

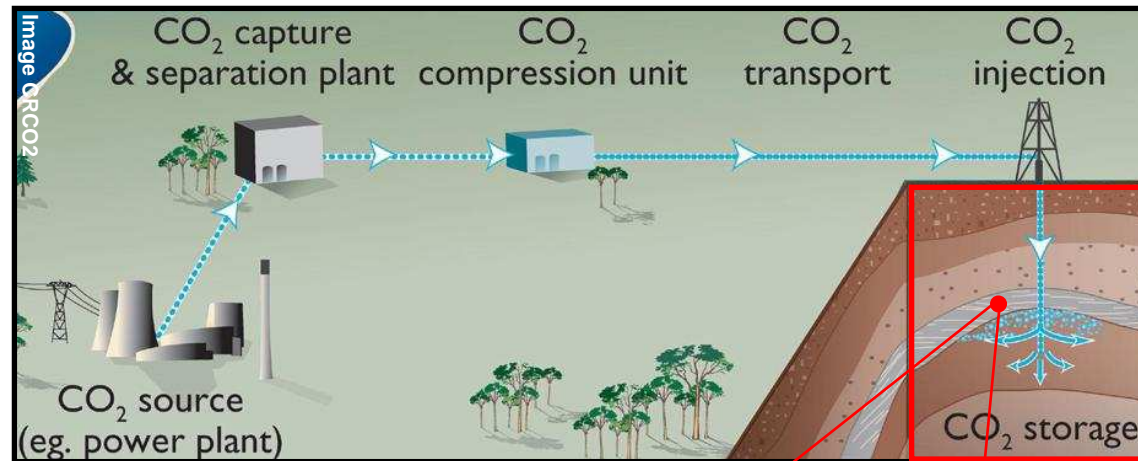
# Modélisation non locale de la fissuration des roches en mode d'ouverture

Nicolas Guy

François Hild      LMT-Cachan

Darius Seyedi      BRGM/RNSC

# Introduction



Modification de la pression des pores

Modification de l'état de contrainte

Dégradation mécanique de la couverture

Modification des propriétés de transfert de la couverture (Fuites)

Objet du travail réalisé



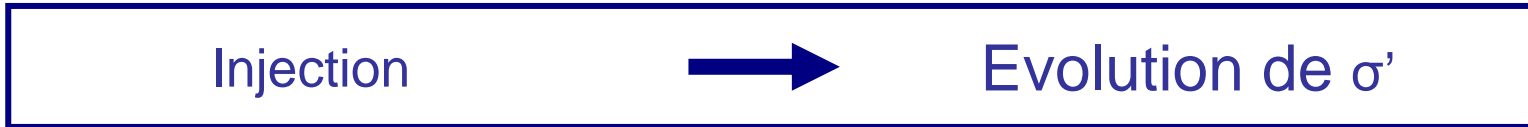
**Matériaux Hétérogènes & Quasi-Fragiles**

**Modélisation Probabiliste & Non Locale**

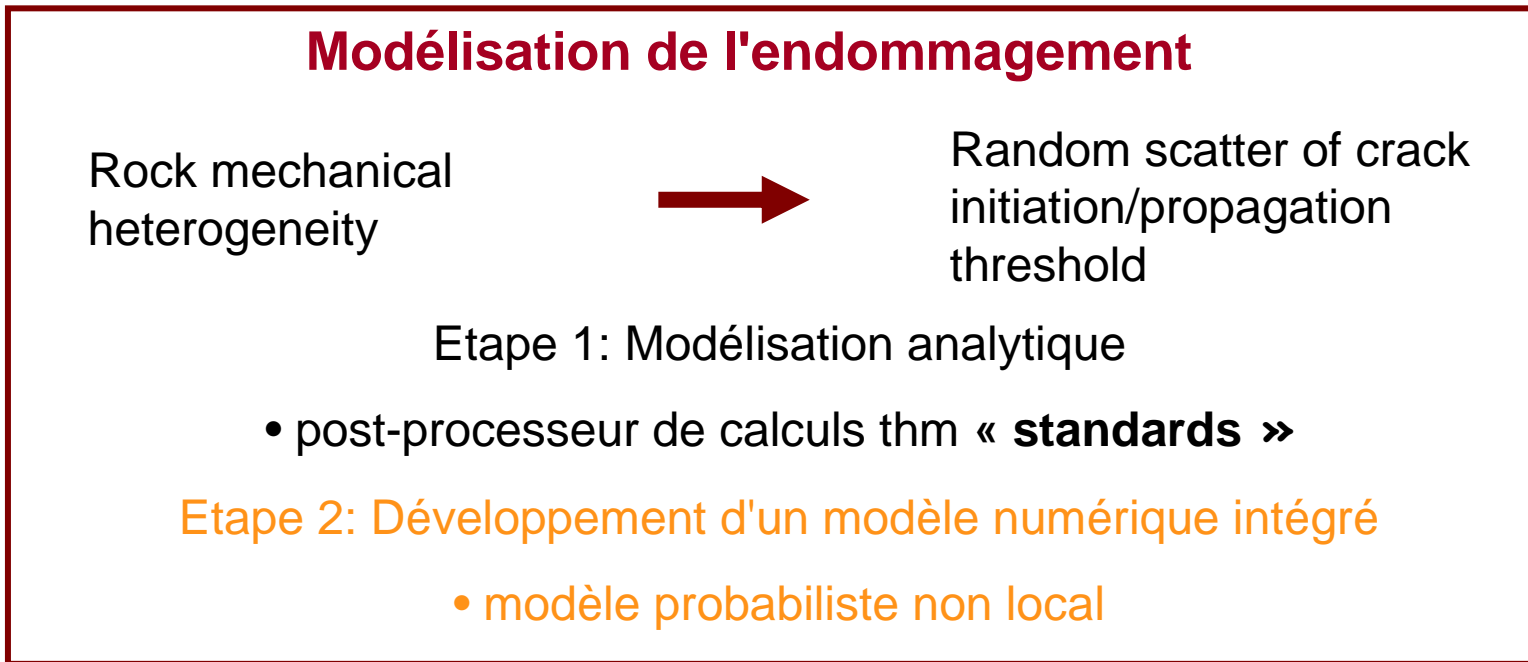


# Introduction

calculs THM  
« standards »



Développements  
actuels



Développement  
futur



## Cahier des charges

- > **Estimer le nombre et la longueur des fissures**
  - + Introduction de deux seuils, un pour décrire l'amorçage des micro-fissures , l'autre pour décrire la propagation des fissures amorcées (macro-fissures)
  
- > **Rendre compte de scénarios de rupture variés**
  - + Description de l'hétérogénéité des seuils d'amorçage
  
- > **Faciliter la mise en place d'un couplage externe avec un code de calcul par volumes finis**
  - + Utilisation d'une description simple de l'endommagement

## Plan de la présentation

Objectif : Mettre au point un outil polyvalent qui permette de simuler la formation de réseaux de fissures ouvertes

Plan :

- Opérateur de régularisation
- Seuil d'amorçage et de propagation des fissures
- Intégration numérique
- Validation des propriétés du modèle
- Comparaison aux résultats expérimentaux
- Exemple de simulation
- Conclusions et perspectives

## Un modèle non-local à deux seuils

### > Amorçage

- Seuil d'amorçage aléatoire – modèle de Poisson-Weibull

### > Propagation

- Seuil basé sur la ténacité de la roche – mécanique de la rupture

### > Résolution numérique

- Robustesse
- Indépendance à la discrétisation spatiale

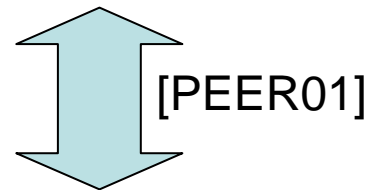
## **Modèle non-local basé sur le gradient des contraintes + Loi locale parfaitement fragile**

- **Écriture des deux seuil en fonction d'une même variable**
- **Indépendance à la discrétisation spatiale**
- Calcul correct du FIC sans remaillage
- Simulation du comportement adoucissant sans recours systématique au pilotage de chargement – facilité de convergence

## Opérateur de régularisation

> **Opérateur à gradient implicite** [PEER99]

$$\overline{\underline{\sigma}} - l_c^2 \Delta \overline{\underline{\sigma}} = \underline{\sigma} \quad \left( \vec{\nabla} \overline{\underline{\sigma}} \right) \cdot \vec{n} = \vec{0}$$



