

# **Transition endommagement-fissure : détection par suivi de crête et insertion par adaptation de maillage**

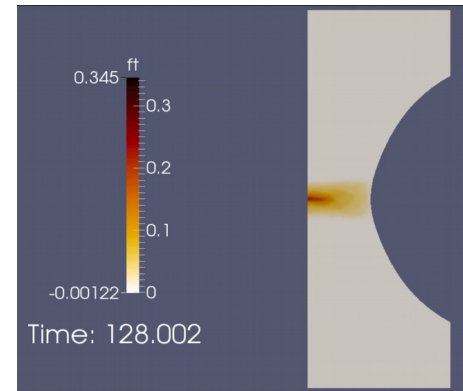
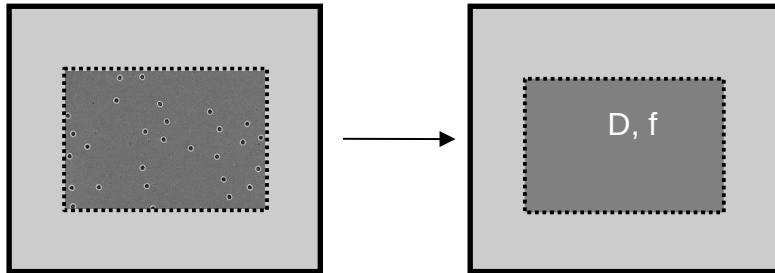
Sylvia Feld-Payet

DMAS, Onera – The French Aerospace Lab, Châtillon France

**Colloque MECAMAT Aussois 2019**

# Introduction

Point de départ: un modèle continu d'endommagement couplé ou non



Motivations:

→ **Amorçage** de fissure sans pré-fissure (quasi-fragile)

→ Sens physique (ductile) :

- si **comportement global progressivement affecté** par la dégradation matériau

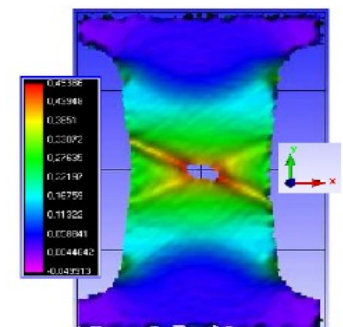
→ modèle couplé

- si **taille de la zone d'élaboration**

pas négligeable par rapport à celle de la

structure → fixée par un

paramètre de la méthode de régularisation



Déformation (CIN)

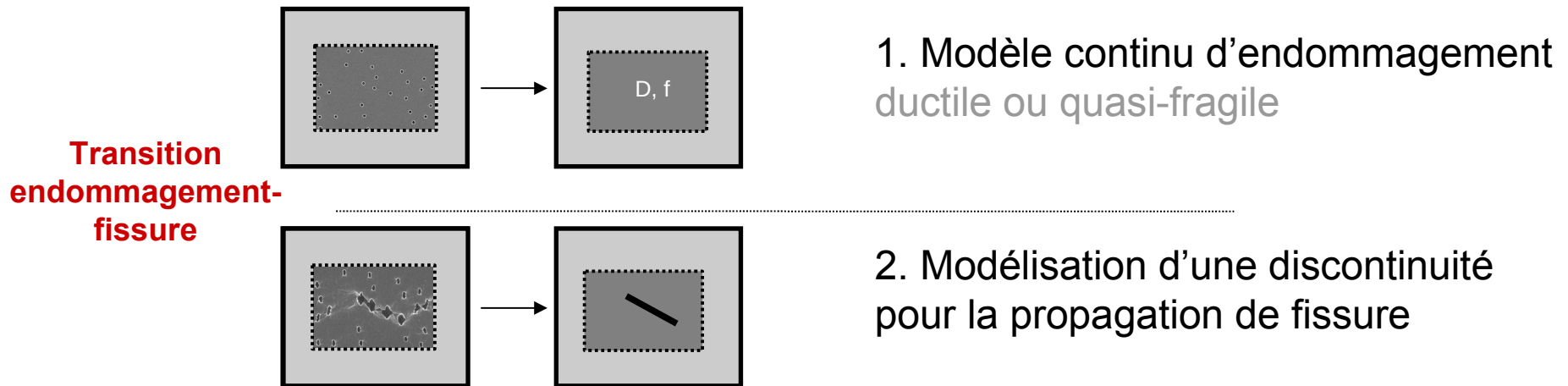
[Dournaux 09]

# Introduction

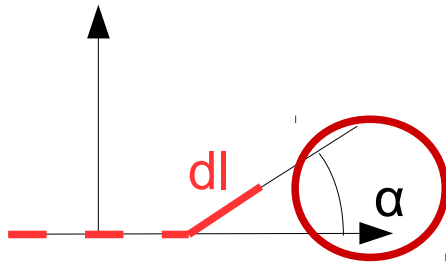
## Limites des modèles continus d'endommagement:

- Cinématique de rupture pas correctement représentée
- Ne permet pas la visualisation de surfaces de fissure 3D complexes
- Pas de front de fissure clairement défini
- Pas de modélisation facile de refermeture de lèvres et pas de contact

## Solution: approche continue - discontinue



[Ortiz and Pandolfi 99 and 02; Wells and Sluys 02; Belytschko et al 03; Simone et al 03, Patzak and Jirasek 03; Areias and Belytschko 05; Mediavilla 05; Comi et al 07; Feld-Payet 10; Simatos 10; Javani 11, Oliver et al 14, Lloberas-Valls et al 16, Saloustros et al 18 ]



## Transition endommagement-fissure :

1. Où ?

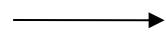


**Algorithme de localisation de fissure**

→ équivalent critère de bifurcation en MLR

→ garantit la continuité de chaque fissure

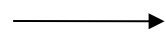
2. Comment ?



**Modélisation de la discontinuité**

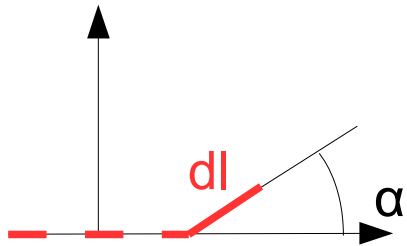
3. Quand ?

Jusqu'à où ?



**Critère d'insertion**

→  $dl \geq 0$  ?



## Transition endommagement-fissure :

1. Où ?

→ **Algorithme de localisation de fissure**

2. Comment ?

→ **Modélisation de la discontinuité**

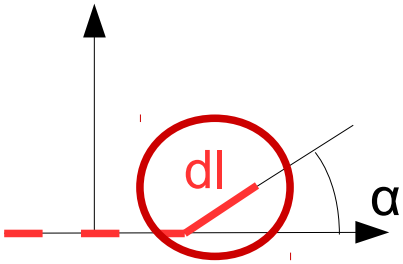
- Érosion,
- Enrichissement de l'élément,
- Enrichissement des nœuds,
- **Adaptation de maillage**

3. Quand ?

Jusqu'à où ?

→ **Critère d'insertion**

→  $dl \geq 0$  ?



## Transition endommagement-fissure :

1. Où ?

→ **Algorithme de localisation de fissure**

2. Comment ?

→ **Modélisation de la discontinuité**

3. Quand ?

Jusqu'à où ?

→  $dl \geq 0$  ?

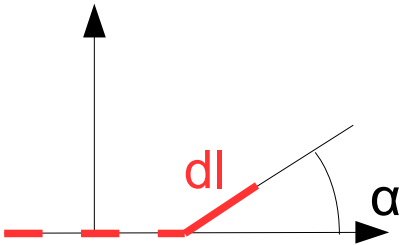
→ **Critère d'insertion**

→ lié à l'énergie élastique libérée en MLR

→ cohérence vis-à-vis du modèle (max D/f, CZM)

→ cohérence vis-à-vis de la physique (conservation de l'énergie, comparaison avec l'expérience,...)

→ **défis liés à la stabilité numérique**



1. Où ?

2. Comment ?

3. Quand ?  
Jusqu'à où ?  
→  $dl \geq 0$  ?

## Transition endommagement-fissure :

### Contraintes pour le transfert à un partenaire industriel:

Méthodologie doit être adaptée à:

- Différents matériaux :

superalliage base nickel, aluminium,...

→ différents comportements matériau,

→ différentes méthodes de régularisation,...

- Différents types de chargement:

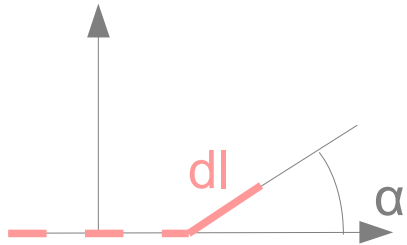
quasi-statique, dynamique, fatigue,...

- Différents solveurs EF (résolution en parallèle)

+ peu intrusive

+ coût de calcul raisonnable

+ convient pour un utilisateur non-spécialiste



## Introduction

### I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

Où ?

1. État de l'art des algorithmes de localisation
2. L'algorithme « marching ridges »
3. Quelques applications numériques

Comment ?

### II. Insertion par adaptation de maillage

Quand ?

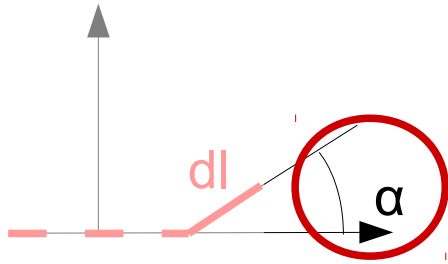
Jusqu'à où ?

→  $dl \geq 0$  ?

1. Aperçu des méthodologies possibles
2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision
3. Quelques applications numériques

## Bilan et discussion





## Introduction

### I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

Où ?

1. État de l'art des algorithmes de localisation
2. L'algorithme « marching ridges »
3. Quelques applications numériques

Comment ?

### II. Insertion par adaptation de maillage

Quand ?

Jusqu'à où ?

→  $dl \geq 0$  ?

1. Aperçu des méthodologies possibles
2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision
3. Quelques applications numériques

## Bilan et discussion

## 1. État de l'art des algorithmes de localisation

3 groupes :

### *Algorithmes locaux*

- Approche géométrique pour la propagation de la fissure à partir d'un front initial
- **Informations locales** → **peu coûteux**

### *Algorithmes globaux*

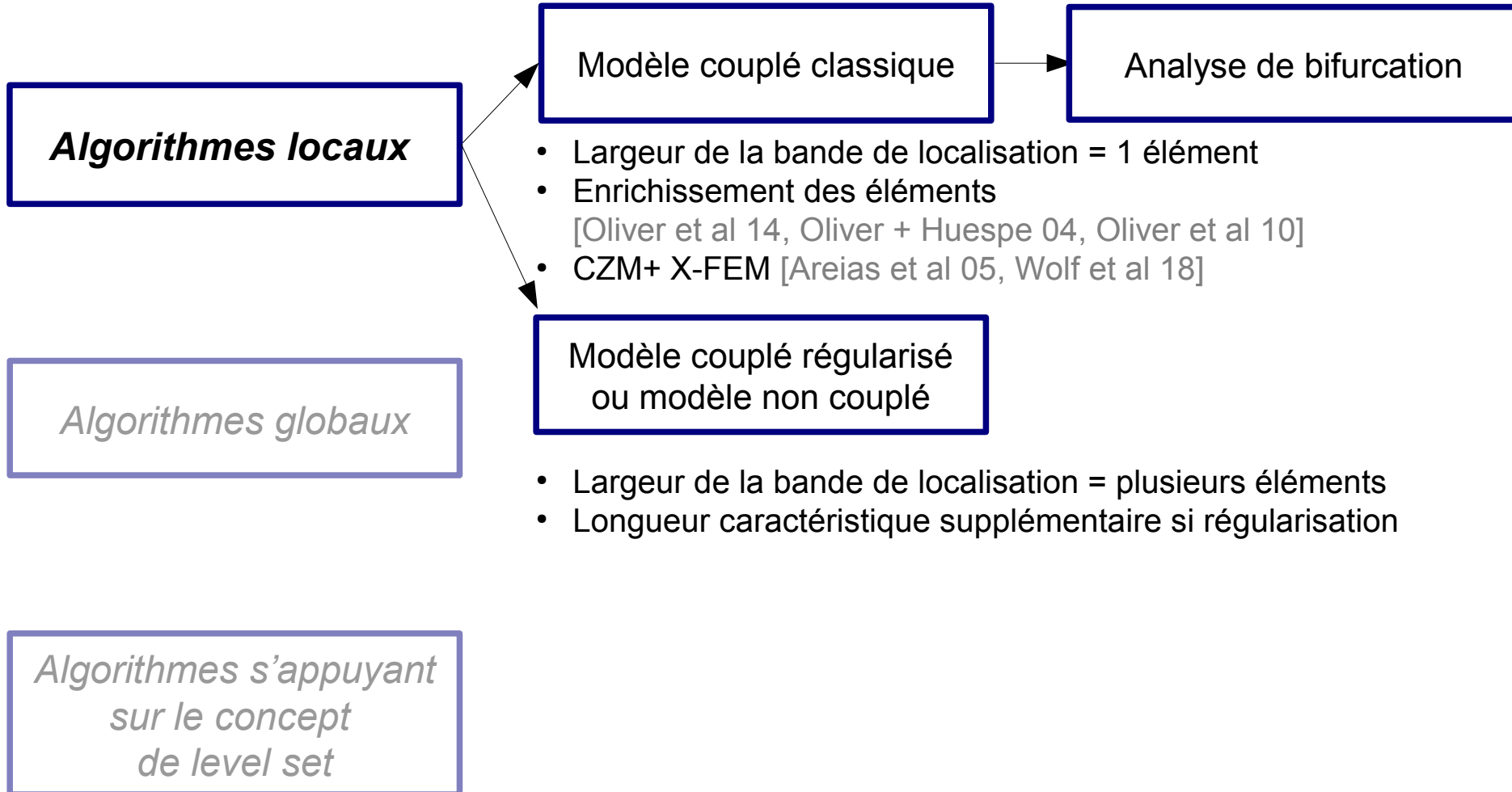
- tracent tous les chemins de fissure possibles simultanément
- Requiert la **résolution d'un problème supplémentaire**  
→ **lourd et intrusif**  
ex: problème de type conduction thermique [Oliver et al 04]  
petites déformations [Huespe et al 09],  
transformations finies [Huespe et al 12]

### *Algorithmes s'appuyant sur le concept de level set*

- Partagent des caractéristiques des deux autres types d'algo  
[Stolarska et al 01, Moës et al 11]

