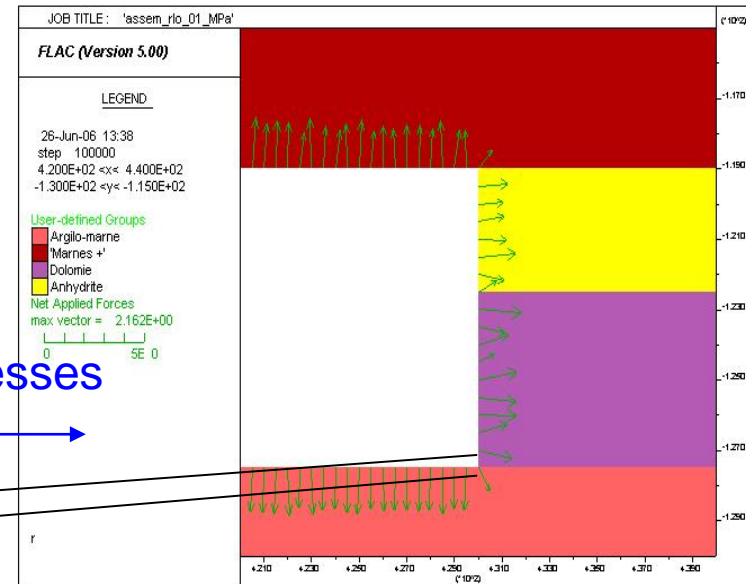
Perte de convergence à 0.3 MPa  
 $U_y$  (banc) = 13.7 cm  
 $U_y$  (surface) = 3 cm

# Modélisation de l'endommagement dans le recouvrement (Mercerat, 2007)

- Modélisation hybride continue FLAC/discrète PFC2D
- Initiation et développement microfissures dans le banc raide



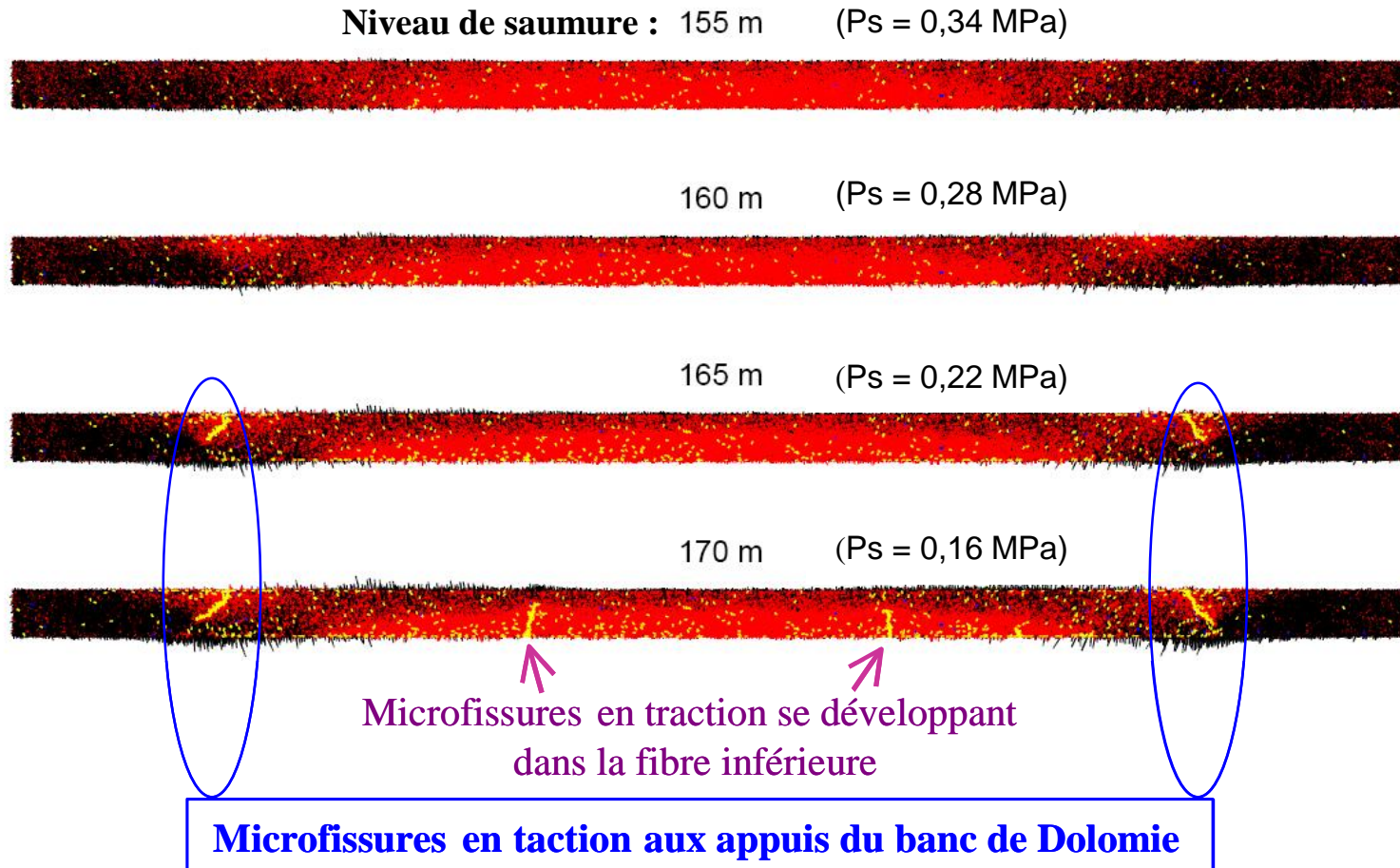
Approche discontinue (PFC2D)