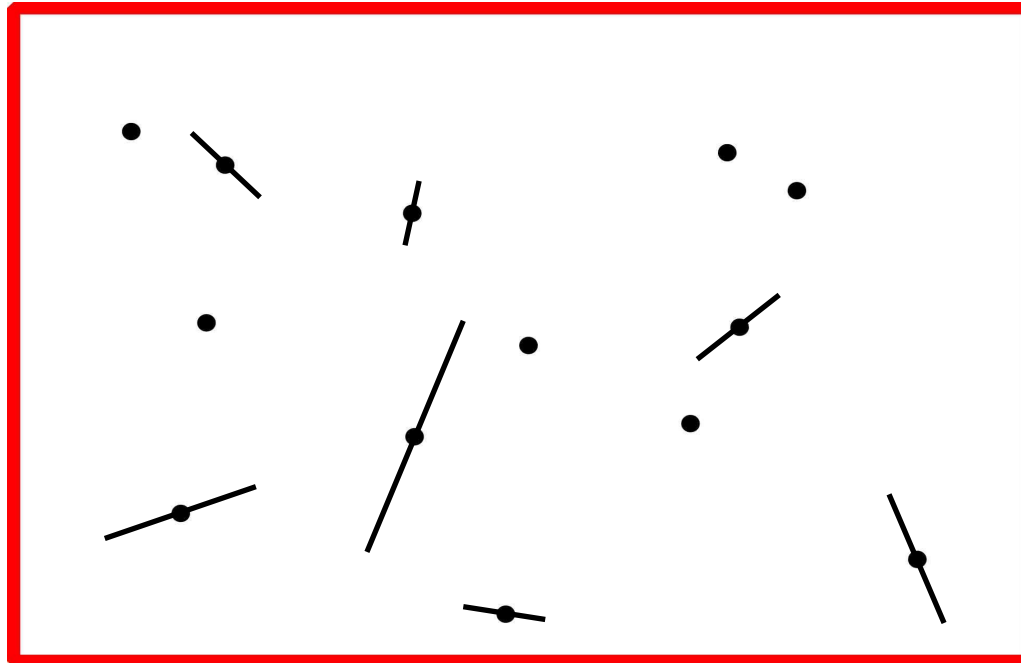
> **Opérateur à gradient implicite**

$$\overline{\underline{\sigma}}(x) = \int_{\Omega} G(|x - y|) \underline{\sigma}(y) d\Omega \quad G(r) = \frac{1}{4\pi l_c^2 r} \exp\left[-\frac{r}{l_c}\right]$$

[PEER99] Peerlings RHJ. Enhanced damage modelling for fracture and fatigue. Phd thesis, Eindhoven University of Technology, 1999.

[PEER01] Peerlings RHJ, Geers MGD, deBorst R et Brekelmans WAM. A critical comparison of non-local and gradient-enhanced softening continua. IJSS, 38, pp. 7723-7746, 2001.

## Modélisation probabiliste de l'amorçage de fissures ouvertes



Etat initial : micro-fissures réparties dans la roche

$$\lambda_t(\sigma) = \lambda_0 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m$$



# Modélisation probabiliste de l'amorçage de fissures ouvertes

Probabilité de rupture/amorçage : formulation

$$P_F = 1 - \exp[-HZ\lambda_t(\sigma)] \text{ avec } \lambda_t(\sigma) = \lambda_0 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m$$

$m$  : module de Weibull       $\frac{\sigma_0^m}{\lambda_0}$  : paramètre d'échelle

Paramètres de Weibull pour des roches avec  $Z=1 \text{ m}^3$  :

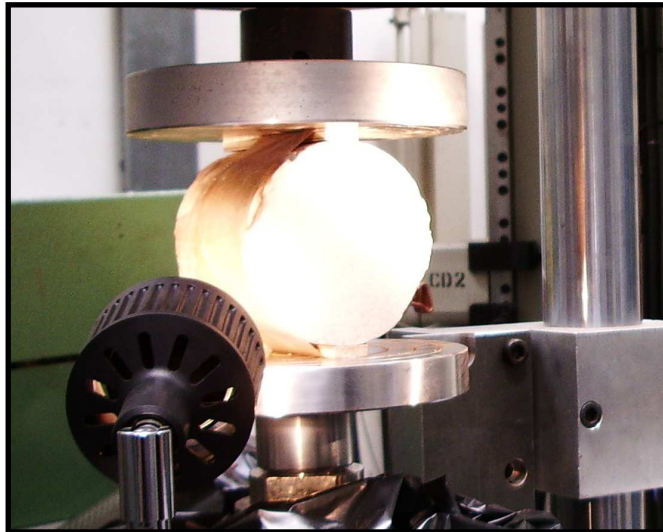
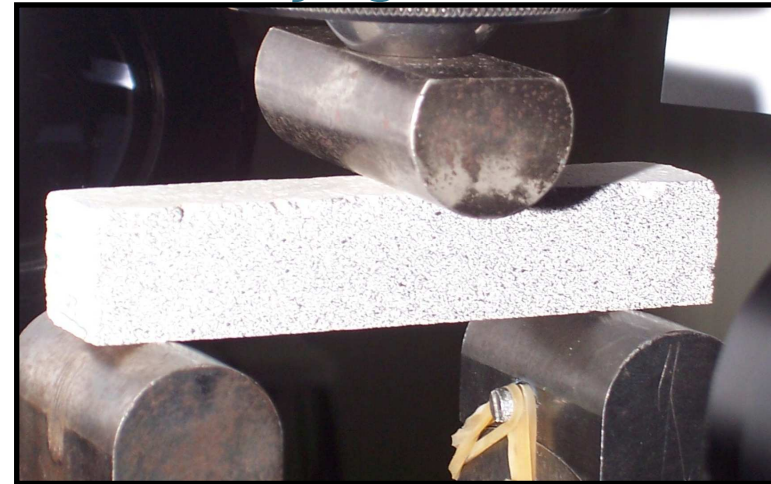
$$\sigma_Z = \frac{\sigma_0}{(Z\lambda_0)^{1/m}}$$

$$m = 3 \sim 9$$

$$\sigma_Z = 0,5 \sim 1,5 \text{ MPa}$$

# Modélisation probabiliste de l'amorçage de fissures ouvertes

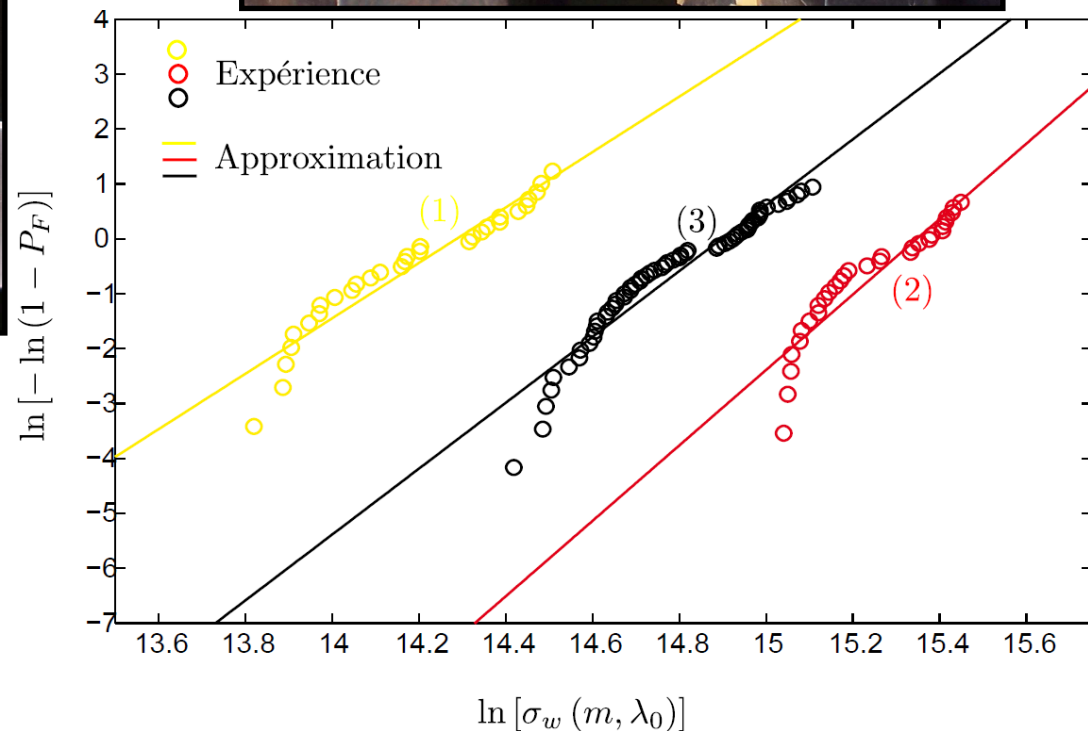
Probabilité de rupture/amorçage :  
identification



Contrainte de Weibull :

$$\sigma_w = \sigma_f (HZ\lambda_0)^{1/m}$$

$$m = 6, \quad \sigma_Z = 1MPa$$



## Seuil d'amorçage du modèle non local

### > Modèle de Poisson-Weibull

- Probabilité de rupture (Hypothèse du maillon le plus faible) d'un domaine de taille  $Z$

$$P_F = 1 - \exp[-Z \lambda_t(\sigma)] \text{ avec } \lambda_t(\sigma) = \lambda_0 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m$$

- Seuil d'amorçage (loi de Weibull inversée) :

$$\bar{\sigma}_I > S_a = \frac{\sigma_0}{(\lambda_0 Z)^{\frac{1}{m}}} [-\ln(1 - P_F)]^{\frac{1}{m}}$$