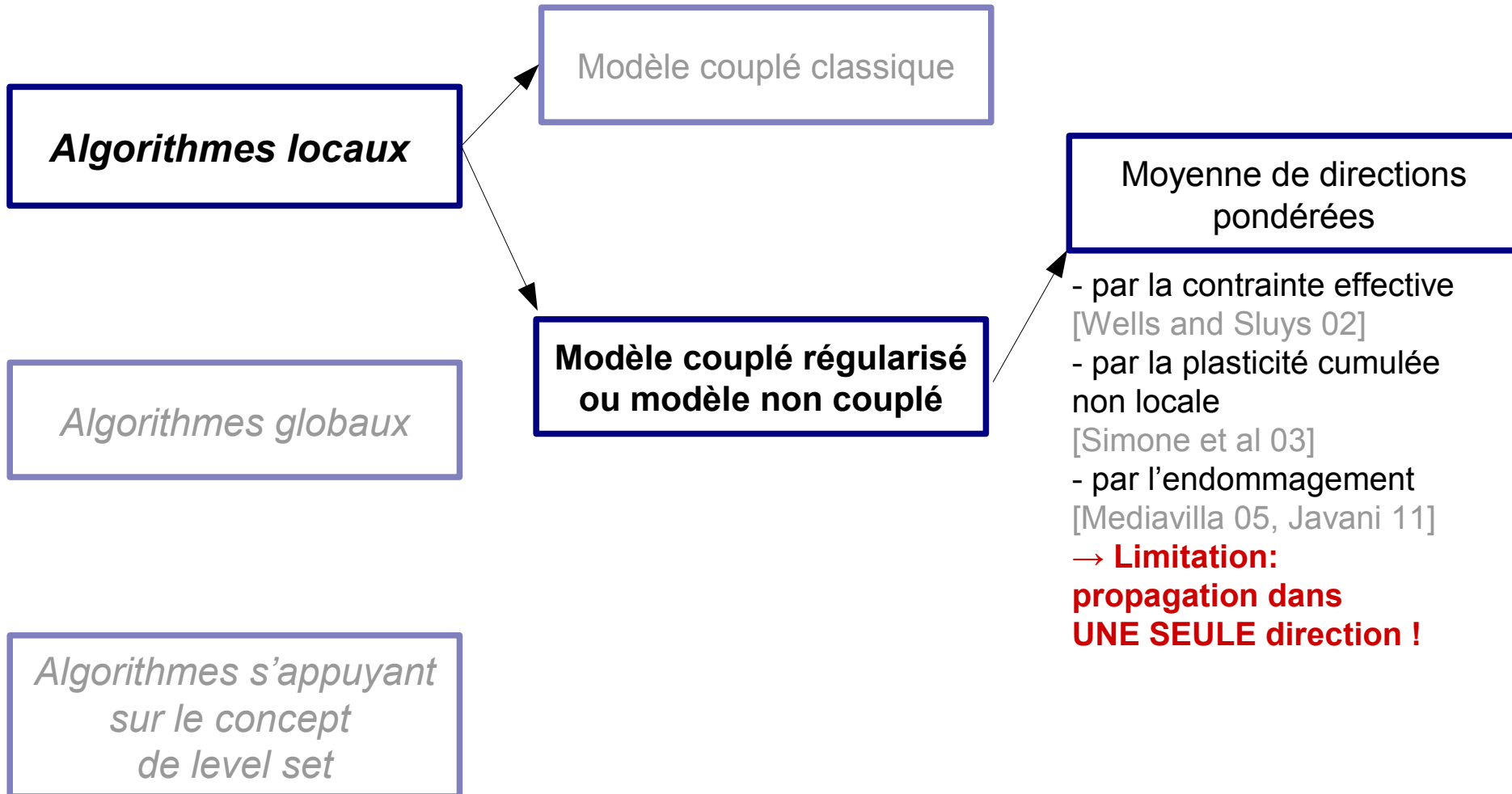
## 1. État de l'art des algorithmes de localisation

Si bande de localisation: choix dépend de sa représentation



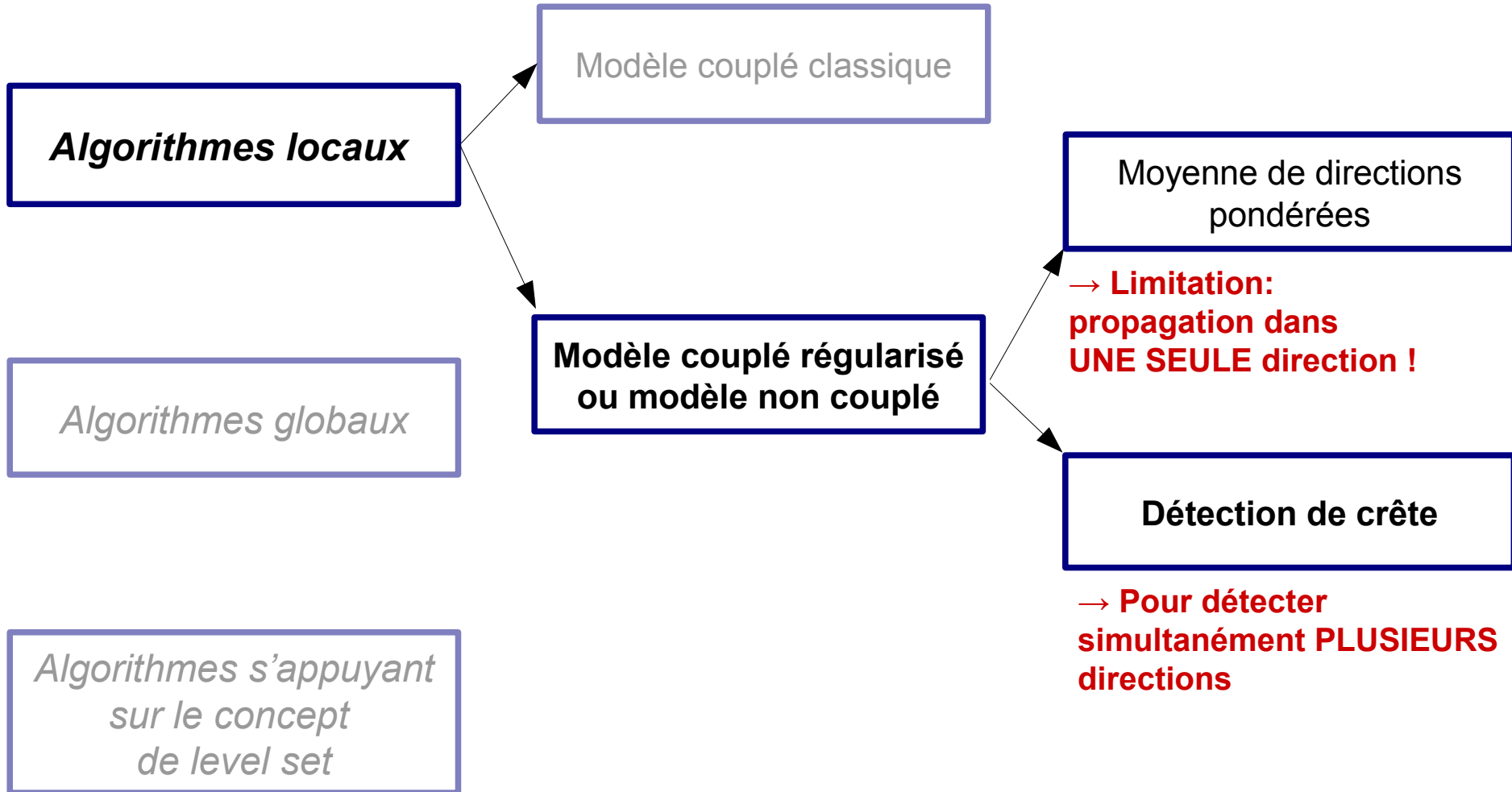
# I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

## 1. État de l'art des algorithmes de localisation



# I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

## 1. État de l'art des algorithmes de localisation

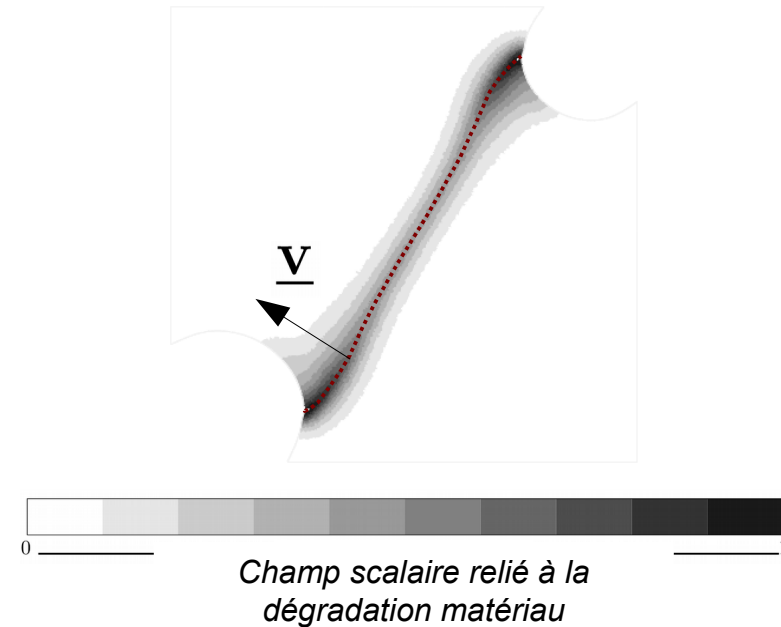
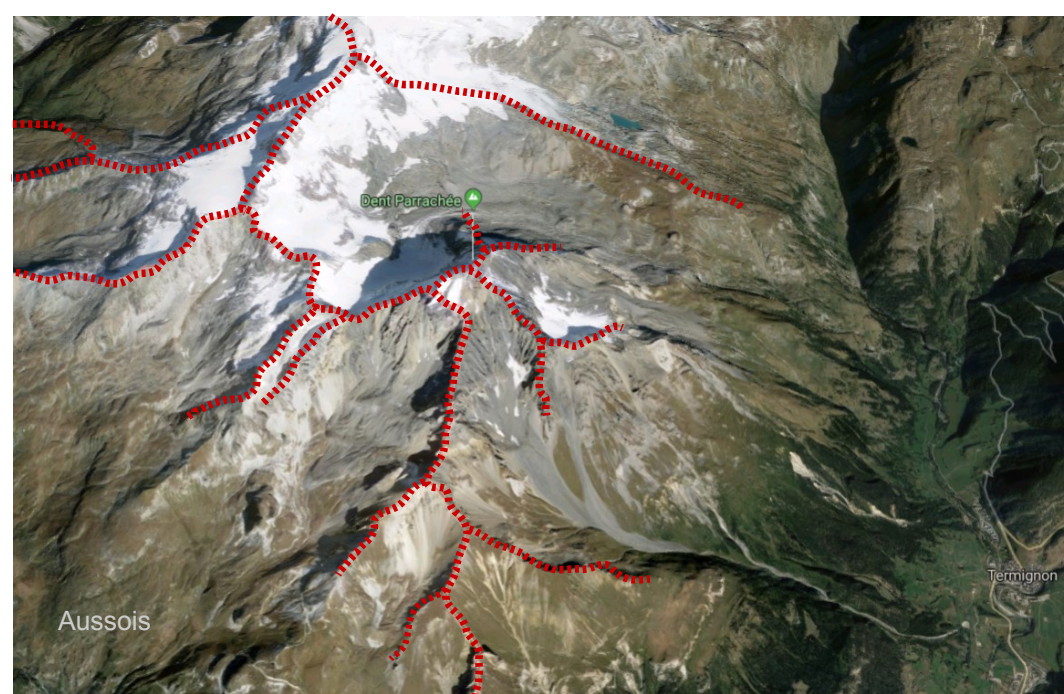


# I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

## 1. État de l'art des algorithmes de localisation

Détection de crête

→ Pour détecter simultanément **PLUSIEURS** directions



# I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

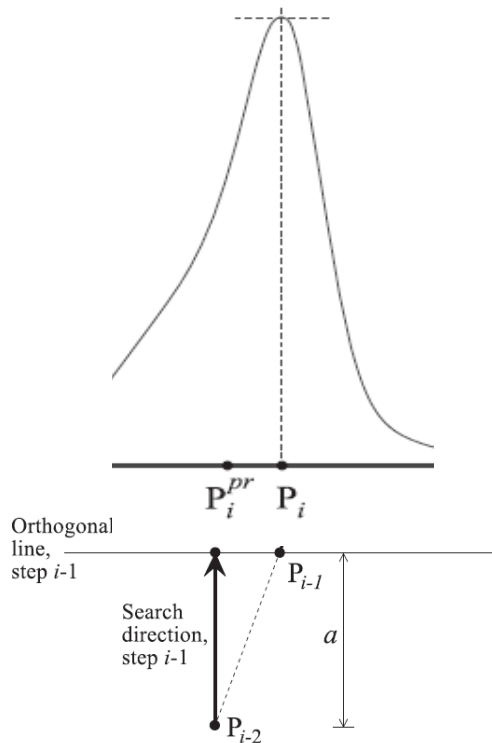
## 1. État de l'art des algorithmes de localisation

Détection de crête

Maximum de la projection

[Bottoni et al 2015]

→ Exemples 2D seulement



# I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

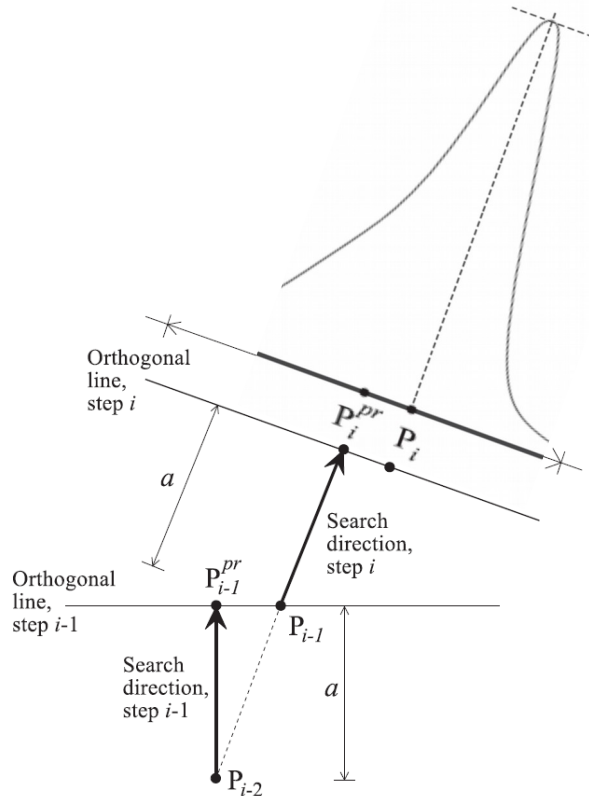
## 1. État de l'art des algorithmes de localisation

Détection de crête

Maximum de la projection

[Bottoni et al 2015]