Approche continue (FLAC)

← forces  
vitesse →

# Modélisation de l'endommagement dans le recouvrement (Mercerat, 2007)





# Discussion sur les modélisations prédictives

✓ Analyses prédisaient environ 100-120 m de diamètre au droit du banc raide contre 150 m observé in-situ.

Le modèle numérique adoptait une approche de milieu continu sans propagation de fractures (hypothèses fortes) :

1. Vocation du modèle : initiation de l'instabilité (pas l'évolution de la rupture)
2. Cadre quasi-statique
3. Le recouvrement était supposé pesant (faible module) et homogène
4. La distinction entre stabilité et instabilité était pondérée par deux facteurs :
  - La non-convergence de la méthode de Newton (problème non-linéaire) (*objectif*)
  - Plus l'analyse de la distribution de la plasticité dans le banc raide (*subjectif*)

⇒ Le critère de rupture globale « subjectif » et conditions exagérées :

Cependant la configuration de la rupture (dimensions, pression de saumure, etc.) ont un ordre de précision acceptable.





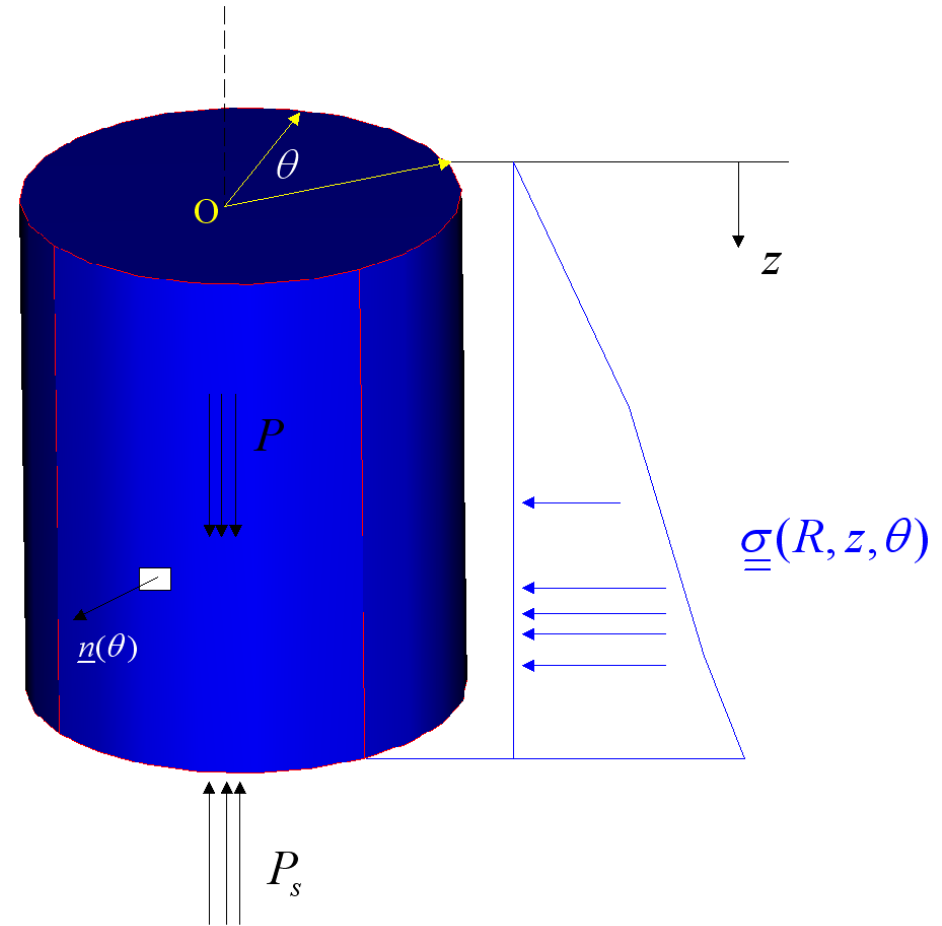
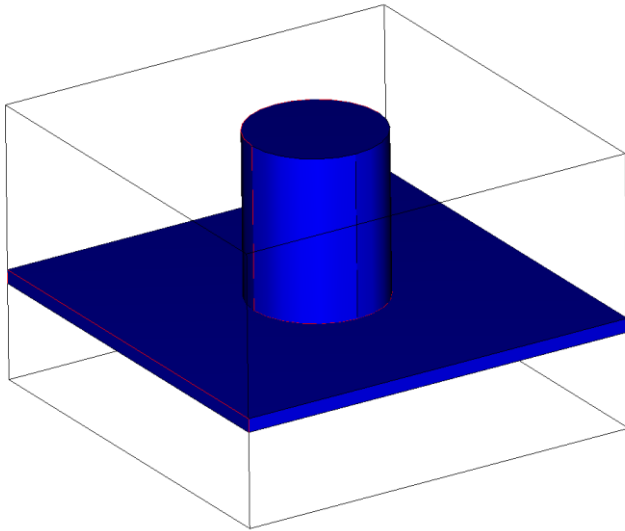
# Rupture : observations in-situ

## Rupture globale :

1. Configuration géométrique finale :
  - Une forme cylindrique (diamètre de 150 m)
  - Hauteur H inconnue
2. Configuration mécanique :
  - régimes quasi-statique à dynamique
    - Régimes dynamiques
      - *Impulsionnels*
      - *Réguliers (continus)*

⇒ Détermination de H critique

# Analyse de la stabilité de la configuration finale



## Stabilités ( Trois niveaux ) :

1. Locale
  - Tous points matériels
2. Partielle
  - Toutes parties du domaine
3. Globale
  - Intégralité du domaine

# Analyse de la stabilité : équilibre partielle

**Hypothèses** : homogénéité matérielle, isotropie, linéarité de  $\varepsilon_{zz}$ , corps rigide, symétrie axiale, etc.

## 1. Poids $O(R^2)$ :

$$P = \int_V g \rho(z) dv = g \left( \pi R^2 H \right) \int_0^H \rho(z) dz$$

$$\rho(z) = \rho \Rightarrow P = \gamma \pi R^2 H$$

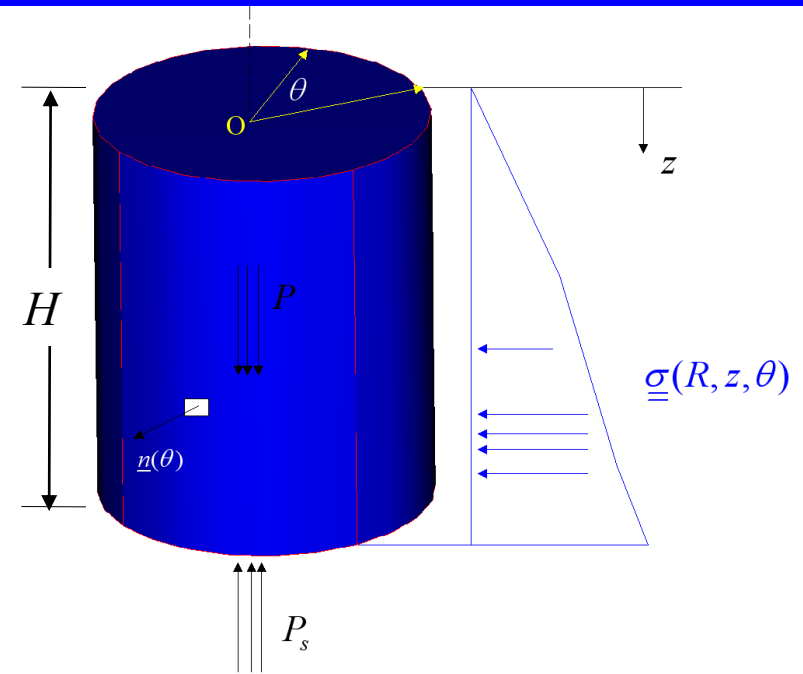
## 2. Forces (pression) de saumure $O(R^2)$ :