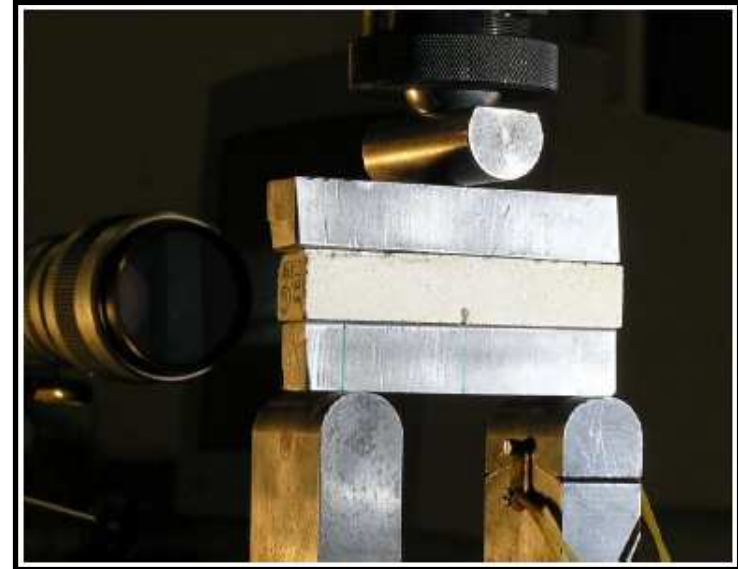
- Orientation de la fissure amorcée : perpendiculaire à la direction de la contrainte principale maximale

## Description de la propagation des fissures et identification

### > Condition de propagation

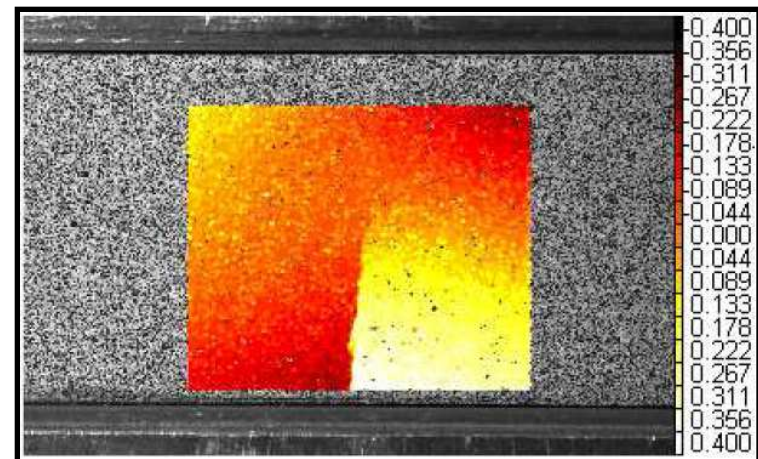
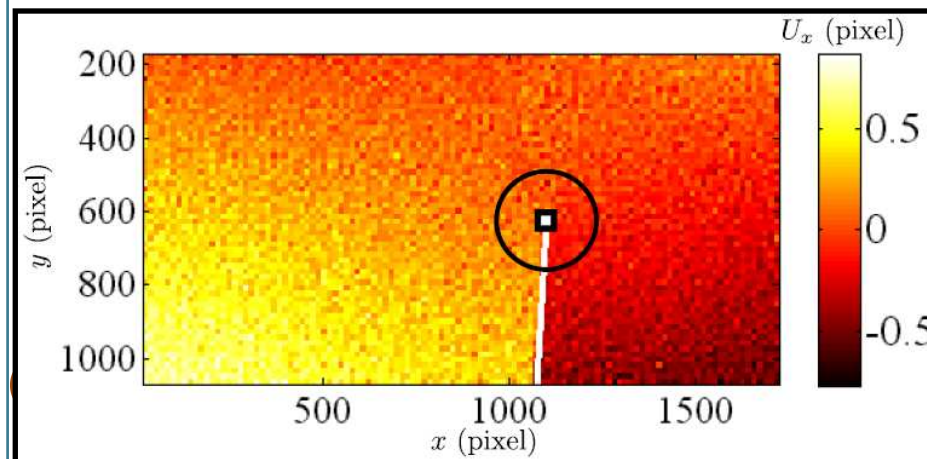
$$K > K_C$$

### > Méthode d'identification



Ténacité (0,21 MPa.m<sup>1/2</sup>)

CORRELI Q4



# Propagation des fissures : évaluation d'un facteur d'intensité des contraintes « régularisées »

## > Condition de propagation $K > K_c$

Solution asymptotique de Westergaard (en pointe de fissure)

+

Solution intégrale de l'équation de régularisation (équation de Helmholtz)

$$\underline{\underline{\bar{\sigma}_p}}(K_I, K_{II}) = \frac{\Gamma^2\left(\frac{3}{4}\right)}{5\pi} \frac{1}{\sqrt{\pi d_c}} \begin{bmatrix} 4K_I & 4K_{II} & 0 \\ 4K_{II} & 6K_I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \overline{\sigma_{33p}} \vec{e}_3 \otimes \vec{e}_3$$

$$\bar{\sigma}_I > S_p = \frac{6\Gamma^2\left(\frac{3}{4}\right)}{5\pi} \frac{K_c}{\sqrt{\pi d_c}}$$

- Orientation de la fissure amorcée : perpendiculaire à la direction de la contrainte principale maximale

## Seuil de propagation et loi locale

### > A propos du seuil de propagation introduit

- Pour une sollicitation en mode I pur

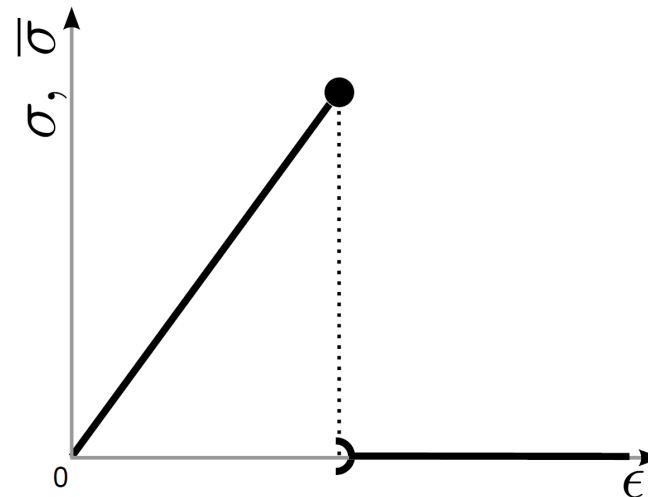
$$K_c < K_I$$

- Pour une sollicitation en mode mixte (I & II)

$$K_c < \frac{5}{6} K_I + \sqrt{\frac{1}{36} K_I + \frac{4}{9} K_{II}} \approx K_I + \frac{2}{3} K_{II}$$

### > Loi Locale parfaitement fragile

$$d = H\left(\langle \overline{\sigma}_I - S_a \rangle + \langle \overline{\sigma}_I - S_p \rangle\right), \quad \dot{d} \geq 0$$



## Cohérence entre les deux seuils

Longueur caractéristique > Longueur des micro-fissures initiales

$$a \leq l_c$$

(Domaine de validité du modèle de Poisson-Weibull)

On en déduit un critère de cohérence des deux seuils

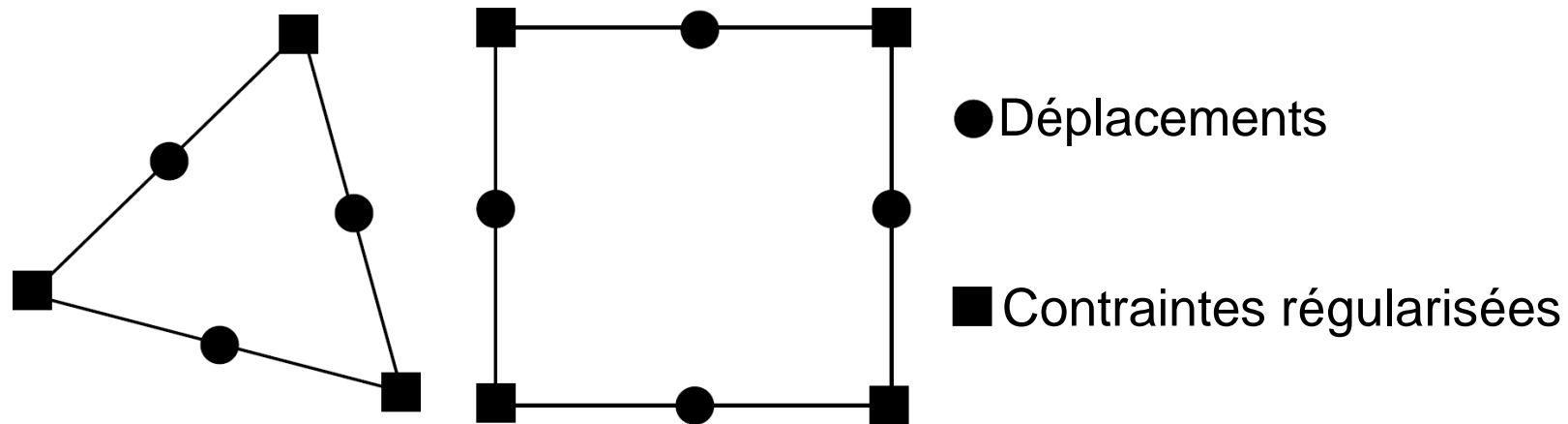
$$S_a = \frac{\sigma_0}{(\lambda_0 Z)^{\frac{1}{m}}} [-\ln(1 - P_F)]^{\frac{1}{m}} = \frac{K_c}{\sqrt{\pi a}}$$

$$S_a > S_p$$

On doit savoir quel seuil utiliser :  
- en tout point de la structure  
- à tout instant