→ Exemples 2D seulement

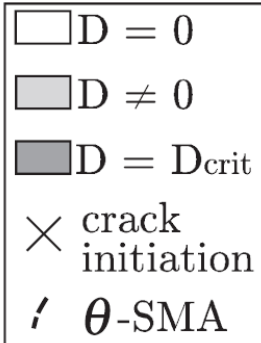
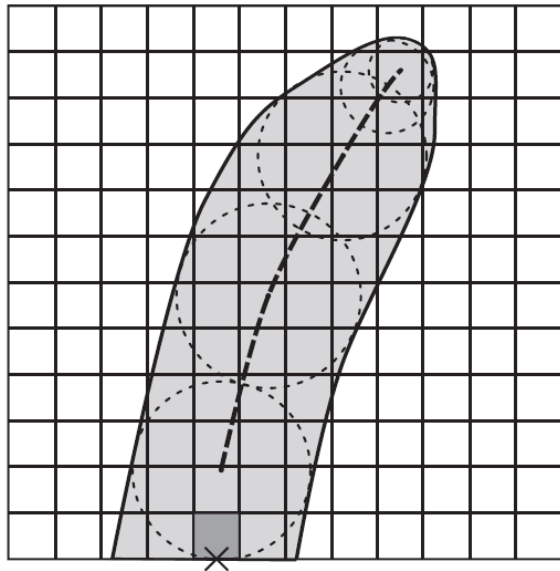




# I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

## 1. État de l'art des algorithmes de localisation

### Détection de crête



### Maximum de la projection

[Bottoni et al 2015]

→ Exemples 2D seulement

### Axe médian

[Tamayo-Mas and Rodriguez-Ferran 2015]

AM : lieu des centres des boules intérieures bi-tangentes

→ 2D et 3D

→ ne peut partir que d'une frontière

# I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

## 1. État de l'art des algorithmes de localisation

Détection de crête

Maximum de la projection

[Bottoni et al 2015]

→ Exemples 2D seulement

Axe médian

[Tamayo-Mas and Rodriguez-Ferran 2015]

AM : lieu des centres des boules intérieures bi-tangentes

→ 2D et 3D

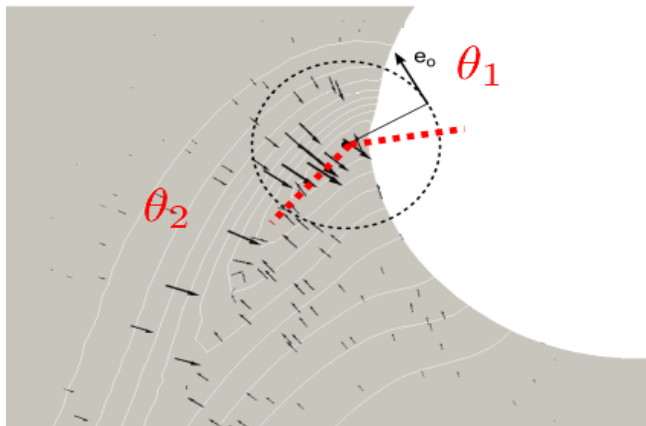
→ ne peut partir que d'une frontière

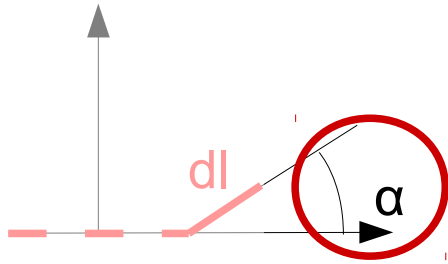
« Marching ridges »

[Feld-Payet et al 2015]

→ 2D et 3D,

→ peut partir de n'importe où, même à l'intérieur de la structure





## Introduction

### I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

Où ?

1. État de l'art des algorithmes de localisation
- 2. L'algorithme « marching ridges »**
3. Quelques applications numériques

Comment ?

### II. Insertion par adaptation de maillage

Quand ?

Jusqu'à où ?

→  $dl \geq 0$  ?

1. Aperçu des méthodologies possibles
2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision
3. Quelques applications numériques

## Bilan et discussion

# I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

## 2. L'algorithme « marching ridges »

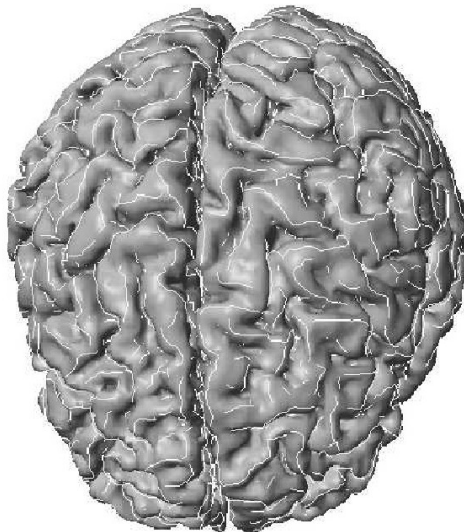
**Définition d'une crête (height ridge)** [Eberly et al. 94, Furst and Pizer 98]

→ lieu des points correspondant à un maximum relatif de la fonction  $f$  étudiée dans la direction transverse  $\underline{v}$  à la crête supposée en un point  $\underline{x}$ .

**Vision par ordinateur :**

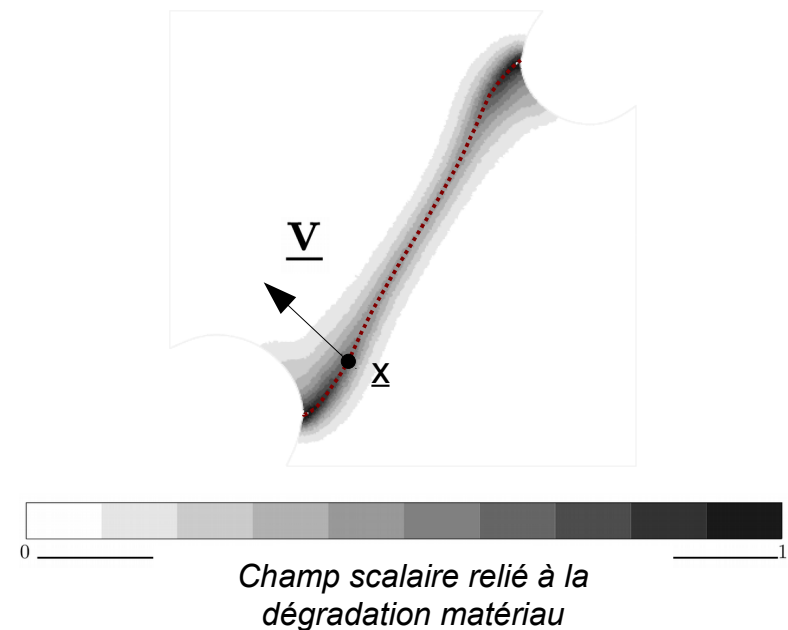
[Thirion and Gourdon 93]

[Furst and Pizer 01]



**Mécanique du solide :**

[Feld-Payet et al 2015]



# I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

## 2. L'algorithme « marching ridges »

**Définition d'une crête (height ridge)** [Eberly et al. 94, Furst and Pizer 98]

→ lieu des points correspondant à un maximum relatif de la fonction  $f$  étudiée dans la direction transverse  $\underline{v}$  à la crête supposée en un point  $\underline{x}$ .

**Vision par ordinateur :**

[Thirion and Gourdon 93]

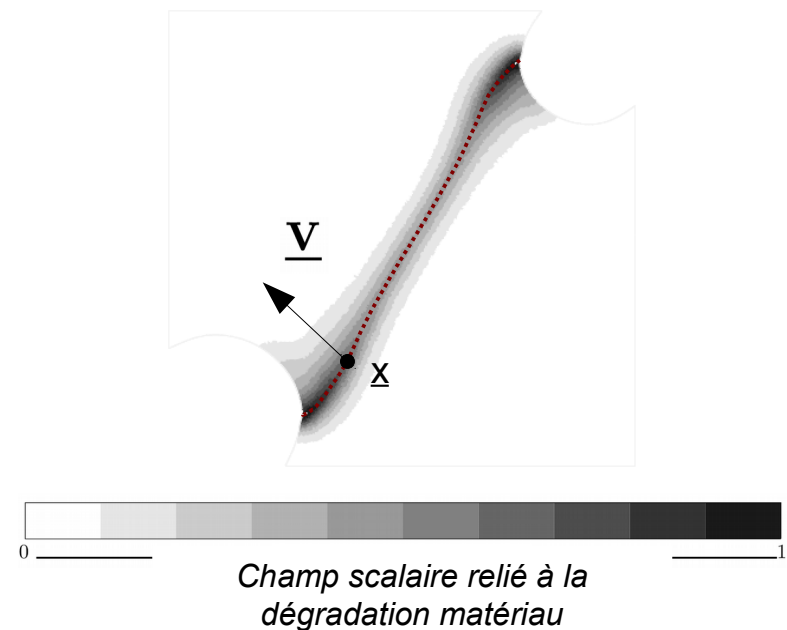
[Furst and Pizer 01]

$$\begin{cases} \underline{v} \cdot \underline{\nabla}(f)(\underline{x}) = 0 \\ \underline{v}^t \underline{\mathcal{H}}(f)(\underline{x}) \underline{v} < 0 \end{cases}$$

Avec :  $\underline{\mathcal{H}}$  matrice Hessienne

**Mécanique du solide :**

[Feld-Payet et al 2015]



# I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

## 2. L'algorithme « marching ridges »

### Mécanique du solide [Feld-Payet et al 2015]

1. Initialisation :

Départ d'un point **quelconque**  $\underline{x}_0$  sur la crête

2. Choix de directions test  $\underline{v}$

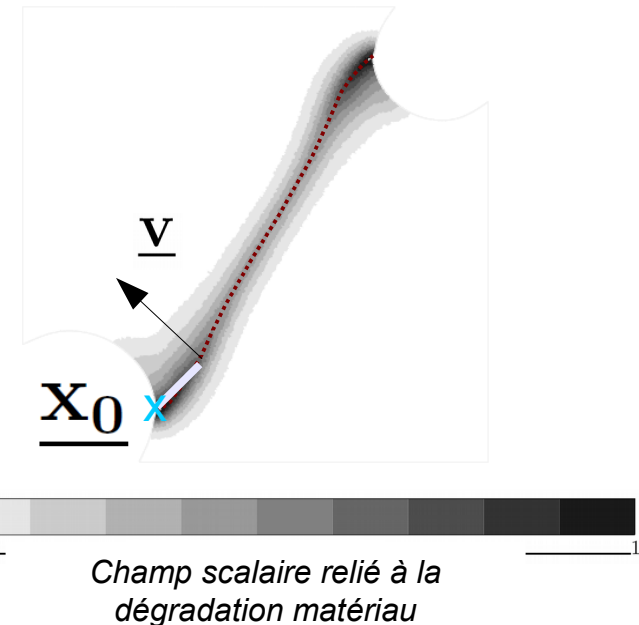
→ **spécifique**

3. Calcul des dérivées

→ **spécifique**

4. Propagation

→ depuis le nouveau point, reprendre à l'étape 2



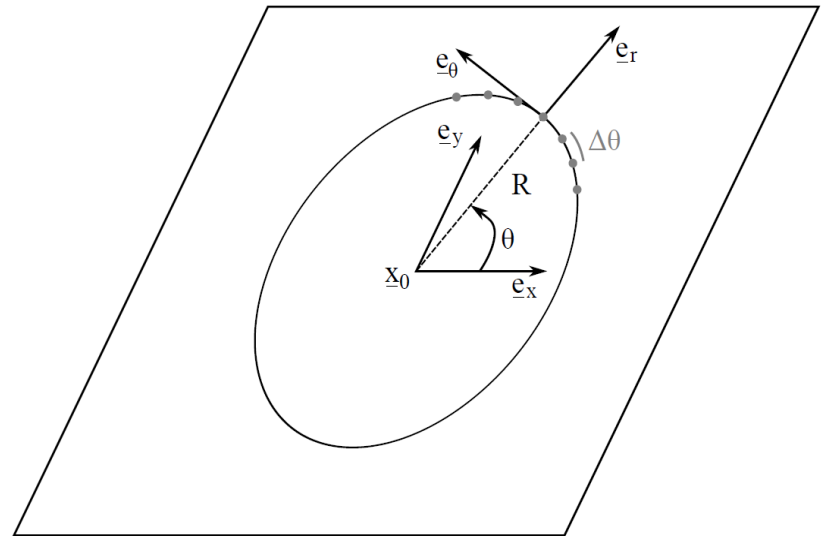
## 2. L'algorithme « marching ridges »

### Mécanique du solide [Feld-Payet et al 2015]

#### 1. Initialisation

#### 2. Choix de directions test $\underline{v}$

$$\underline{v} = \underline{e}_\theta$$



Indépendamment du maillage sous-jacent

# I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

## 2. L'algorithme « marching ridges »

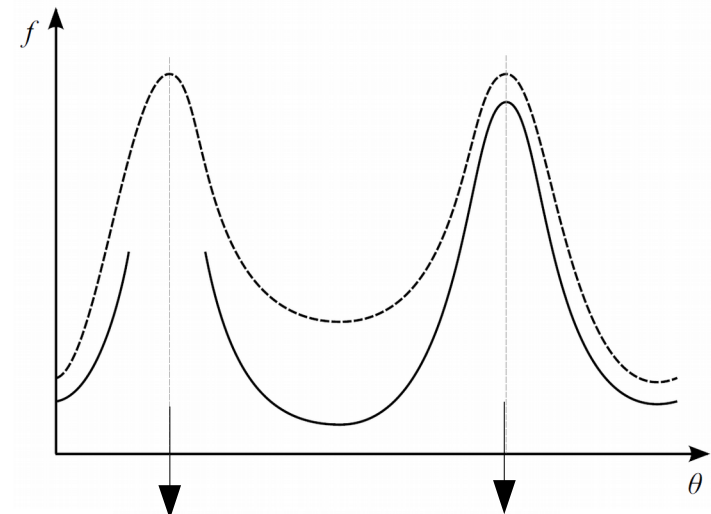
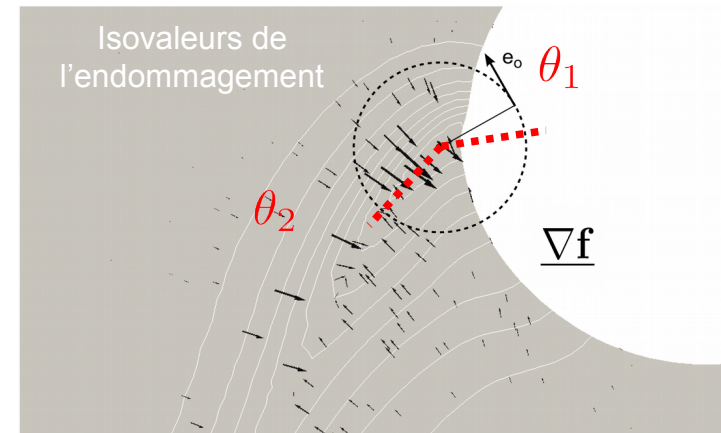
### Mécanique du solide [Feld-Payet et al 2015]