$$F_{sau} = F_{sau}(t) = \pi R^2 P_{sau}(t)$$

## 3. Frottement de Coulomb $O(R)$ :

$$\sigma_n(z) = \underline{n} \cdot \underline{\underline{\sigma}}(z) \cdot \underline{n}; \quad \underline{n} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \\ 0 \end{pmatrix} \quad \& \quad \underline{\underline{\sigma}}(z) = \begin{bmatrix} \gamma \cdot z & & \\ & \gamma \cdot z & \\ & & \gamma \cdot z \end{bmatrix} \Rightarrow \sigma_n(z) = \gamma \times z$$

$$f_f(z) = \sigma_n(z) \tan \phi + C \Rightarrow F_f = 2\pi R \left[ \gamma \frac{H^2}{2} \tan \phi + CH \right]$$



# Coefficient de sécurité – condition de stabilité

Coefficient de sécurité  $O(R/H)$  :

$$FS = \frac{F_f}{P - F_{sau}}$$

$\Rightarrow$

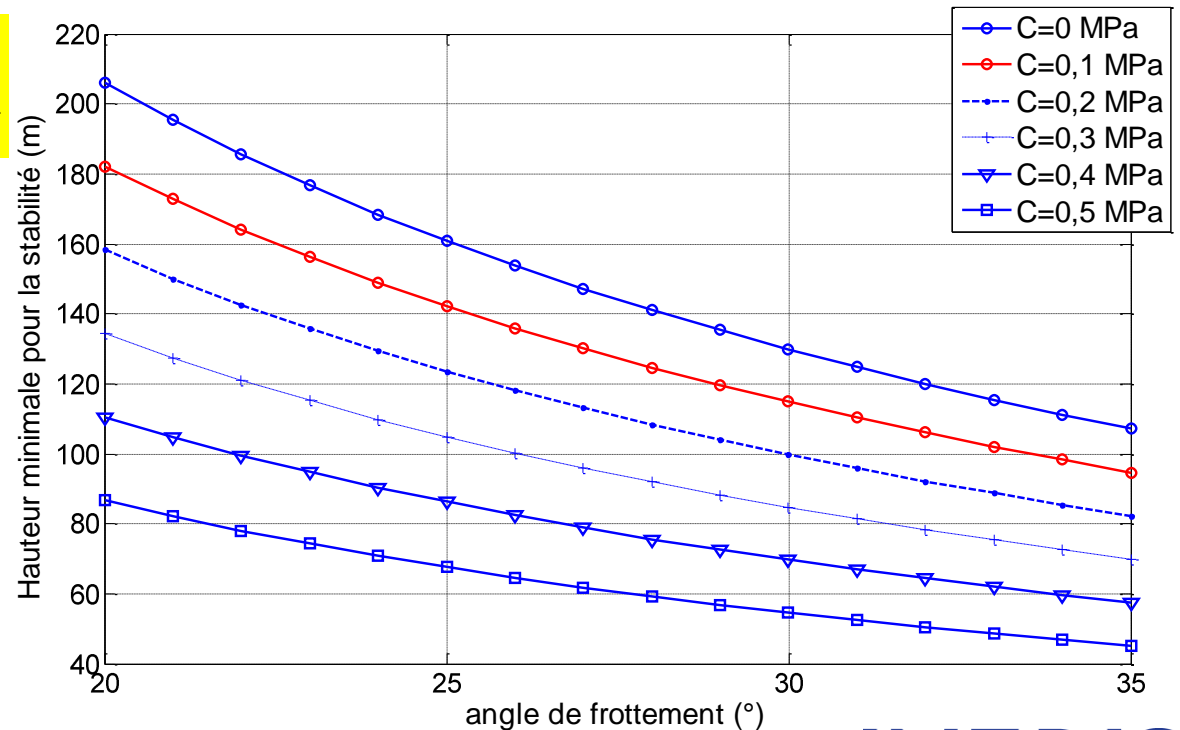
$$FS = \frac{H \tan(\phi) + \frac{2C}{\gamma}}{R \left( 1 - \frac{P_{sau}}{\gamma H} \right)}$$