## Méthode de résolution numérique

### > Discrétisation spatiale



### > Amorçage de fissures

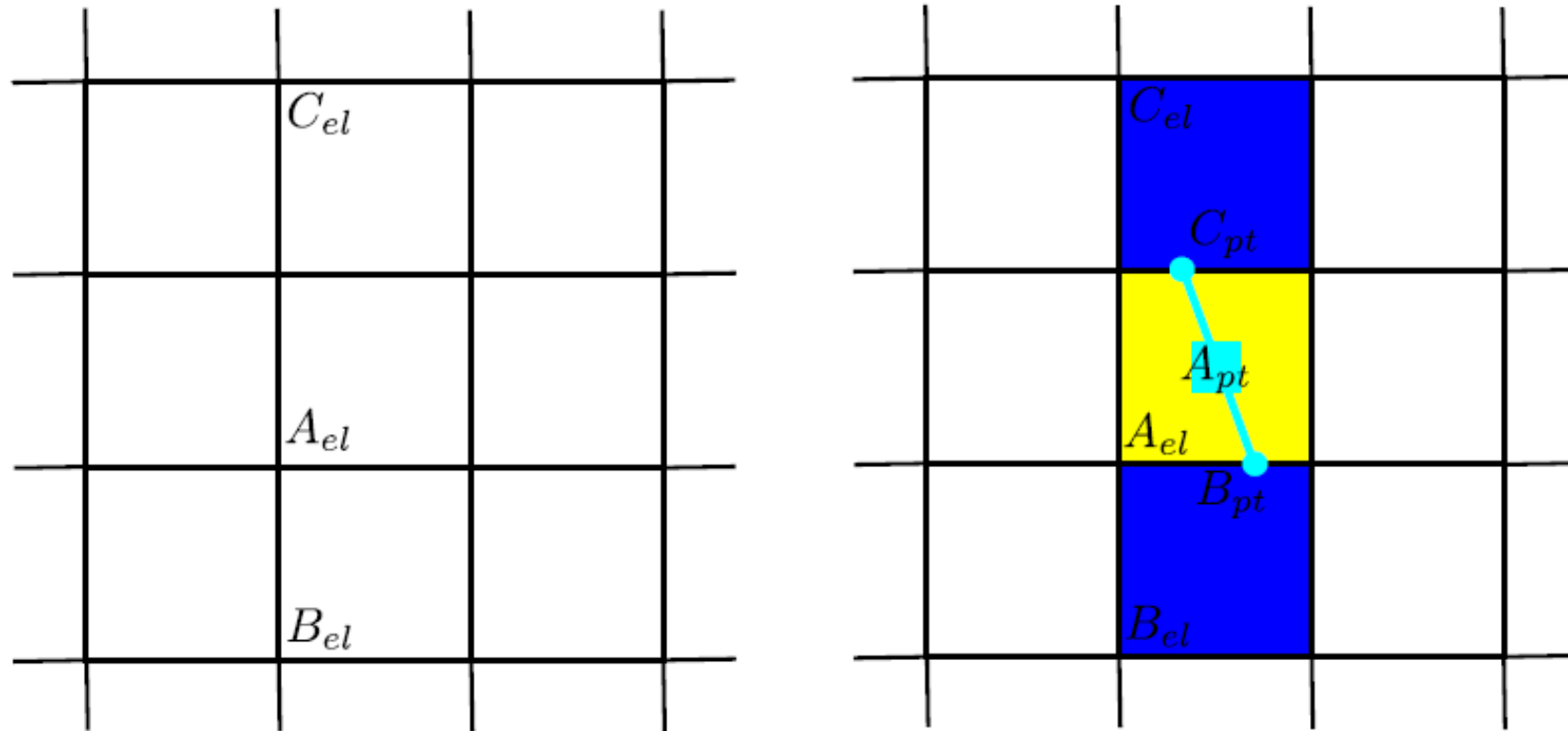
- Lieu : centre de chaque élément ne contenant pas de pointe de fissure
- Domaine : l'élément
- Taille de la fissure amorcée : telle que le domaine soit traversé

### > Propagation de fissures

- Lieu : à la pointe d'une fissure
- Pas de fissuration : tel que le l'élément soit traversé

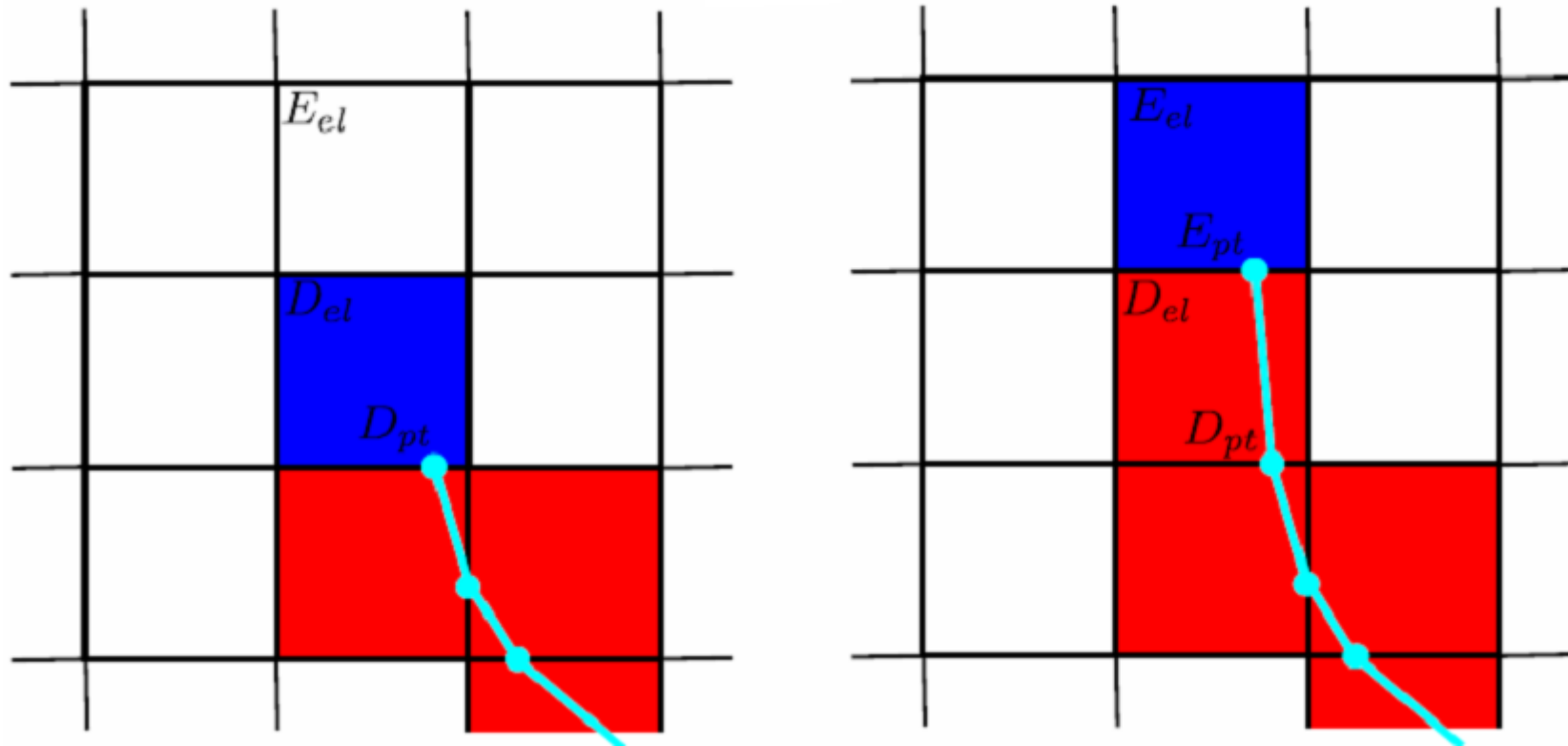


## Fonctionnement du repérage des éléments



- Élément sain ( $d = 0$ )
 
 Élément rompu par amorçage ( $d = 1$ )
- Élément pointé ( $d = 0$ )
 