1. Initialisation

2. Choix de directions test

3. Calcul des dérivées

→ **sélection d'une ou plusieurs direction**

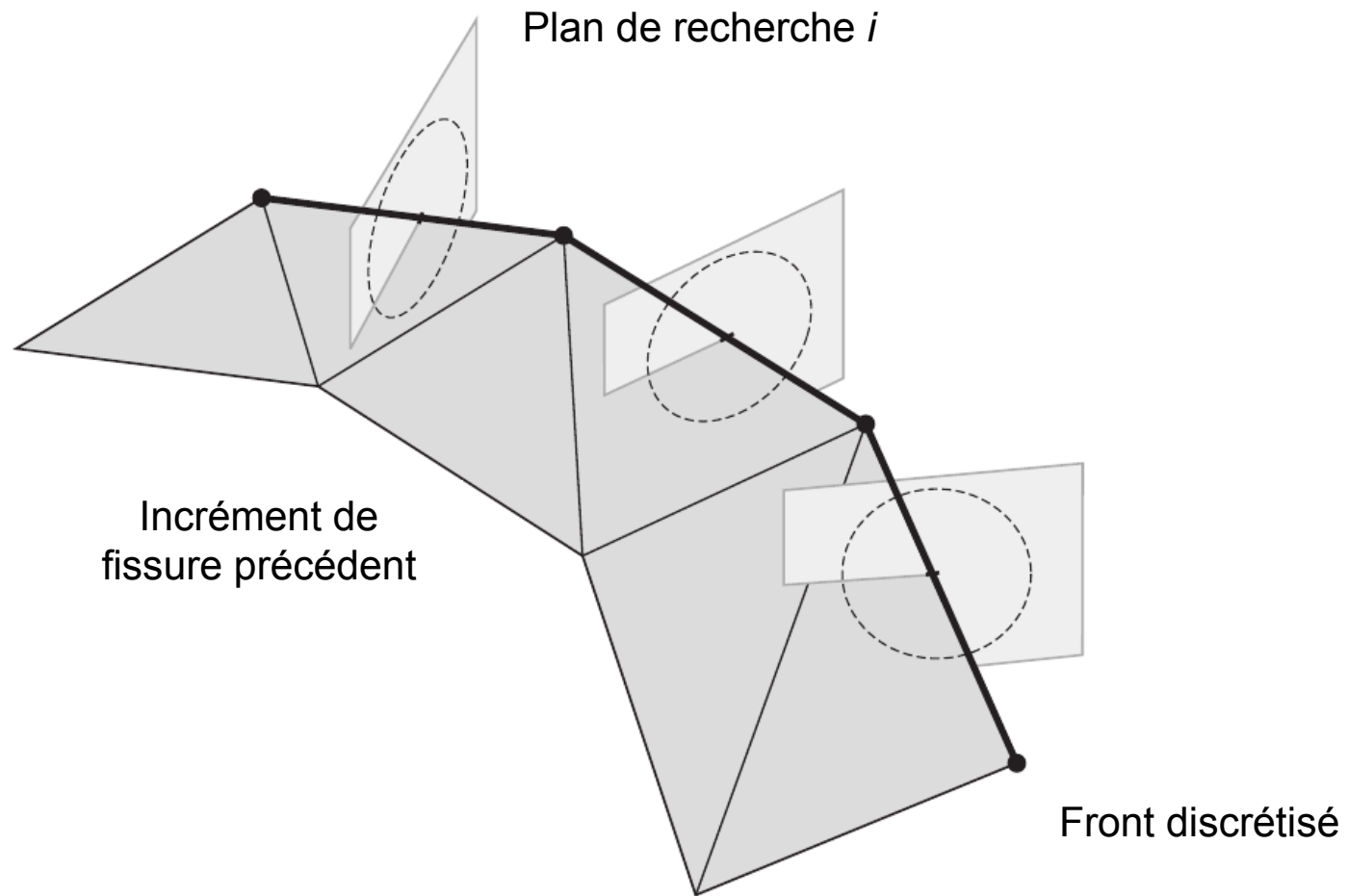


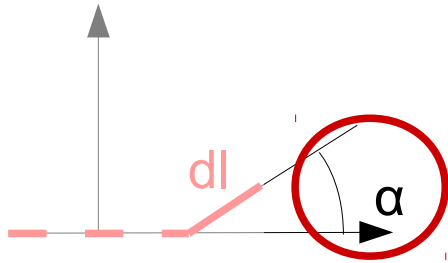
$$\text{Changement de signe de + à - de : } \frac{\partial f}{\partial \theta} = R \underline{e}_\theta \cdot \underline{\nabla f}$$



## 2. L'algorithme « marching ridges »

### Extension en 3D





## Introduction

### I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

Où ?

1. État de l'art des algorithmes de localisation
2. L'algorithme « marching ridges »
3. **Quelques applications numériques**

Comment ?

### II. Insertion par adaptation de maillage

Quand ?

Jusqu'à où ?

→  $dl \geq 0$  ?

1. Aperçu des méthodologies possibles
2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision
3. Quelques applications numériques

## Bilan et discussion

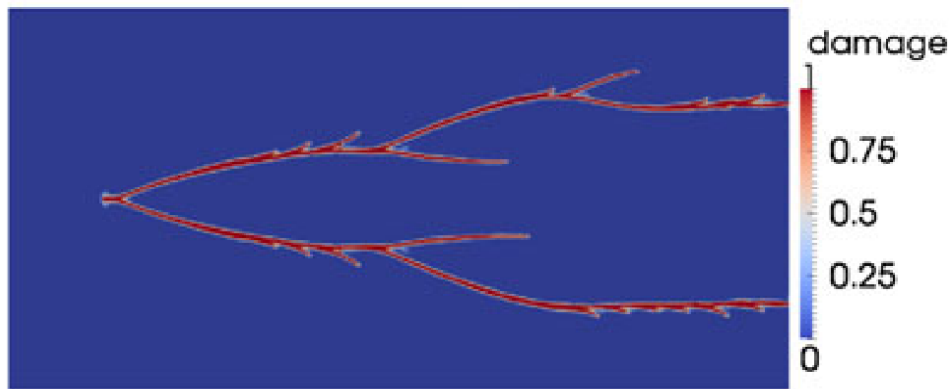
# I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

## 3. Quelques applications numériques

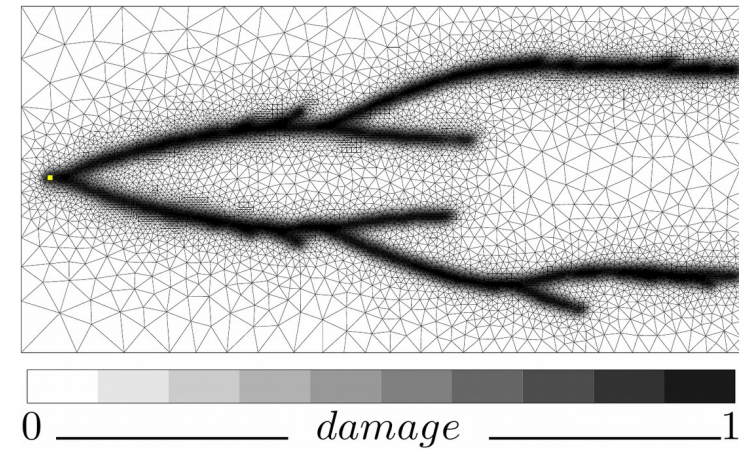
### Utilisation en post-traitement

A partir d'une image de calcul d'endommagement régularisé en dynamique

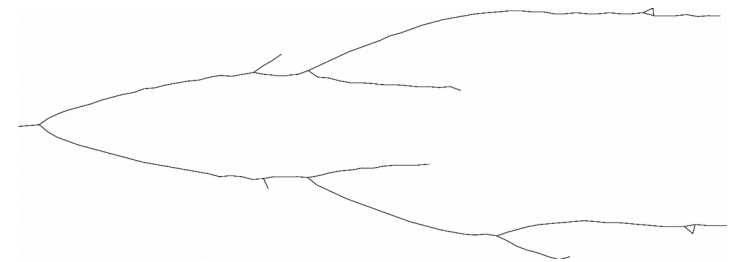
[Wolf et al 15]



[Feld-Payet et al 15]



→ Utilisation aisée avec n'importe quel code de calcul EF (ex: Aster, Abaqus,...)

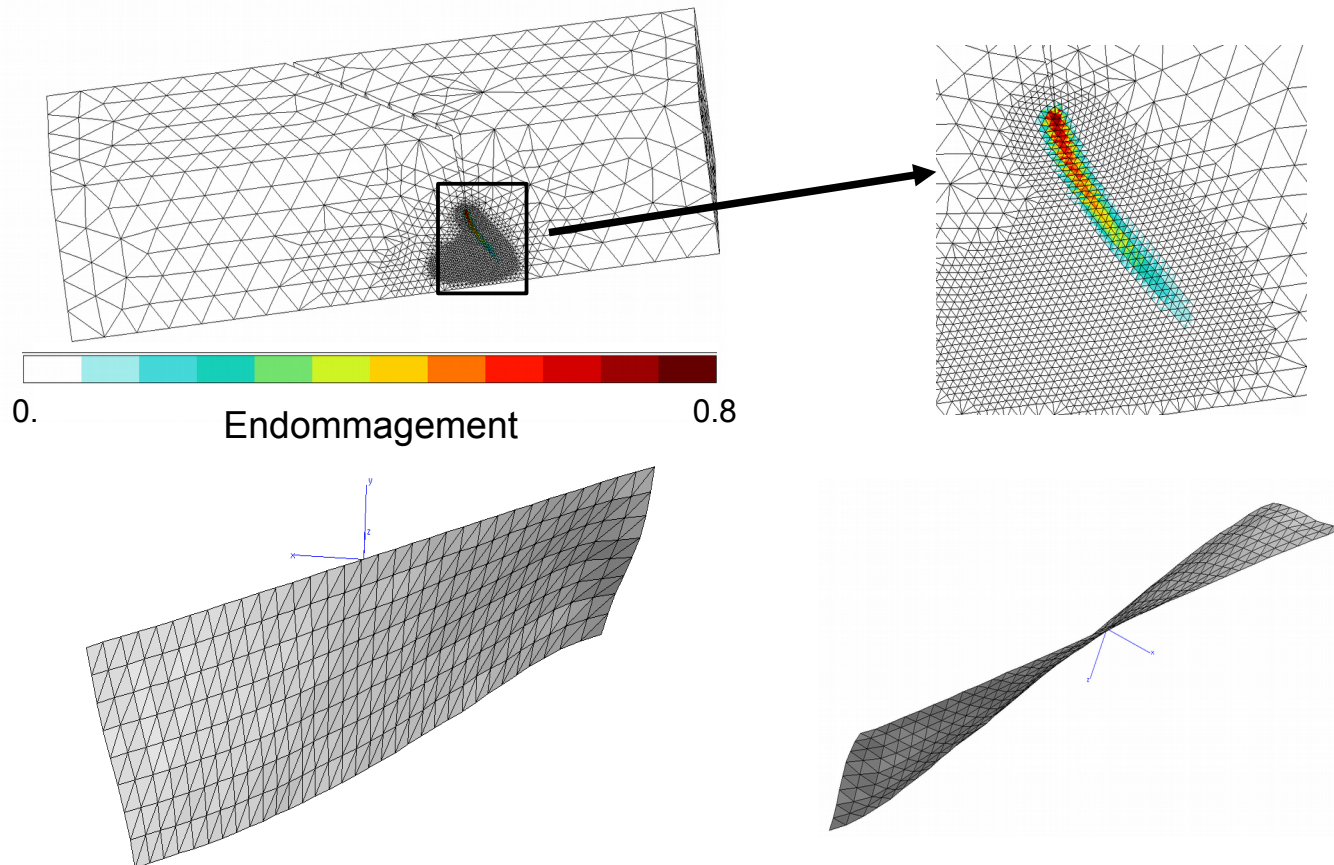


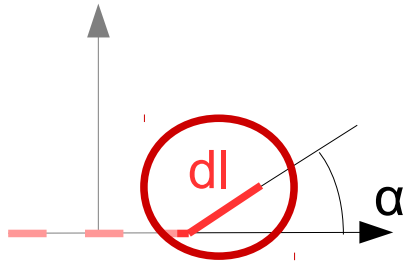
## 3. Quelques applications numériques

### Utilisation en post-traitement

A partir d'un résultat de calcul de EDF R&D (E. Lorentz) pour un calcul de flux

→ torsion de l'éprouvette dite "Brokenshire"





## Introduction

### I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

Où ?

1. État de l'art des algorithmes de localisation
2. L'algorithme « marching ridges »
3. Quelques applications numériques

Comment ?

### II. Insertion par adaptation de maillage

Quand ?

Jusqu'à où ?

→  $dl \geq 0$  ?