1. Cas  $\frac{P_{sau}}{\gamma H} \ll 1$  :

$$FS = \frac{H \tan(\phi) + \frac{2C}{\gamma}}{R}$$

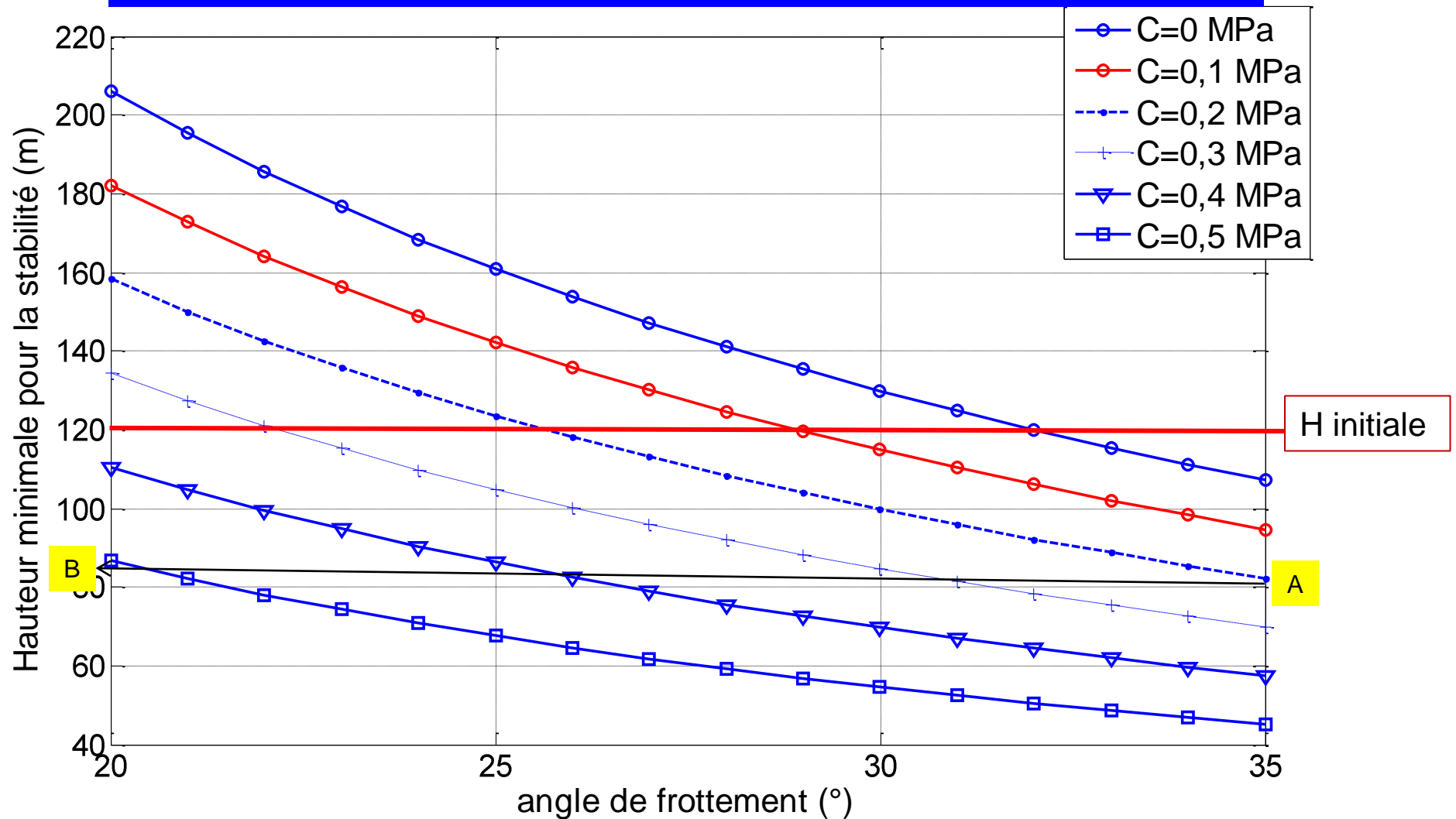
2. Stabilité si :