 Élément rompu par propagation ( $d = 1$ )
- Lieu de rupture par amorçage
 
 Lieu de rupture par propagation
- Trajet de fissuration

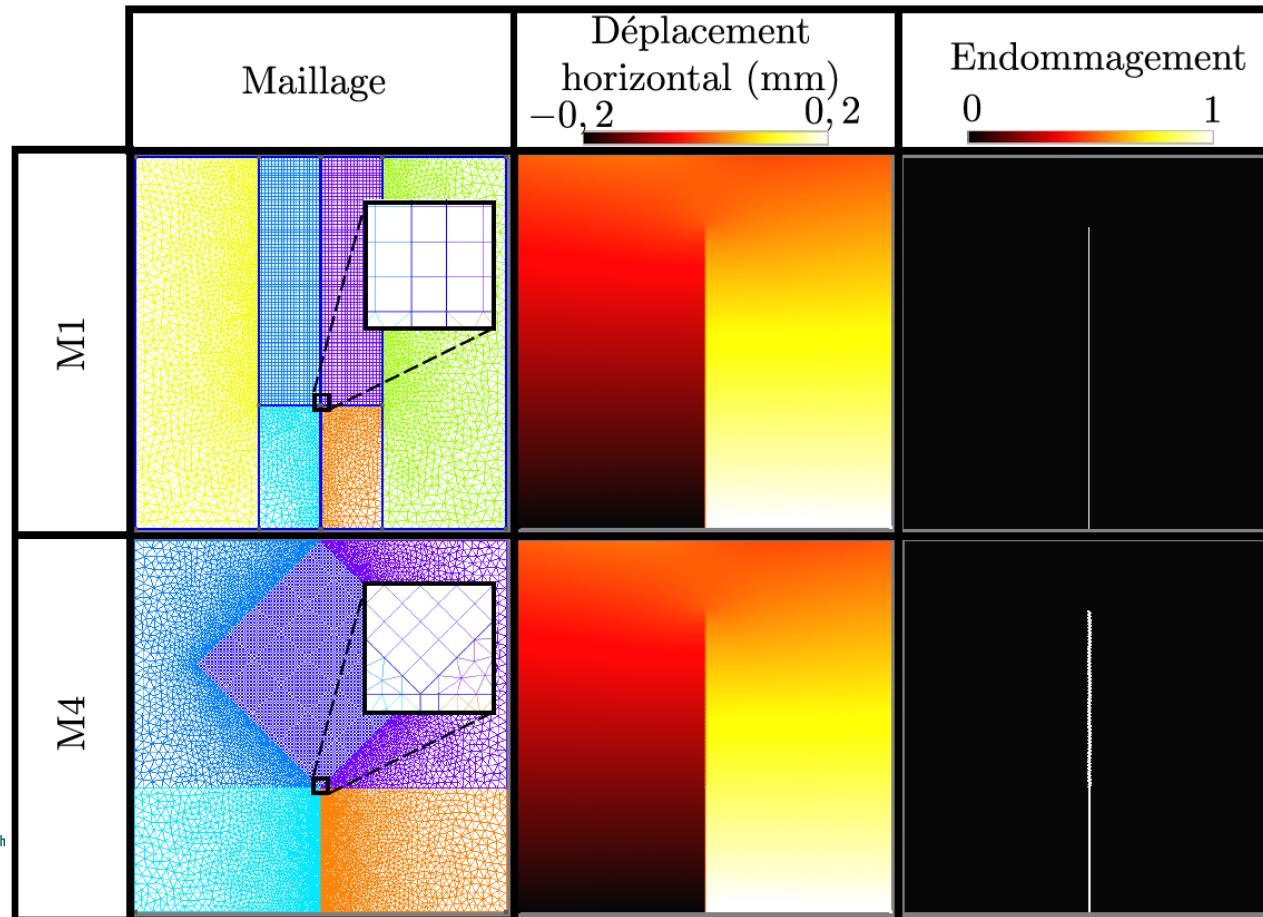
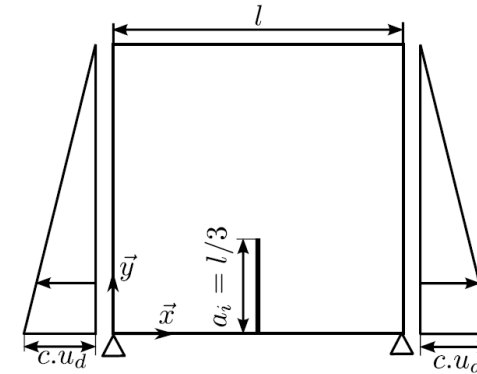
## Fonctionnement du repérage des éléments



- 
- Élément sain ( $d = 0$ )     
  Élément rompu par amorçage ( $d = 1$ )
- Élément pointé ( $d = 0$ )     
  Élément rompu par propagation ( $d = 1$ )
- Lieu de rupture par amorçage     
  Lieu de rupture par propagation
- Trajet de fissuration

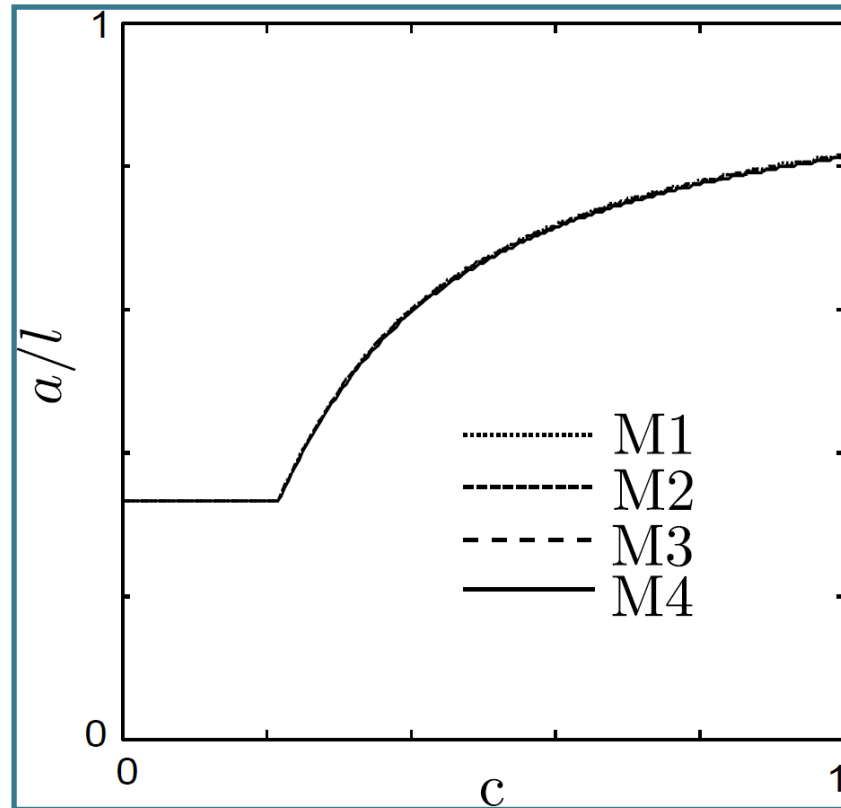
## Validation de l'indépendance au maillage