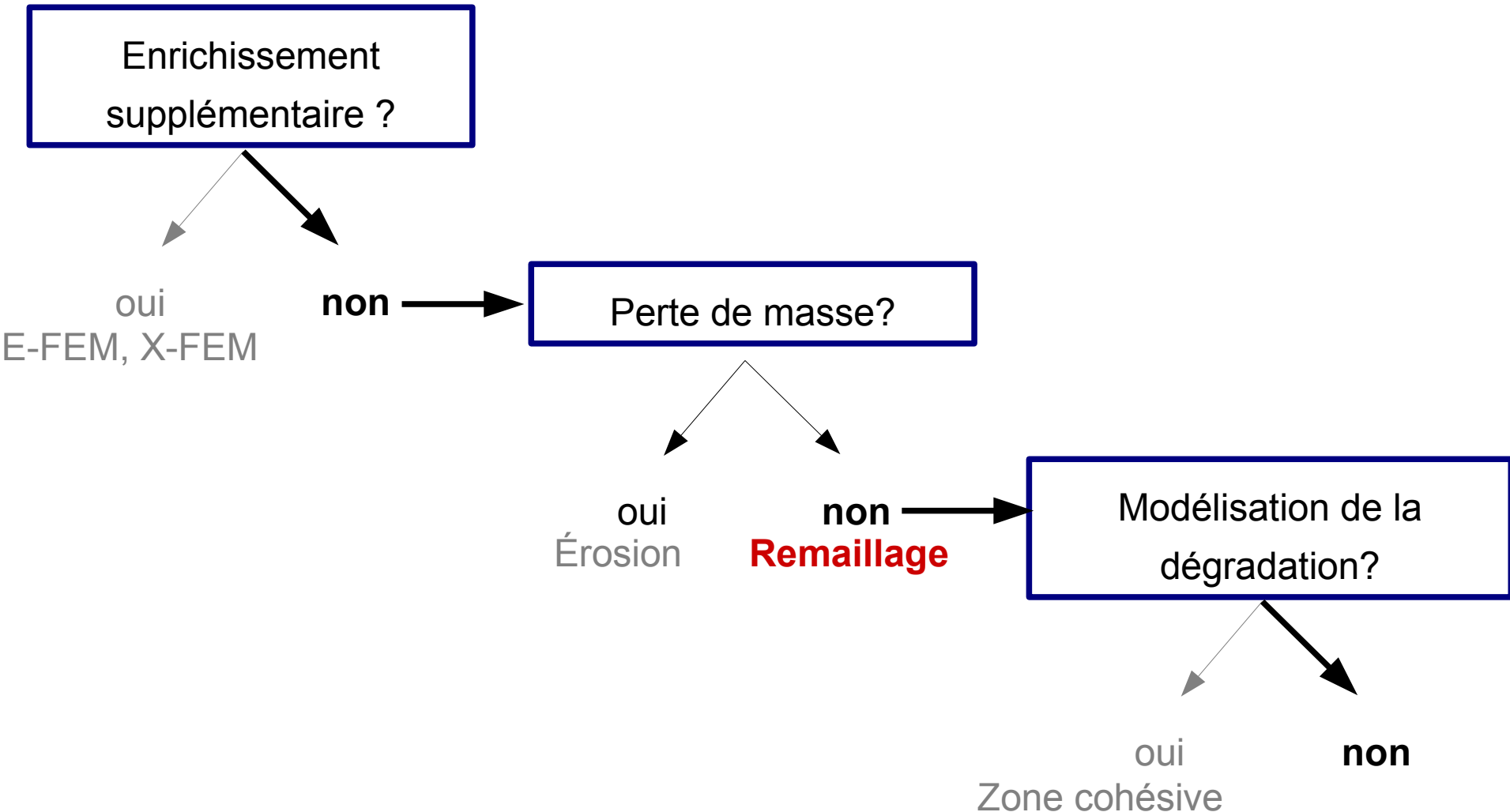
1. **Aperçu des méthodologies possibles**
2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision
3. Quelques applications numériques

## Bilan et discussion

## II- Insertion par adaptation de maillage

### 1. Aperçu des méthodologies possibles

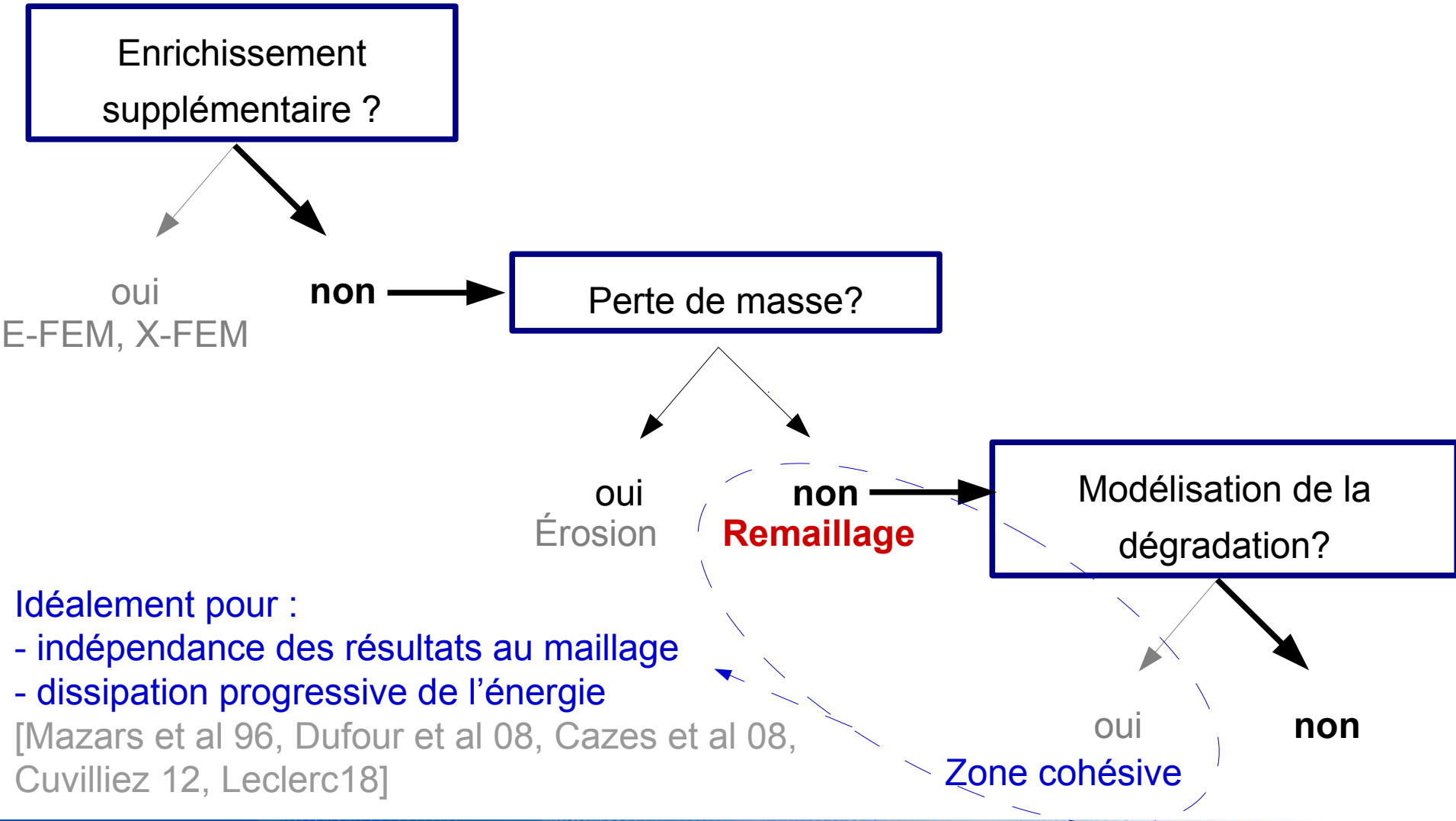
Comment ? → Modélisation d'une discontinuité pour la MEF



## II- Insertion par adaptation de maillage

### 1. Aperçu des méthodologies possibles

Comment ? → Modélisation d'une discontinuité pour la MEF



Idéalement pour :

- indépendance des résultats au maillage
- dissipation progressive de l'énergie

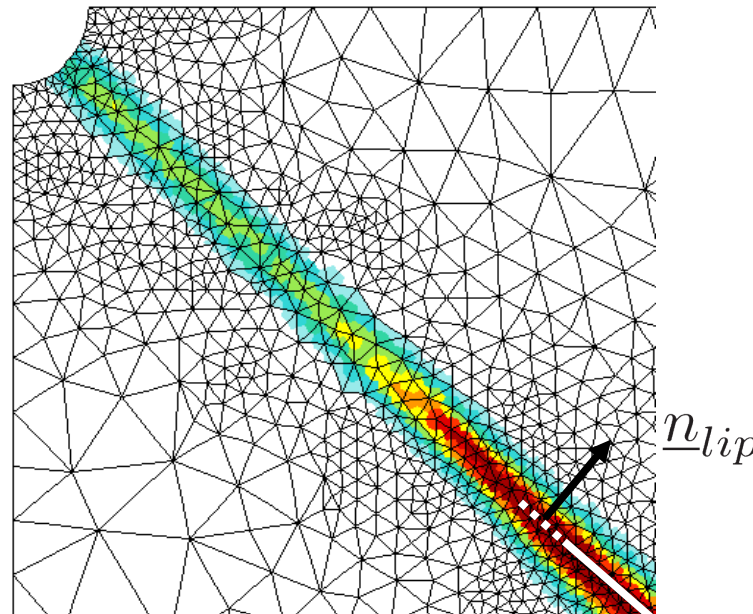
[Mazars et al 96, Dufour et al 08, Cazes et al 08, Cuvilliez 12, Leclerc18]

## II- Insertion par adaptation de maillage

### 1. Aperçu des méthodologies possibles

Quand ? → Critère d'insertion

- 1- Valeur critique de la variable représentant la dégradation ou de plasticité cumulée
- 2- Valeur critique de la norme de l'effort transmis à travers l'incrément :



$$\|\underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{n}_{lip}\| \leq \sigma_{max}$$



## II- Insertion par adaptation de maillage

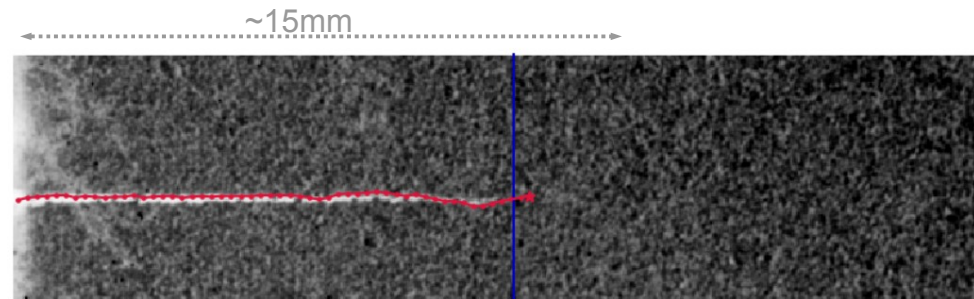
### 1. Aperçu des méthodologies possibles

#### Jusqu'à où ?

- Longueur d'incrément fixée  $dl$
- Jusqu'à ce que le critère d'insertion ne soit plus vérifié

#### Choix guidé par :

- Comparaison avec l'expérience



- Compromis à trouver pour limiter à la fois la fréquence d'insertion et la perturbation engendrée par :

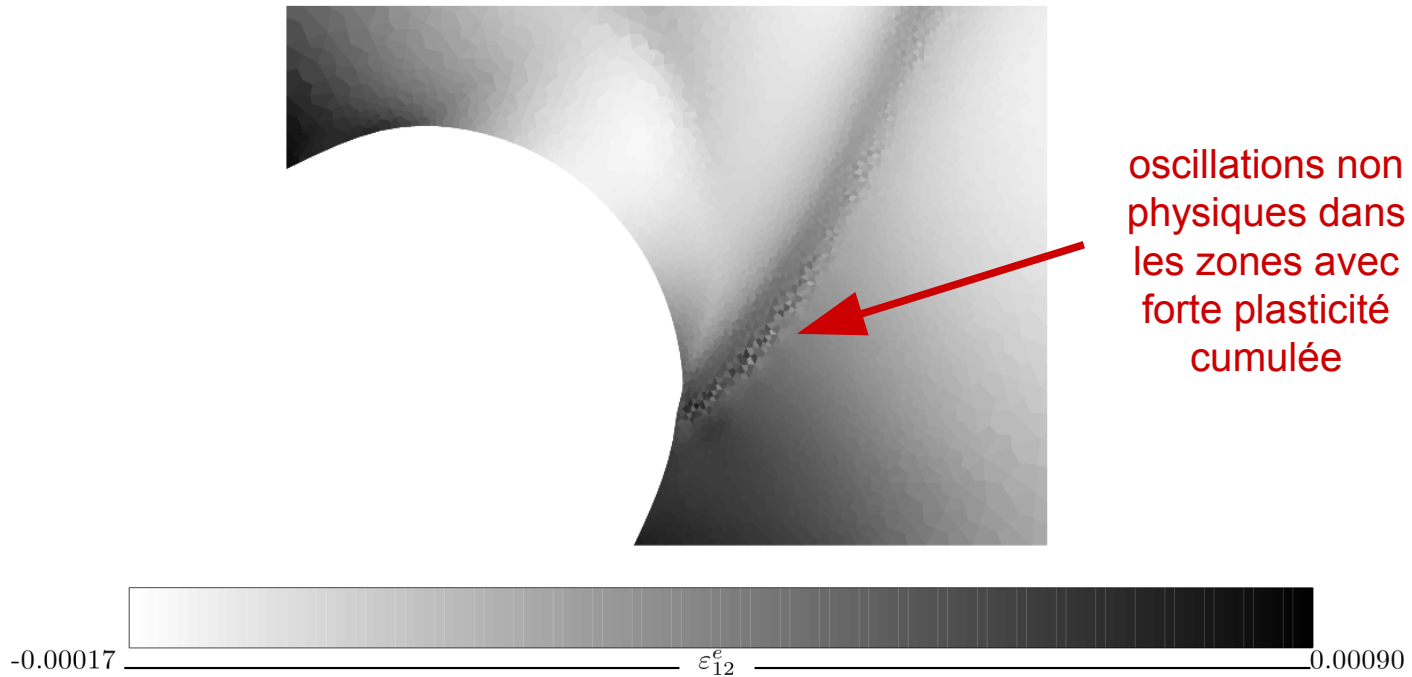
- 1- le changement de discrétisation [Shakoor et al, ACME, 2018]
- 2- le fait de ne plus transmettre le même effort pour les problèmes non linéaires

## II- Insertion par adaptation de maillage

### 1. Aperçu des méthodologies possibles

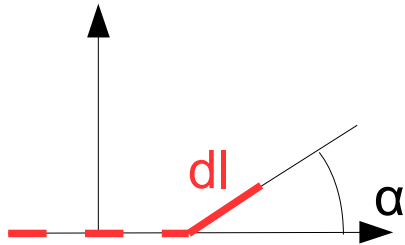
#### Situations plus délicates :

Verrouillage volumique en présence d'écoulement plastique incompressible, en particulier en grandes transformations



#### Situations plus favorables :

En présence de viscosité (même très faible)



## Introduction

### I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

Où ?

1. État de l'art des algorithmes de localisation
2. L'algorithme « marching ridges »
3. Quelques applications numériques

Comment ?

### II. Insertion par adaptation de maillage

Quand ?

Jusqu'à où ?

→  $dl \geq 0$  ?