$$H > \frac{R - \frac{2C}{\gamma}}{\tan(\phi)}$$



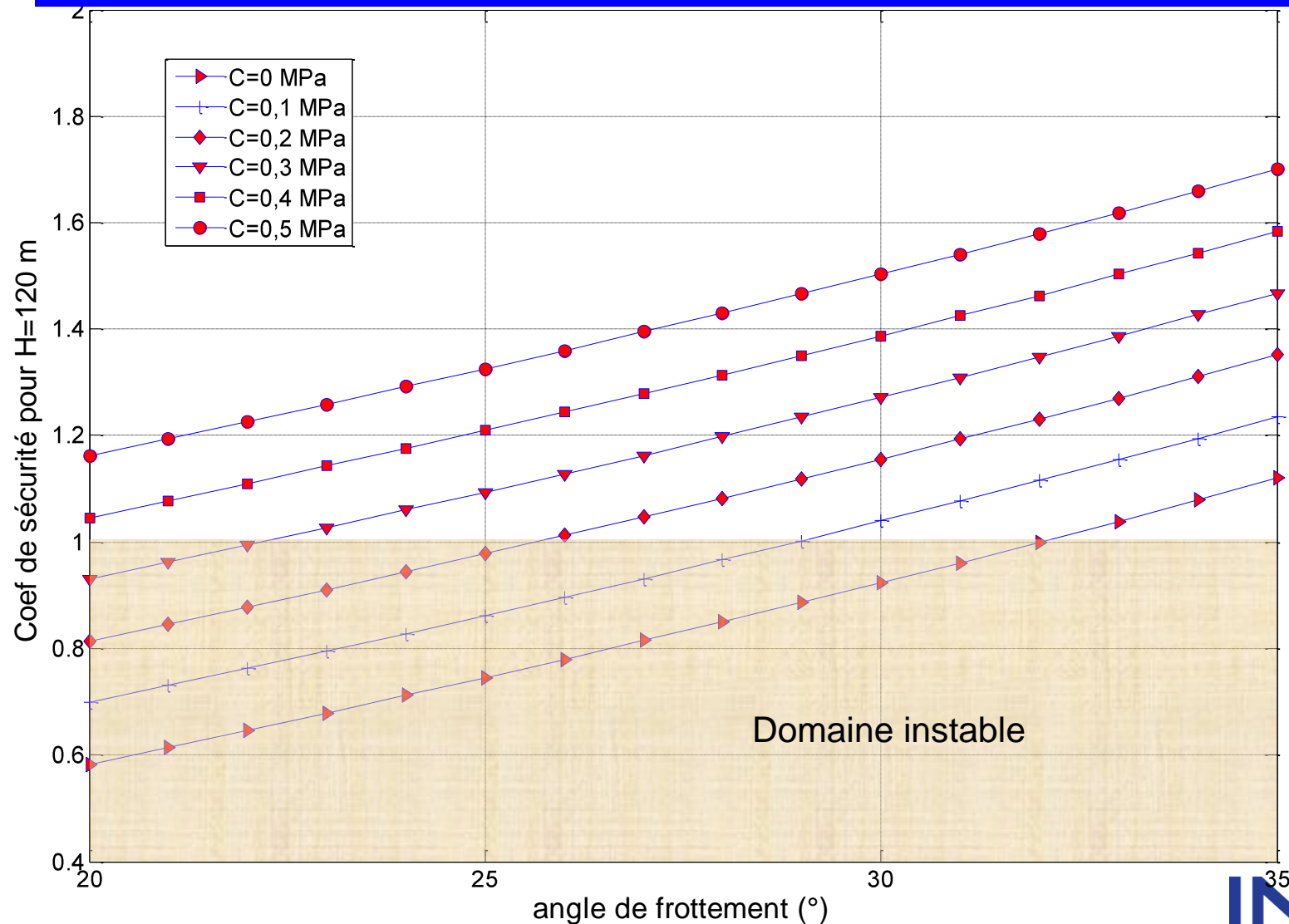
# Condition de stabilité : Hauteur de stabilité