- > On modélise un problème simple en utilisant 4 maillages

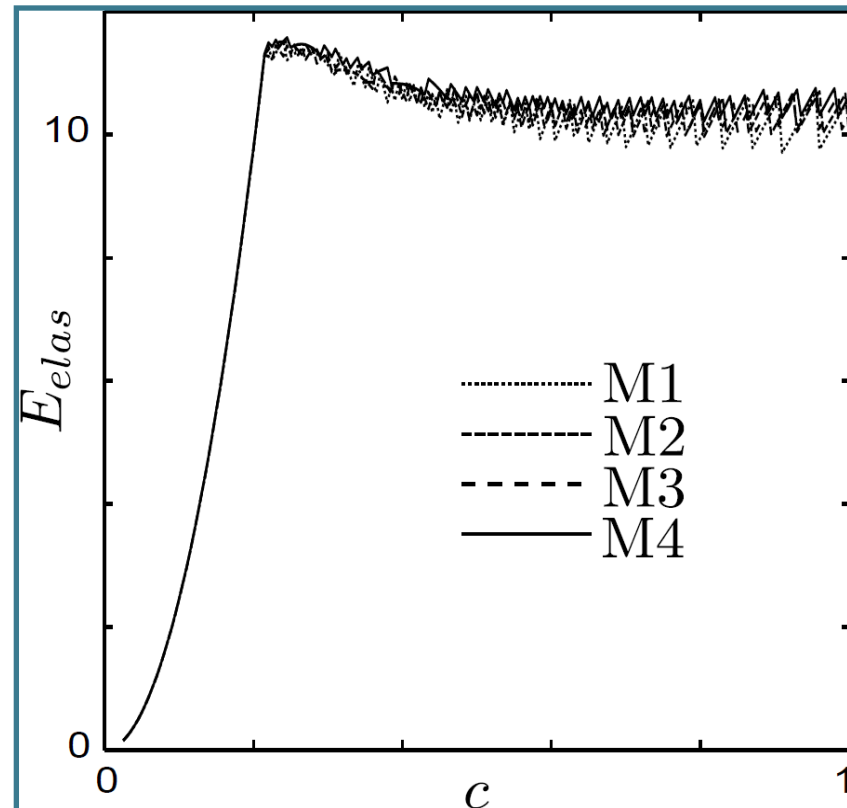


# Validation de l'indépendance au maillage

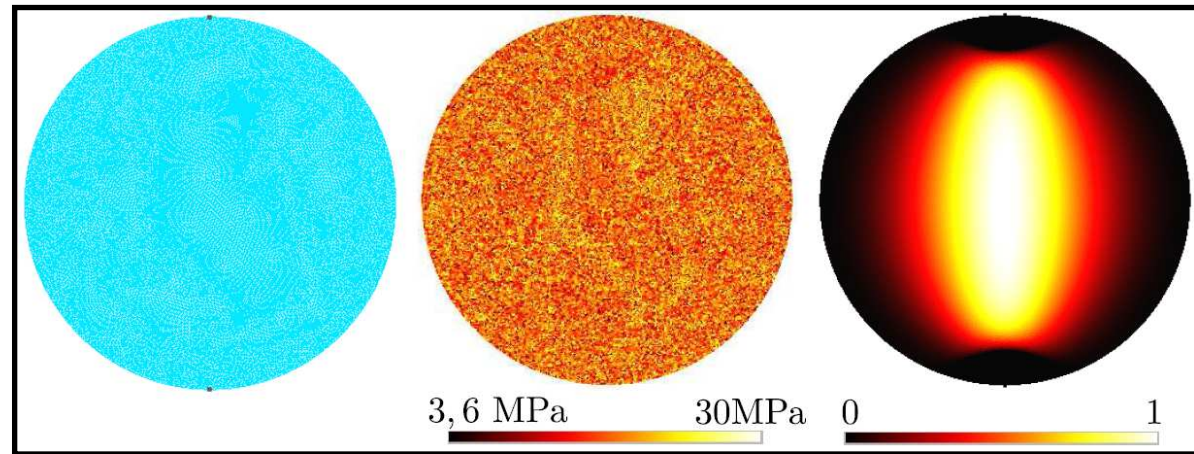
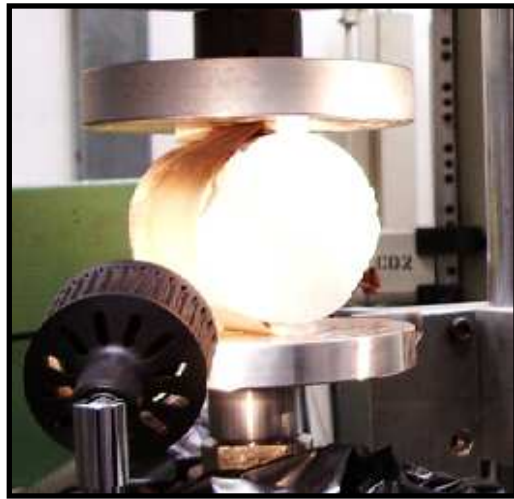
## > Critère local



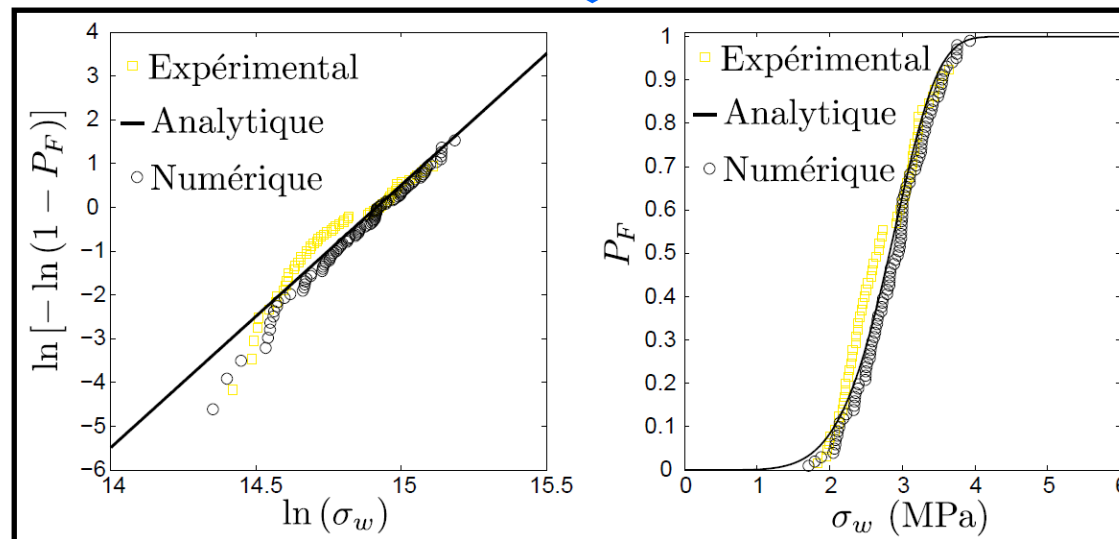
## > Critère global



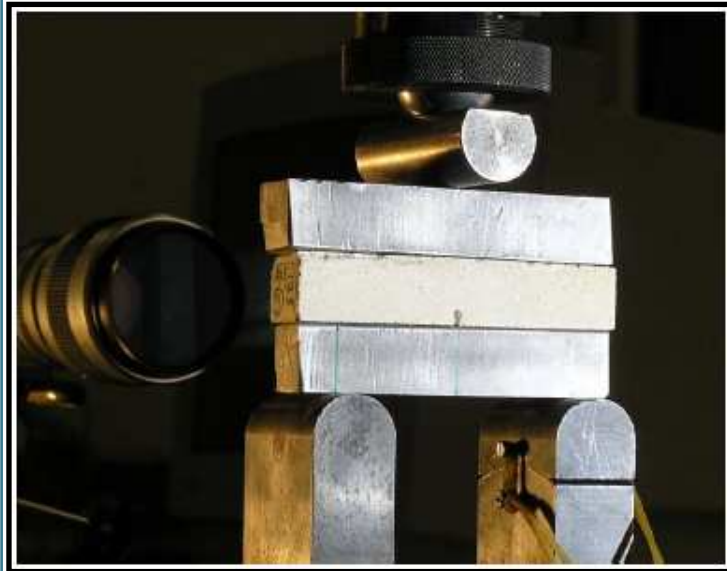
## Comparaison aux résultats expérimentaux : l'amorçage