1. Aperçu des méthodologies possibles
2. **Une stratégie optimisant le rapport coût/précision**
3. Quelques applications numériques

## Bilan et discussion

# II- Insertion par adaptation de maillage

## 2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision

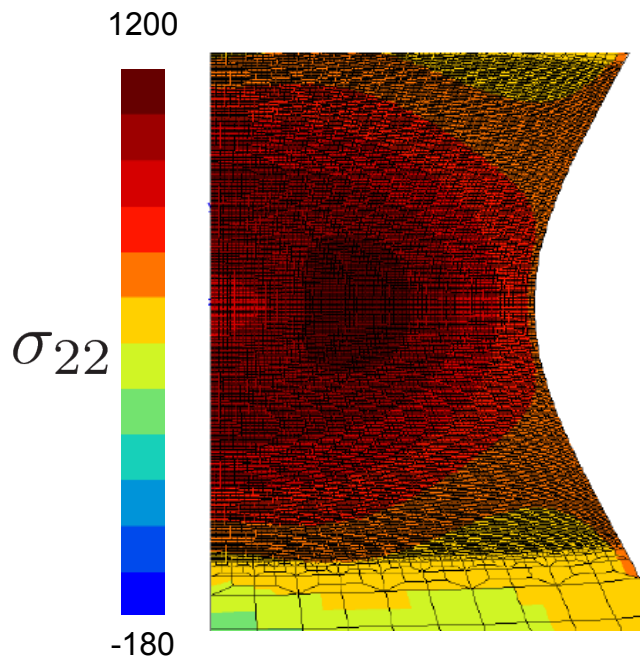
### Objectifs

Adapter le maillage pour :

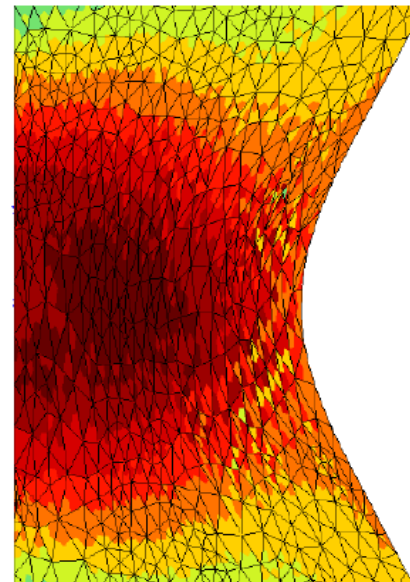
- conserver un bon facteur de forme (donc une bonne précision)

**en grandes déformations**

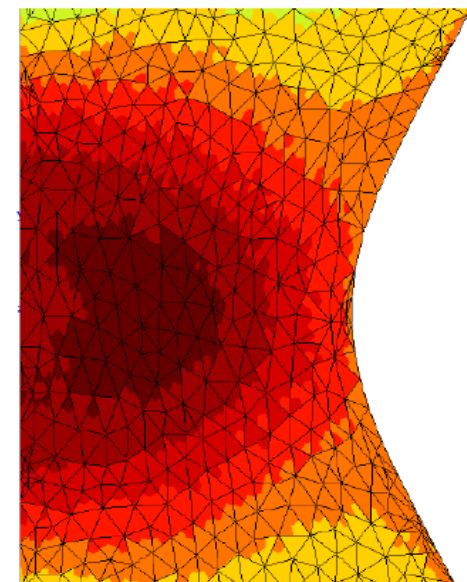
Après le même nombre de remaillages à fréquence imposée



Sans remaillage avec des quadrangles aplatis



Remaillage sur configuration initiale → NON



Remaillage sur configuration courante → OK

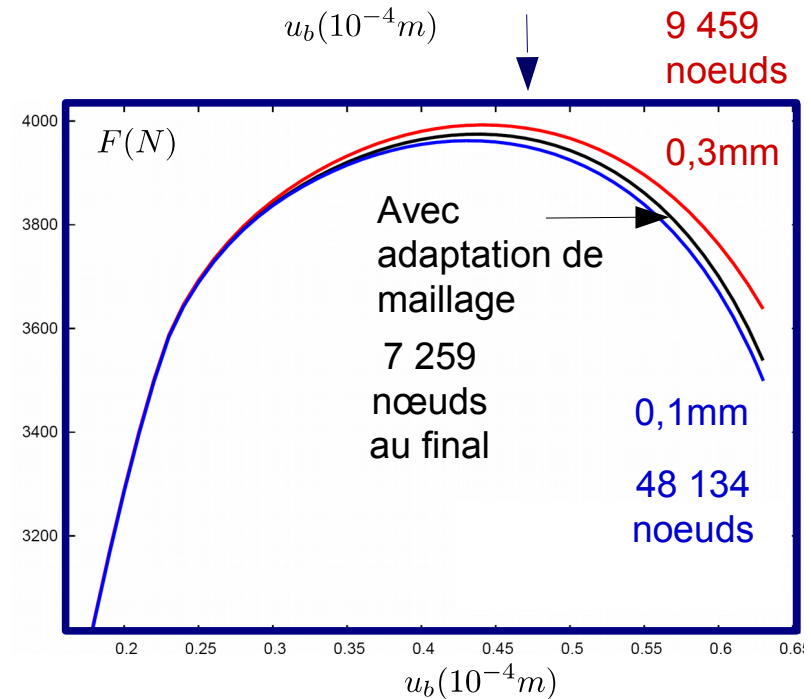
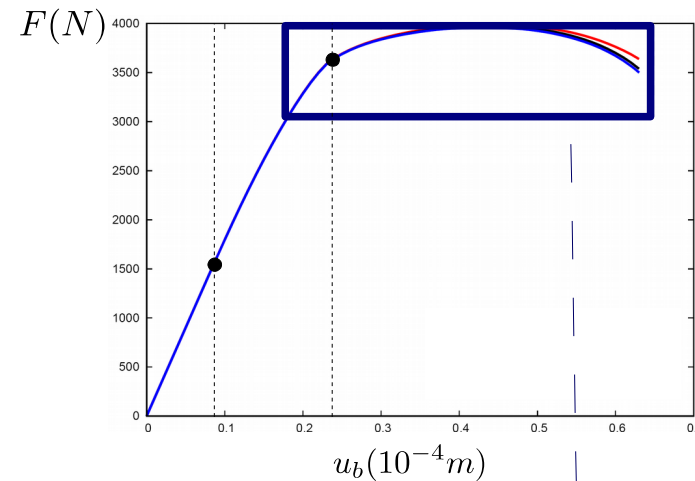
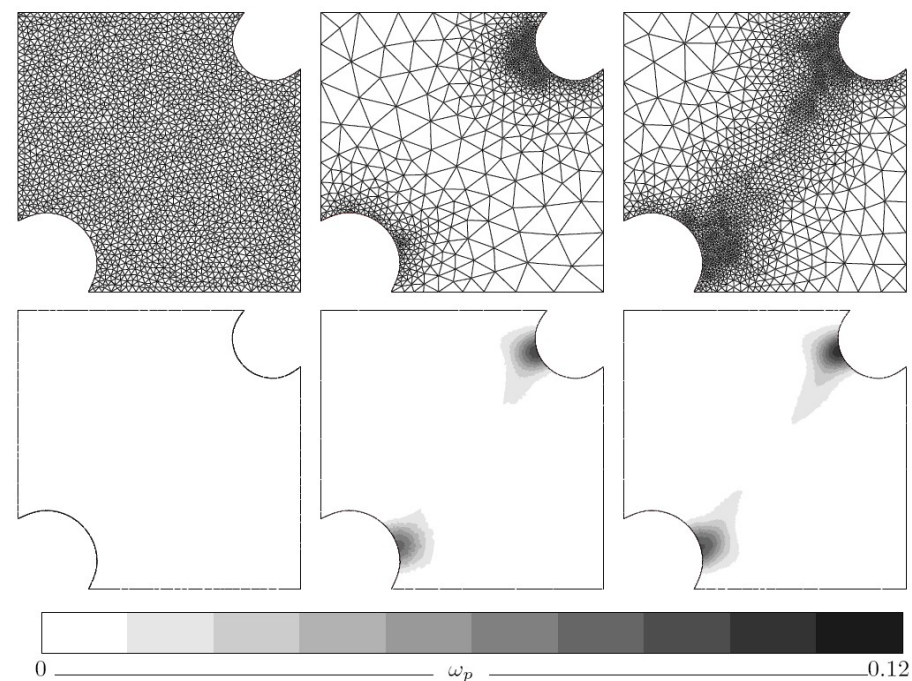
# II- Insertion par adaptation de maillage

## 2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision

### Objectifs

Adapter le maillage pour :

- conserver un bon facteur de forme **en grandes déformations**
- respecter précision demandée  $\epsilon_0$
- minimiser les coûts de calcul



## 2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision

### Principe : estimation d'erreur

Estimateur  
d'erreur locale

→ Aspect plus **quantitatif**  
mais **coûteux**

**Indicateurs  
d'erreur globale**

→ Comparaison entre  
2 discrétisations

# II- Insertion par adaptation de maillage

## 2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision

Principe : estimation d'erreur

Estimateur  
d'erreur locale

**Indicateurs  
d'erreur globale**

Approche  
indirecte

[Frey et George 99,  
Fortin 00]

$$\tilde{e} = \underline{u}_{ex} - \underline{\Pi}_h(\underline{u}_{ex})$$

majore (lemme de Céa)

Approche  
directe

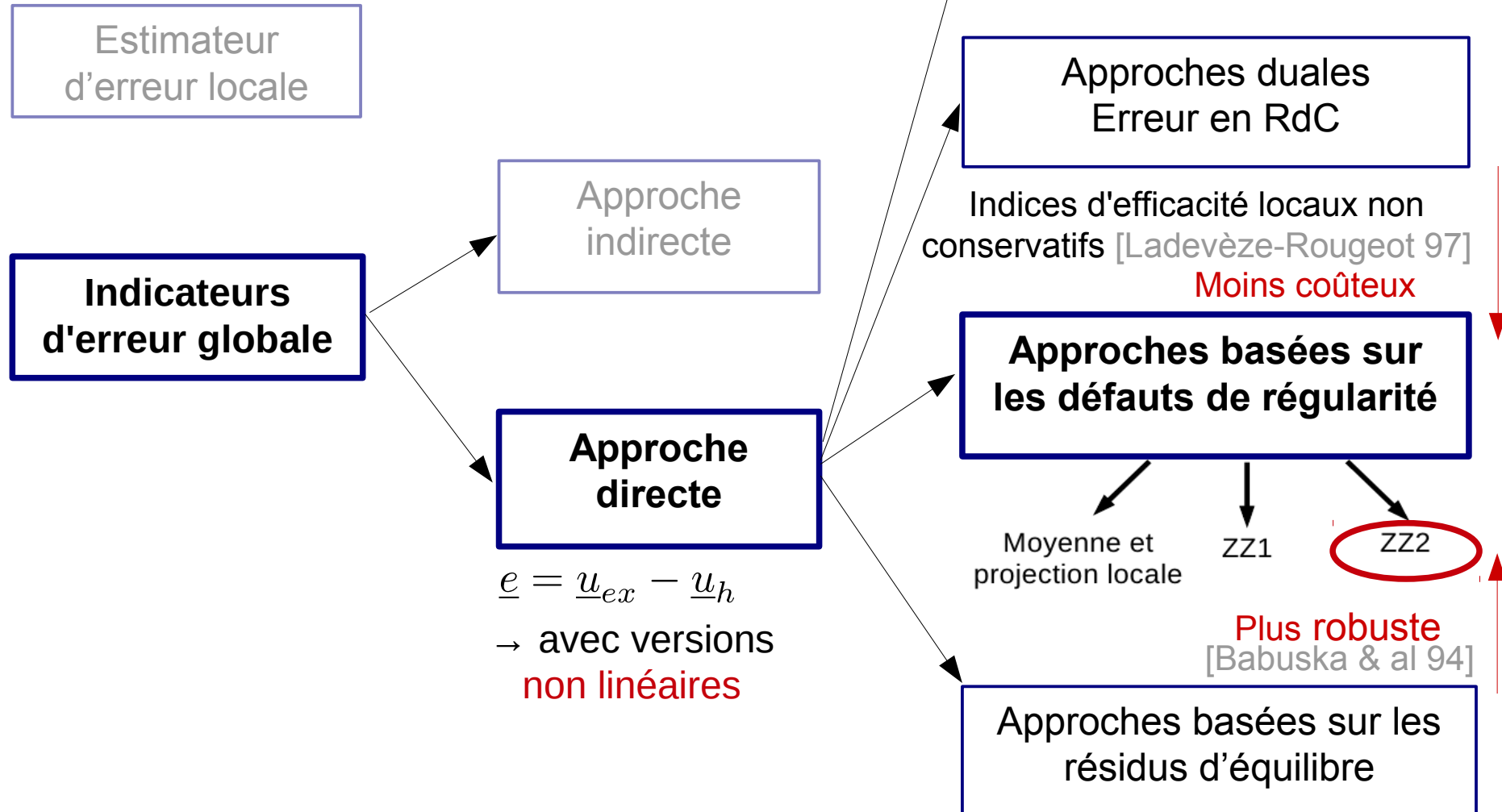
$$\underline{e} = \underline{u}_{ex} - \underline{u}_h$$

→ avec versions  
**non linéaires**

# II- Insertion par adaptation de maillage

## 2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision

Principe : estimation d'erreur



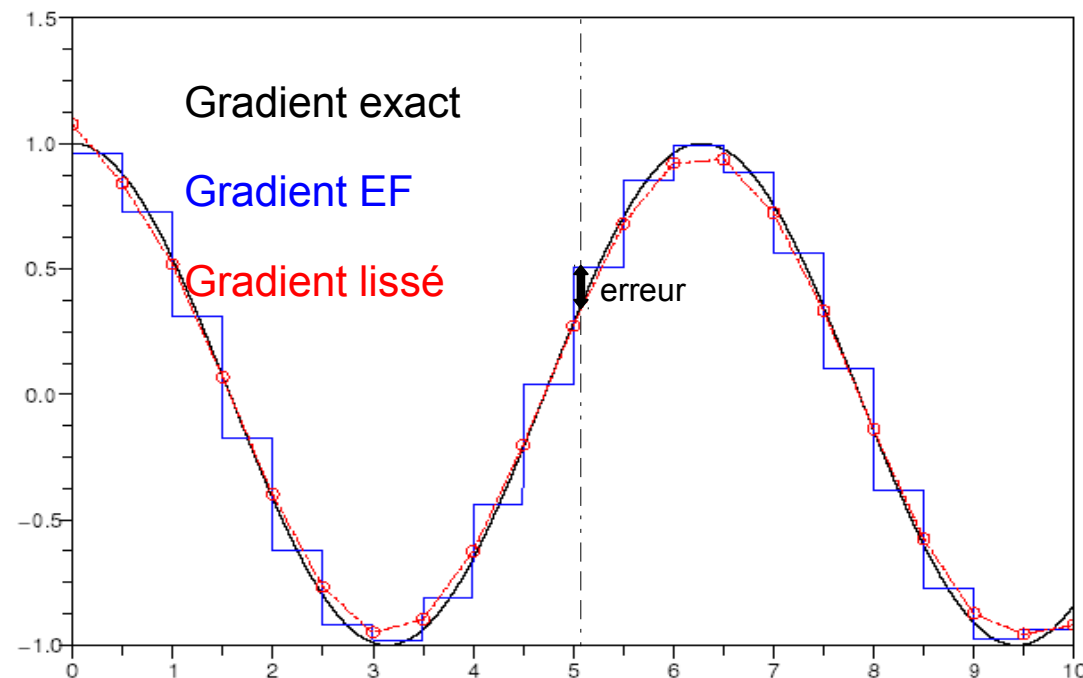


# II- Insertion par adaptation de maillage

## 2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision

### Principe : estimation d'erreur

Indicateur d'erreur globale : ZZ2 [Zienkiewicz et Zhu 92]



- Solution de recouvrement de moins bonne qualité près des frontières et sur les maillages très grossiers

- Relative simplicité d'implantation
- Très performant au niveau global
- Version non linéaire