Exemple :  $\phi=35^\circ$ ,  $C=0,2$  MPa,  $H$  (stable) > environ 82 m



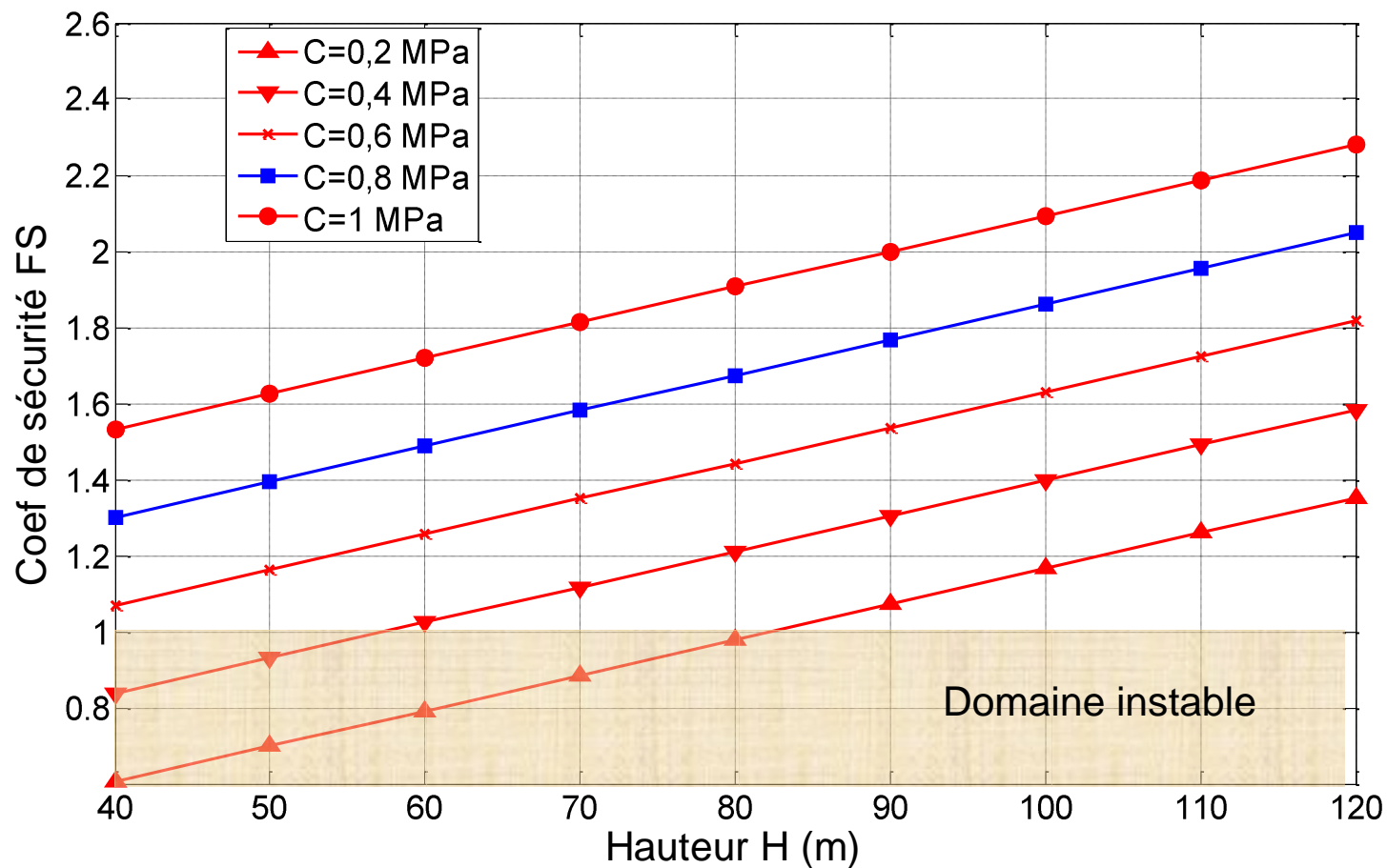
# Condition de stabilité : $FS=f(\phi,C)$ : réserve de stabilité

Exemple :  $\phi=35^\circ$ ,  $H=120$  m,  $FS>0$  quelques soient  $C$  !