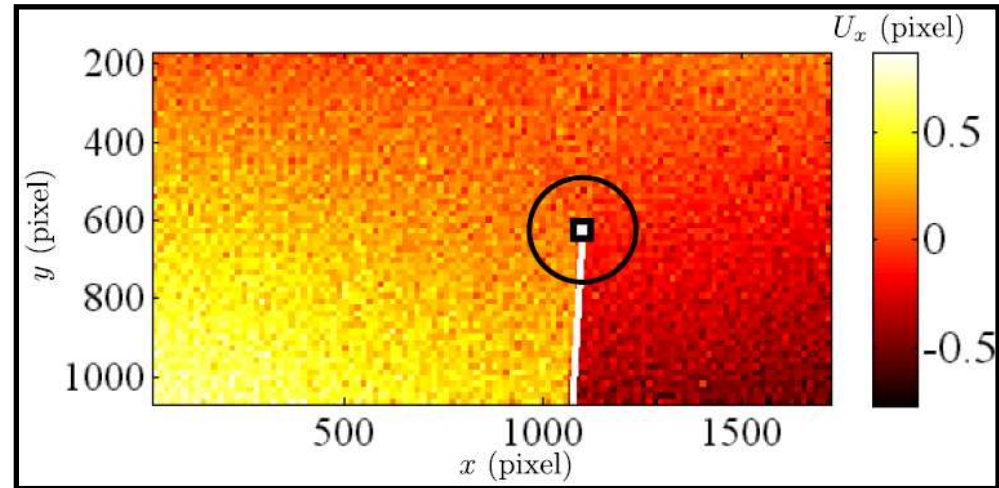
Paramètres de Weibull



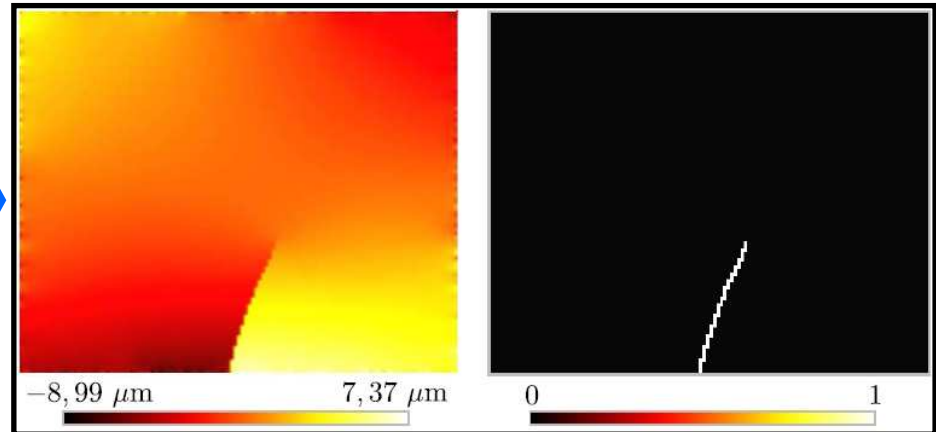
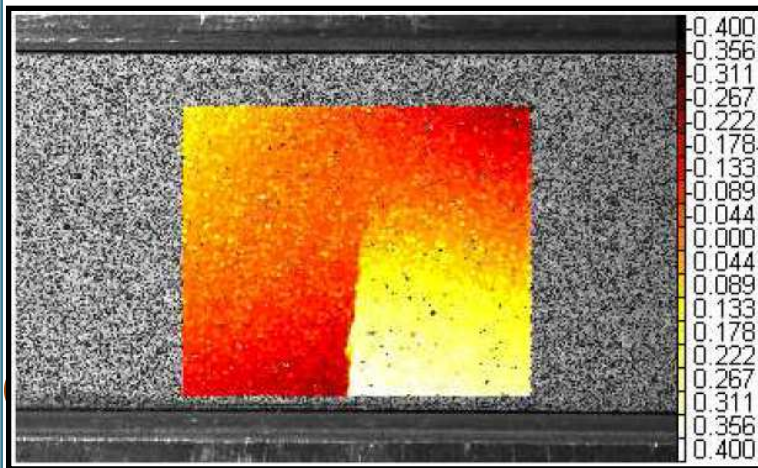
## Comparaison aux résultats expérimentaux : la propagation



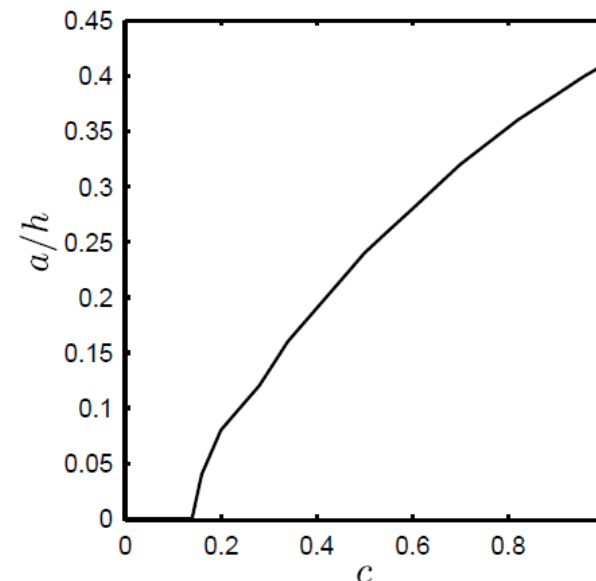
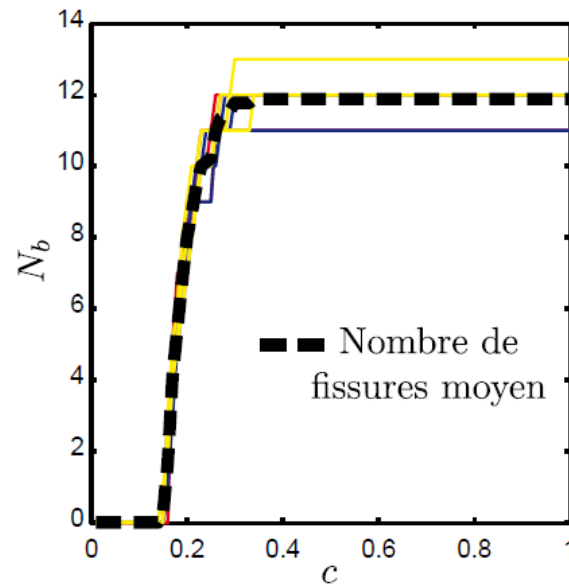
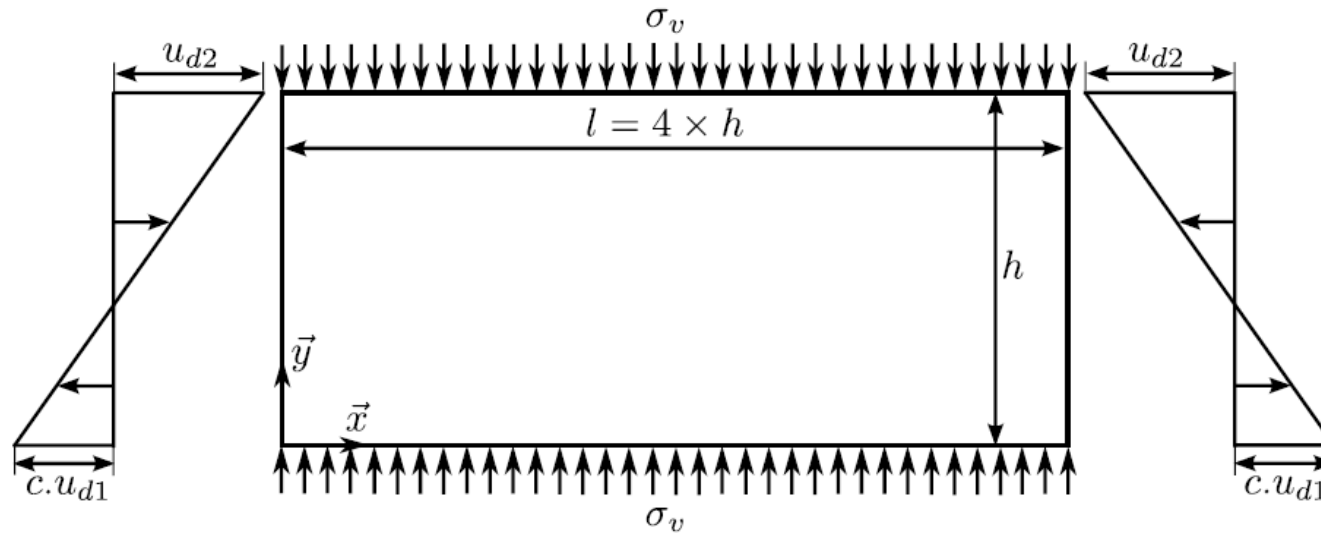
CORRELI Q4



Ténacité (0,21 MPa.m<sup>1/2</sup>)