# Condition de stabilité : $FS=f(H,C)$ : réserve de stabilité

Exemple :  $\phi=35^\circ$

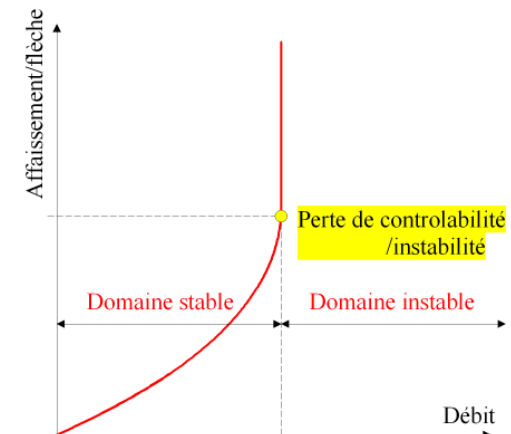
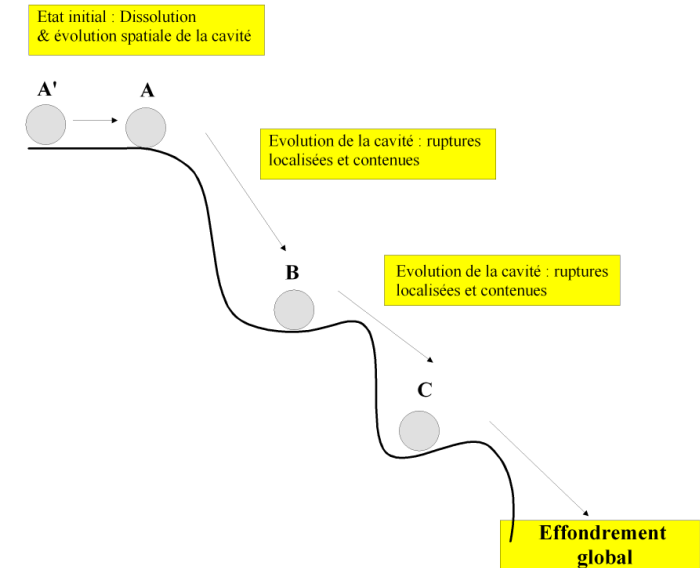




# Remarques sur la stabilité

- ✓ Système : Métastable A, B, jusqu'à Instable C.
- ✓ La perte de stabilité du problème globale est caractérisée par le changement du régime du recouvrement lors de la décharge hydraulique  
**Passage de résistant à moteur.**
- ✓ Perte de **contrôlabilité** (au sens de Nova (1994)).
- ✓ Le frottement rend le problème non conservatif
- ✓ Analyse de l'équilibre de ce système non-conservatif, montre que le volume sera mobilisé dans un mouvement de corps rigides si la hauteur du domaine est strictement inférieure à la hauteur de recouvrement.

## Successions d'équilibres métastables à instables



# Conclusions et remarques

## Hypothèses et cadres des modélisations :

- ✓ Analyses effectuées dans le cadre de la vérification d'un critère de rupture et non de stabilité (Lyapunov (1907), Rice (1976), Hill (1958)),
- ✓ Stratigraphie fine : « homogénéisation » - milieu continu, élastique-parfaitement plastique (associés),
- ✓ Analyse quasi-statique (non prise en compte des changements de régimes Stat. À Dyn.),
- ✓ Non prise en compte de la fracturation avec propagation quasi-statique et/ou dynamique : **uniquement**

## l'initiation de la rupture

## Mécanismes probables :

- ✓ Possibilité d'un mécanisme de bifurcation par flambement de petites strates au voisinage du banc
- ✓ L'instabilité (rupture) globale suite à une succession d'équilibres métastables (S/S & PL)
- ✓ Zone de décompression ou altérée au voisinage du banc raide
- ✓ **Le changement de régime hydraulique est le signe d'une instabilité manifeste**
- ✓ La présence de saumure sous pression diminue les « capacités » mécaniques des fractures induites lors la fracturation (surpression, frottement réduit, etc.) et entretient le régime dynamique
- ✓ La forme cylindrique du cratère traduit un mécanisme de rupture par « cisaillement »
- ✓ Une analyse plus fine devra intégrer explicitement : discontinuités, propagation & dynamique

**MERCI**  
pour votre attention