# Exemple de simulation

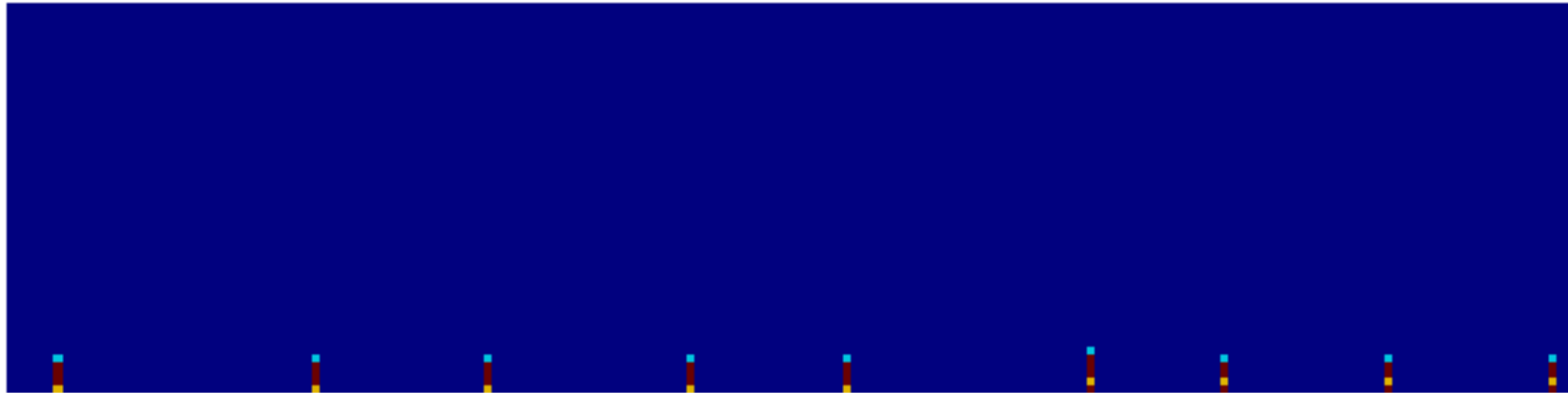


## Exemple de simulation

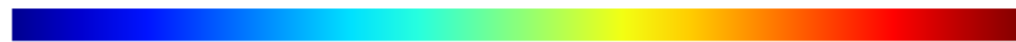
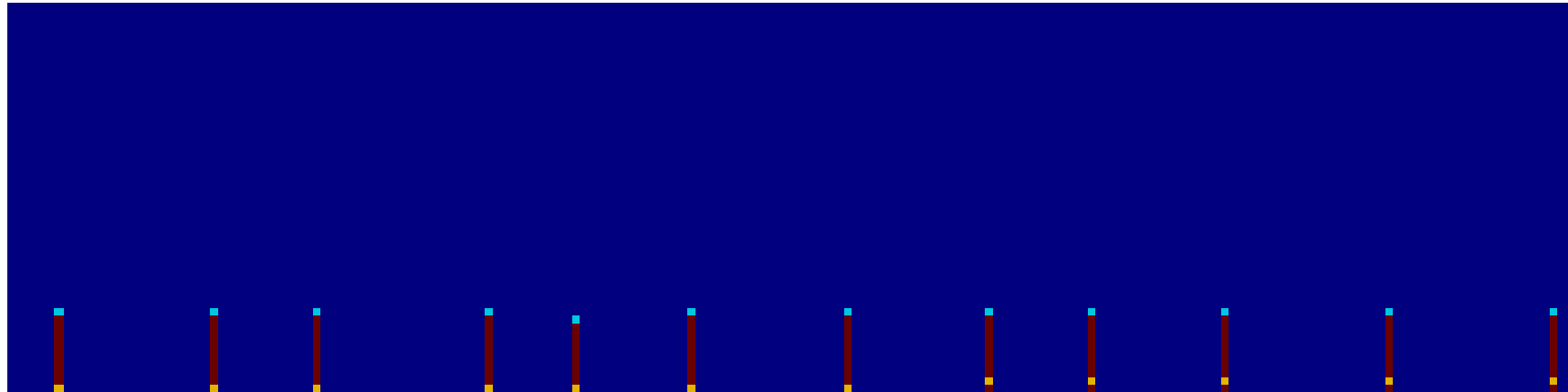




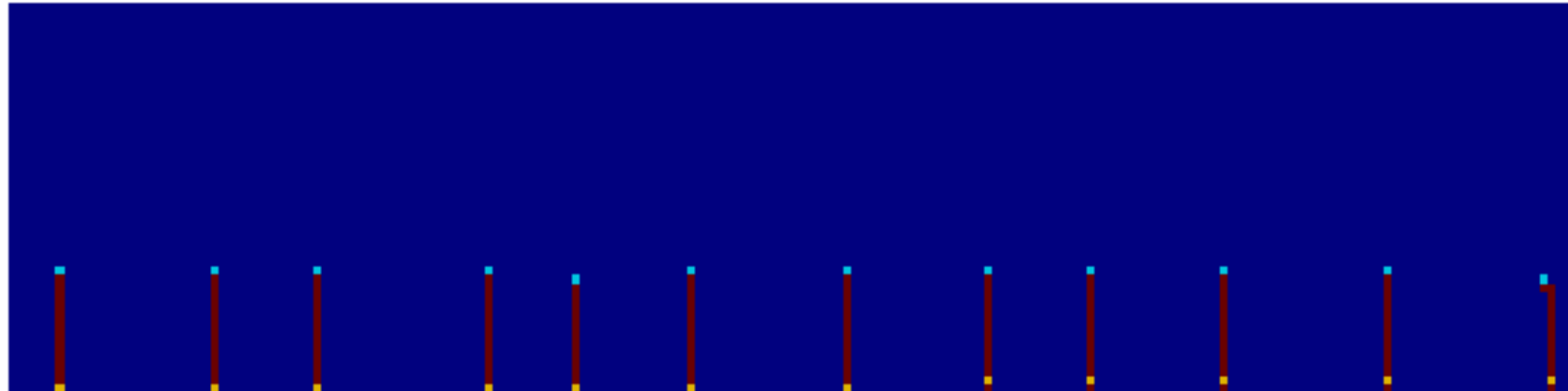
## Exemple de simulation



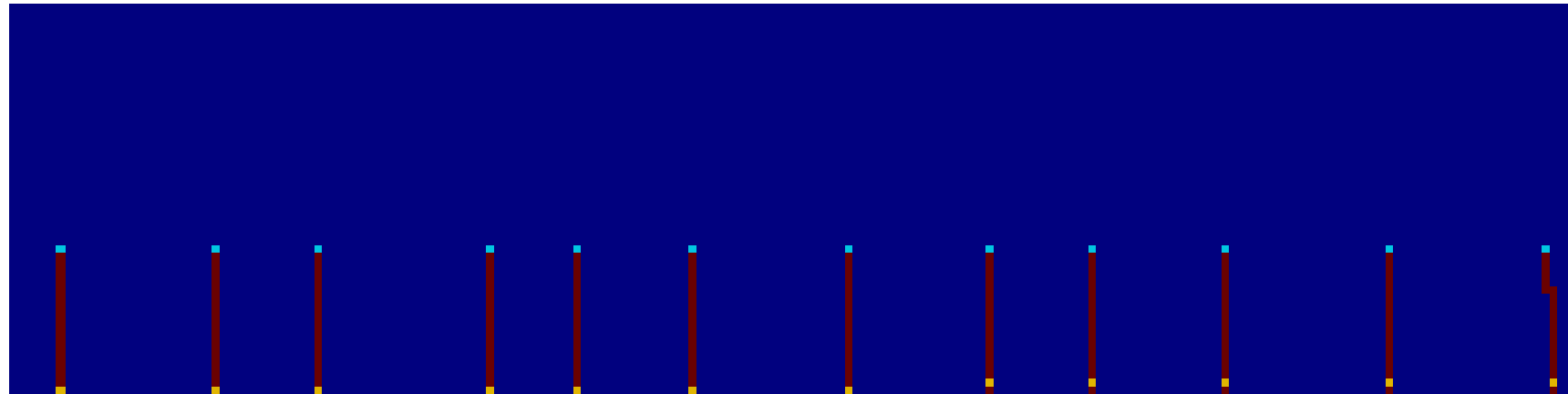
## Exemple de simulation



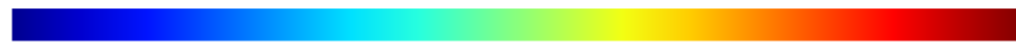
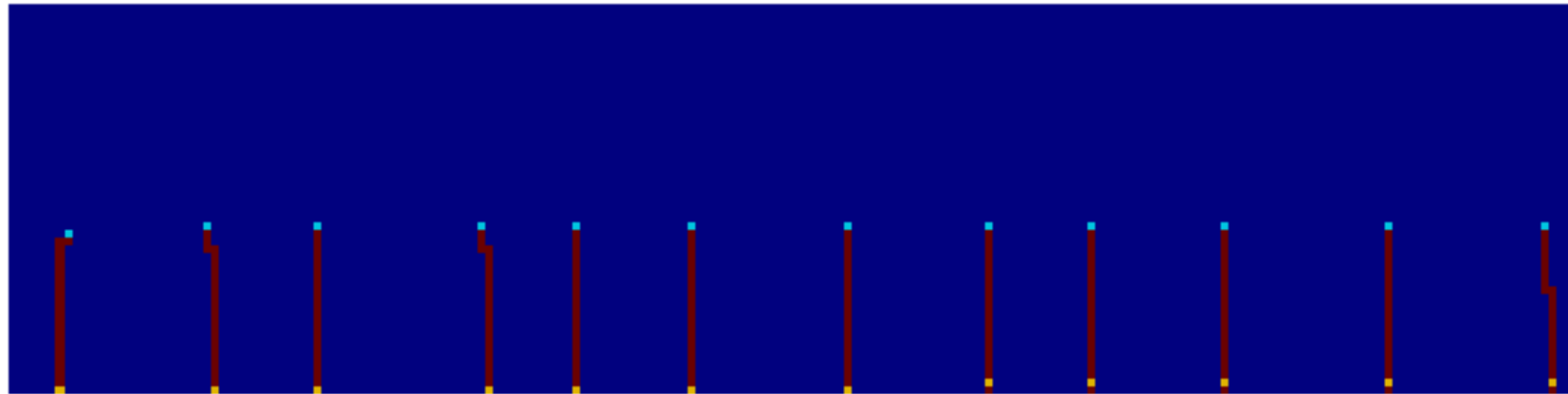
## Exemple de simulation



## Exemple de simulation



## Exemple de simulation



## Bilan

### > **Le modèle numérique permet de faire des calculs éléments finis :**

- pour des cas de multi-fissuration (réseaux de fissures)
- avec un schéma numérique implicite
- sans nécessairement utiliser une méthode de type "longueur d'arc" pour des cas de propagation (légèrement) instable de fissures
- avec des résultats indépendants du maillage
- avec une description de l'évolution du problème par un champ d'endommagement facilitant la mise en place d'un couplage externe avec un code de calcul par volumes finis

## > Perspectives

- Couplage externe entre le modèle mécanique développé et un simulateur d'écoulement
- Prise en compte de l'anisotropie (élastique) du matériaux
- Prise compte de la propagation de fissures frottante sous cisaillement:
  - Endommagement anisotrope  
+ couplage endommagement-élasticité unilatéral
  - Approfondir le critère de propagation