[Boroomand et Zienkiewicz 99]

+ et scalaire [Peric et al 94,

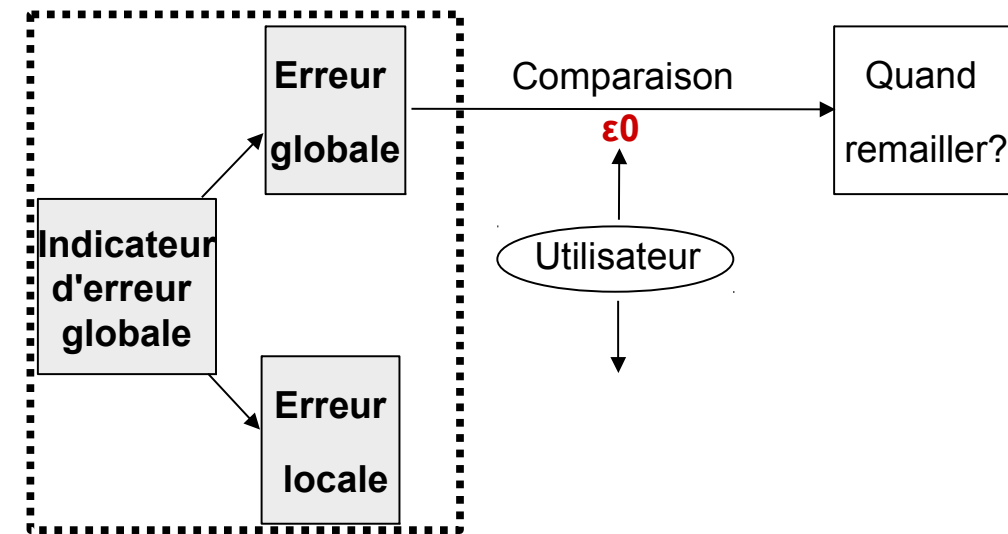
Pires et al 04, Feld-Payet 10]

$$\| \underline{e}^s \|_{\Omega}^2 = \frac{\int_{\Omega} (s^* - s_h) \times (\Delta s^* - \Delta s_h) d\Omega}{\int_{\Omega} s_h \times \Delta s_h d\Omega}$$

# II- Insertion par adaptation de maillage

## 2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision

### Principe

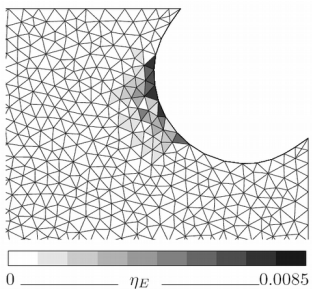


1. Estimation d'erreur

2. Définition du nouveau maillage

3. Création du nouveau maillage

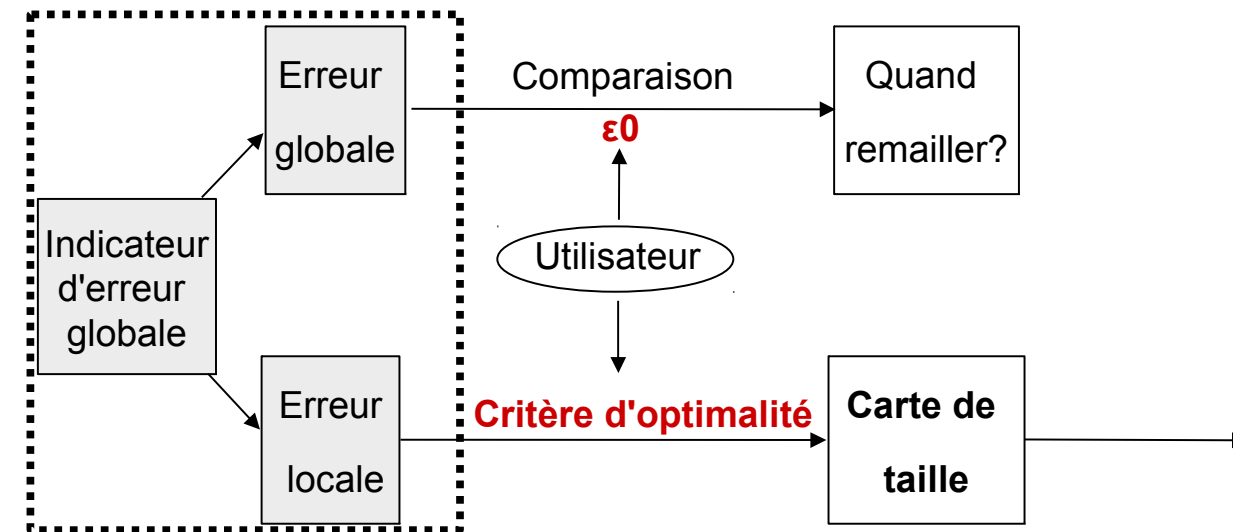
4. Reprise du calcul



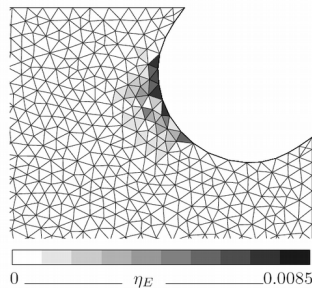
# II- Insertion par adaptation de maillage

## 2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision

### Principe



1. Estimation d'erreur



2. Définition du nouveau maillage

→ **critère d'optimalité**

[Ladevèze 77]

$h_E^* = \text{fonction}(h_E, \epsilon_0, \text{erreur locale, dimension, ordre du polynôme ou taux de convergence})$

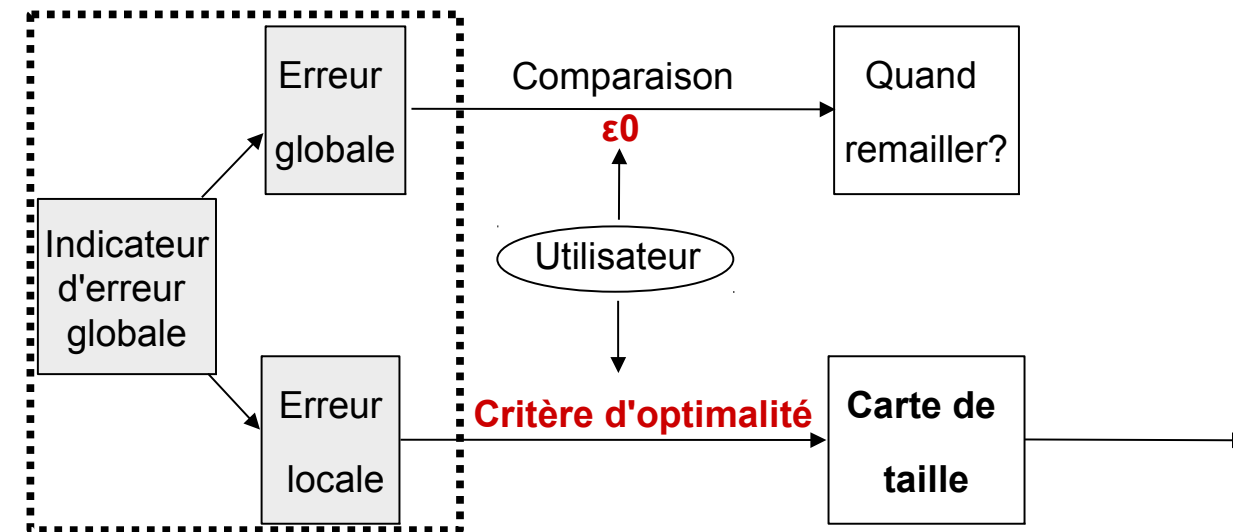
3. Création du nouveau maillage

4. Reprise du calcul

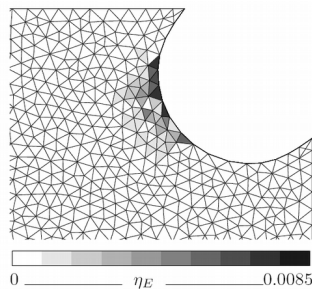
# II- Insertion par adaptation de maillage

## 2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision

### Principe



1. Estimation d'erreur



2. Définition du nouveau maillage

→ **critère d'optimalité**

[Ladevèze 77]

$h_E^* = \text{fonction}(h_E, \epsilon_0, \text{erreur locale, dimension, ordre du polynôme } \theta \text{ ou taux de convergence})$

3. Création du nouveau maillage

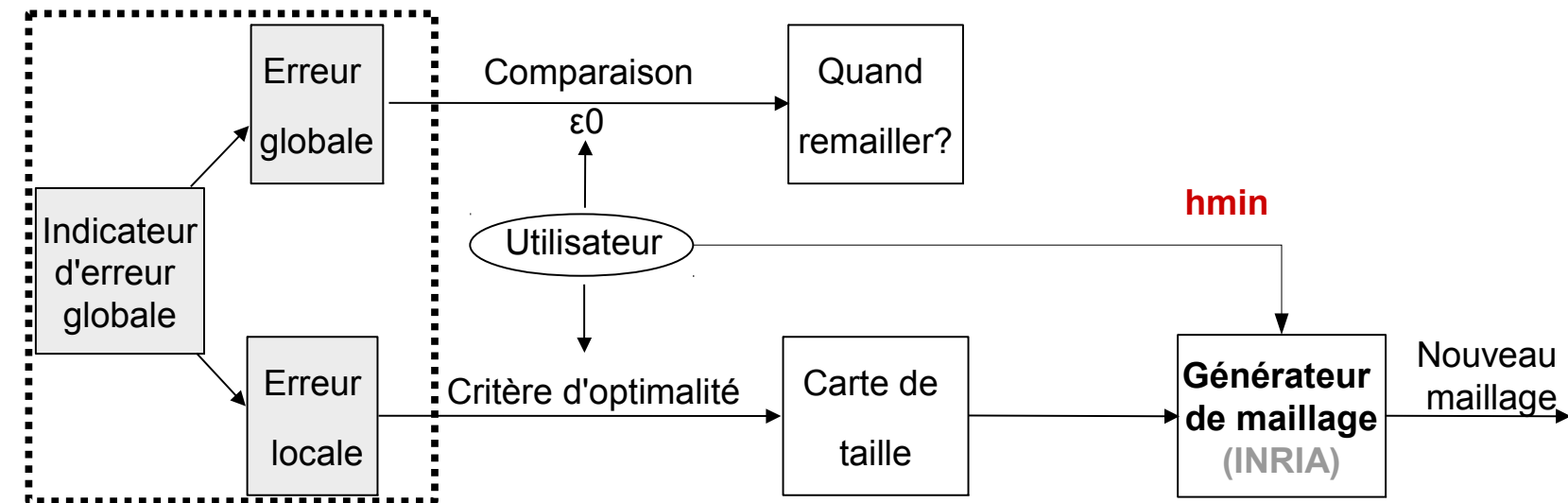
→ **Répartition uniforme de l'erreur globale** sur le nouveau maillage ; si problème régulier, = **Minimisation du nombre d'éléments** [Li et Bettes 95, Ladevèze et Pelle 01]

4. Reprise du calcul

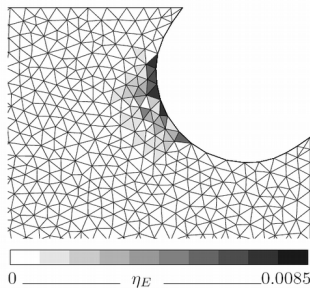
# II- Insertion par adaptation de maillage

## 2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision

### Principe



1. Estimation d'erreur



2. Définition du nouveau maillage  
→ critère d'optimalité

$h_E^* = \text{fonction}(h_E, \epsilon_0, \text{erreur locale}, \text{dimension}, \text{ordre du polynôme})$

3. Création du nouveau maillage

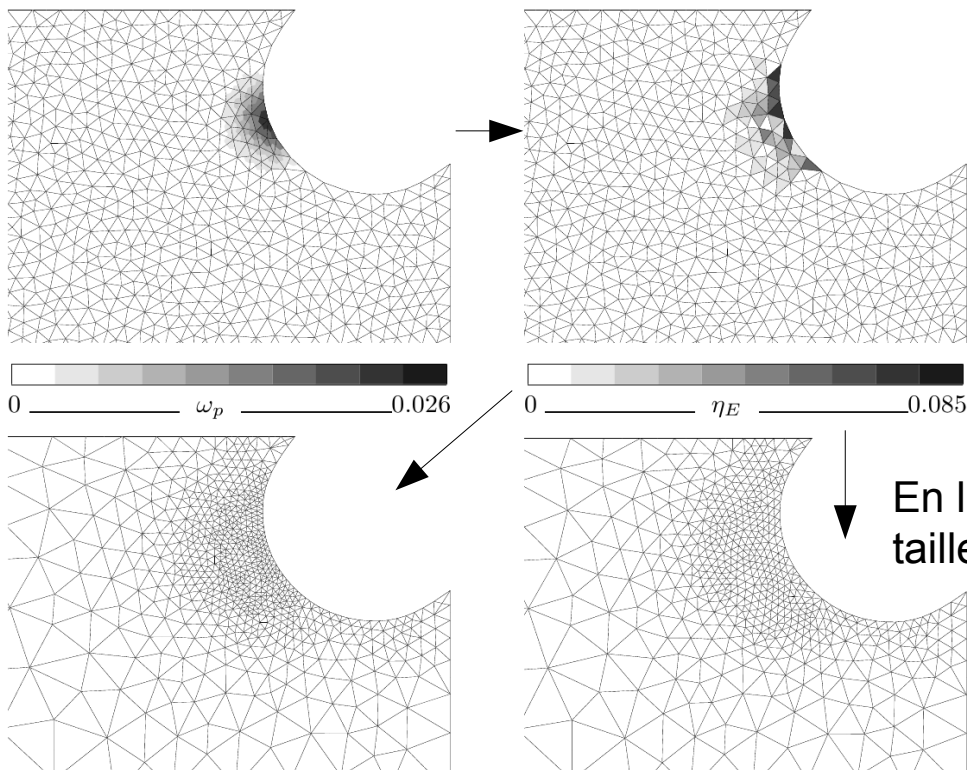
4. Reprise du calcul

# II- Insertion par adaptation de maillage

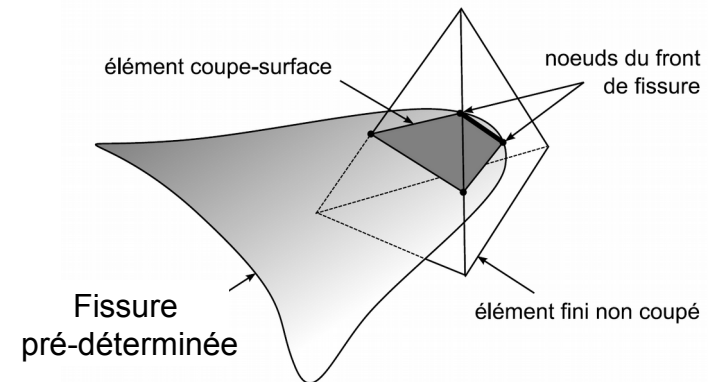
## 2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision

### Principe : création du nouveau maillage

Avant fissuration:



+ algorithme d'intersection de maillage si fissuration

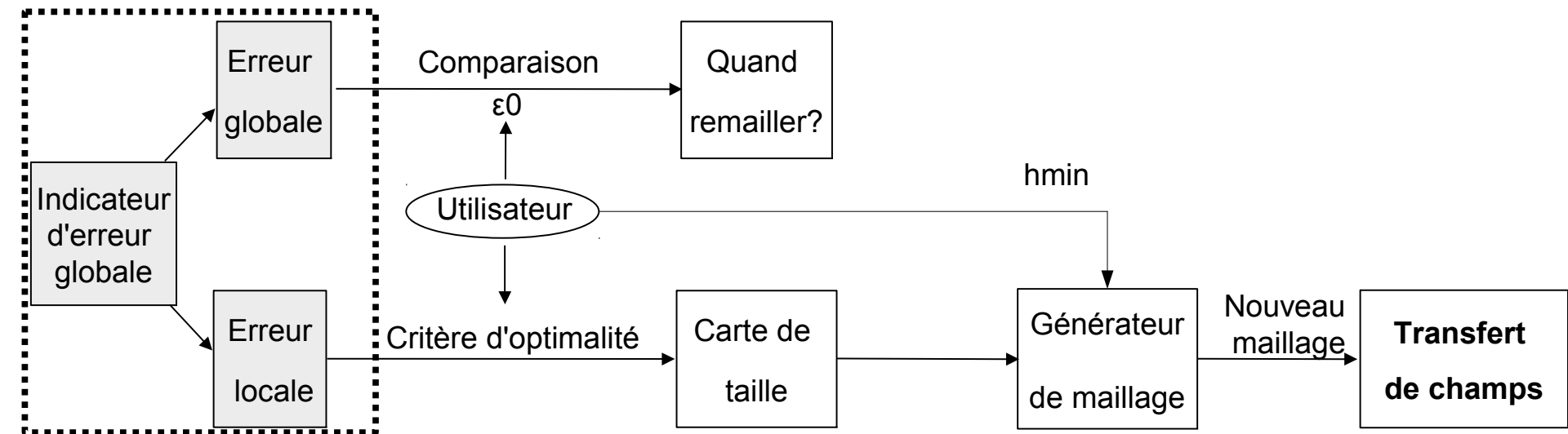


Zcracks : robuste et efficace pour fissuration 3D [Chiaruttini et al 10]  
Safran, Michelin, EDF, Renault, Daimler...

# II- Insertion par adaptation de maillage

## 2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision

### Principe



1. Estimation d'erreur

2. Définition du nouveau maillage

3. Création du nouveau maillage

4. Reprise du calcul

Transfert de champs :

- respect des relations entre les champs;
- satisfaction de l'équilibre;
- **minimisation de la diffusion numérique;**
- vérification des conditions aux limites.

**Impossible de satisfaire simultanément toutes ces contraintes!**

# II- Insertion par adaptation de maillage

## 2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision

Principe : transfert de champs

Aux nœuds :

1. **Interpolation directe**

→ simple

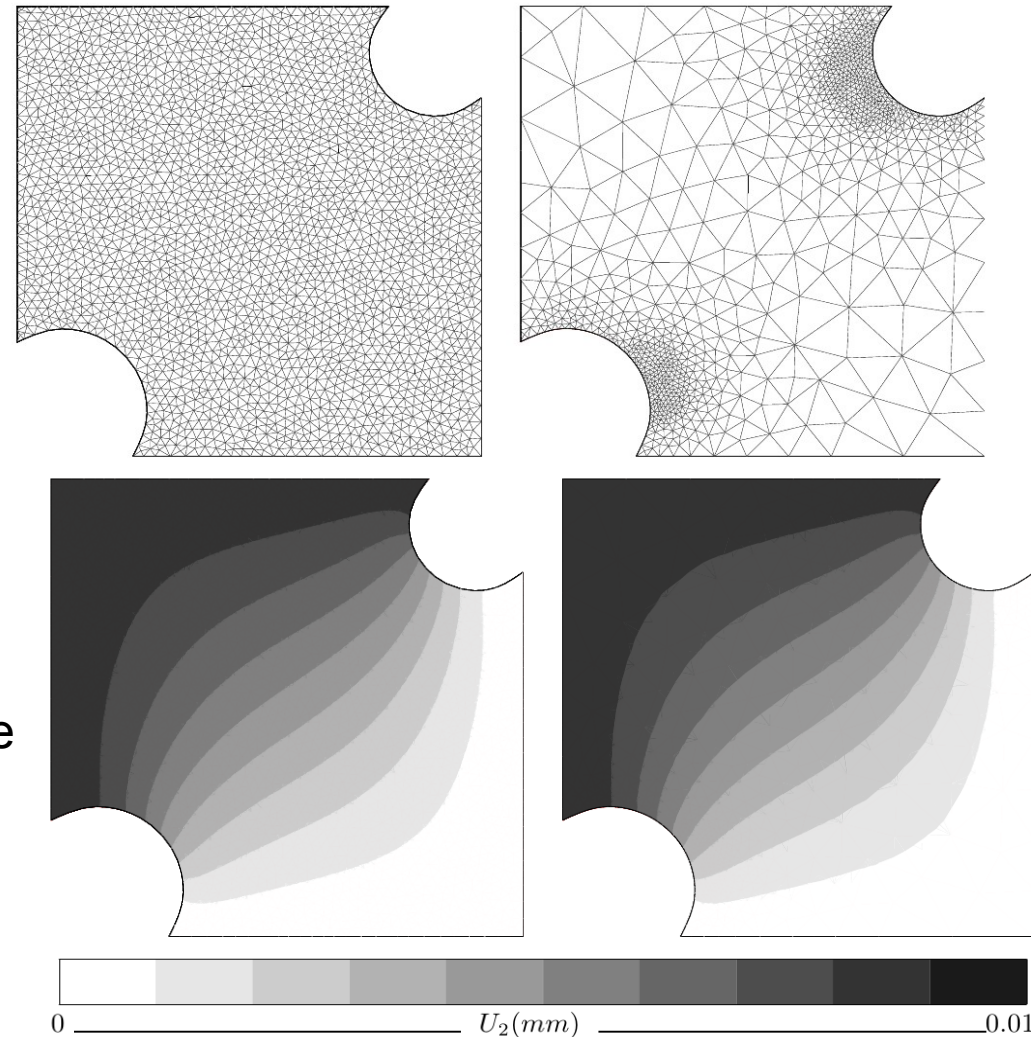
2. Transfert en norme L2

[Bernardi et al., 1990;  
Combesure et al., 2003]

→ coûteux

3. Transfert avec maillage auxiliaire

[Espinosa et al., 1998]





# II- Insertion par adaptation de maillage

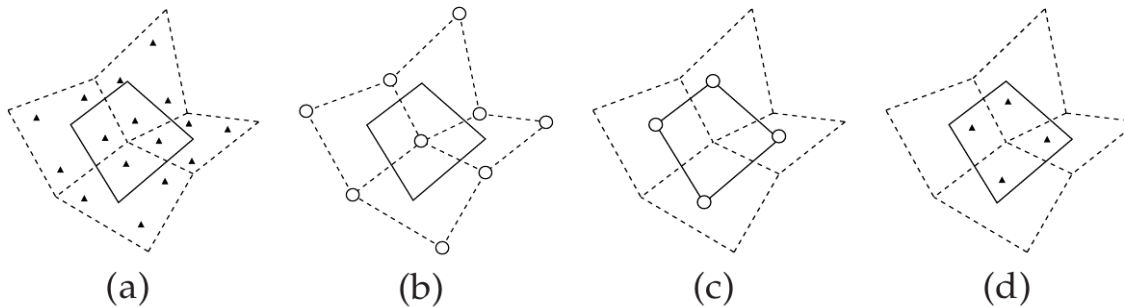
## 2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision

Principe : transfert de champs

Aux points d'intégration :

→ Éviter : passer par les noeuds de l'ancien et du nouveau maillage

[Lee et Bathe, 1994; Peric et al., 1996; Mediavilla, 2005]



[Mediavilla PhD thesis 05]

→diffusion numérique

→ Privilégier: directement de point d'intégration à point d'intégration

# II- Insertion par adaptation de maillage

## 2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision

Principe : transfert de champs

Aux points d'intégration :

- valeurs constantes

(ex: point le + proche)

→ simple et peu coûteux

→ si maillages "proches »

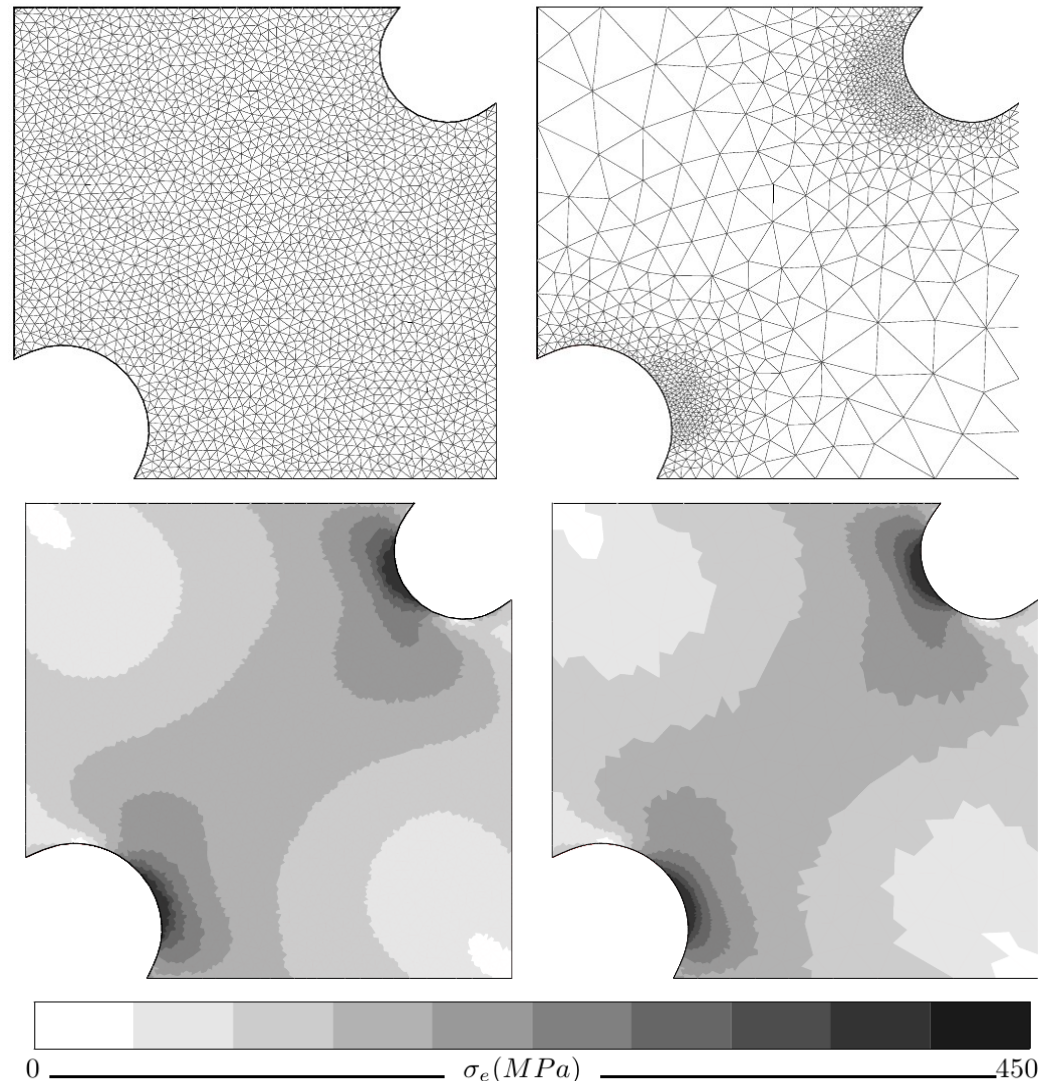
- lissage

(ex: par moindre carrés)

→ meilleure reproduction du profil d'endommagement

[Patzak et Jirasek, 2004]

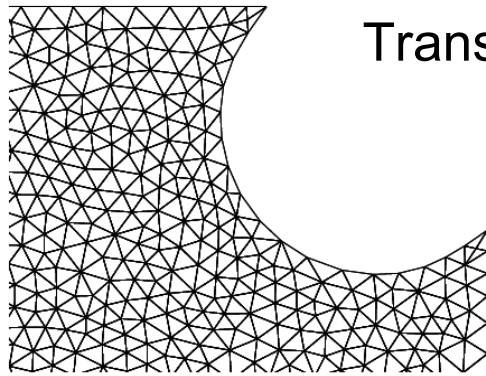
*Point clé* : limiter le nombre d'anciens points d'intégration pris en compte



# II- Insertion par adaptation de maillage

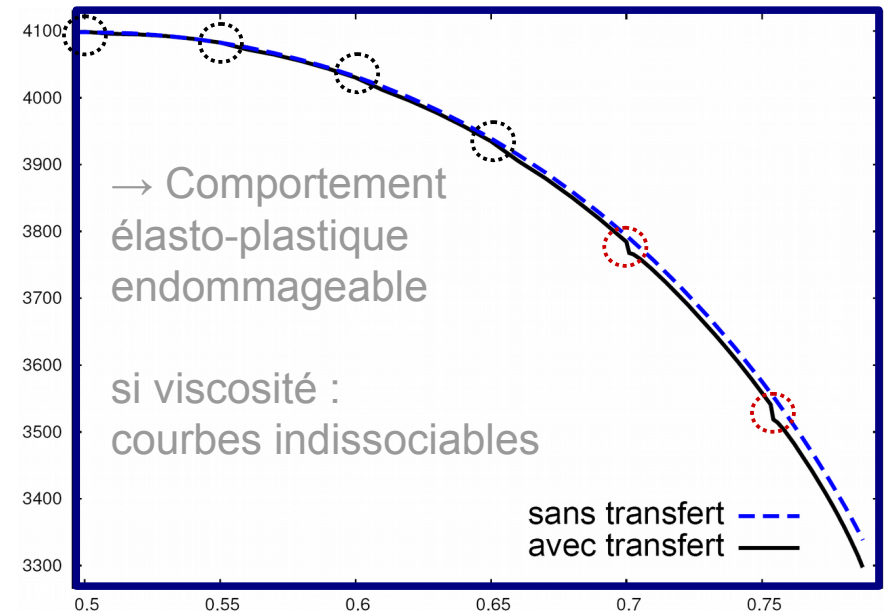
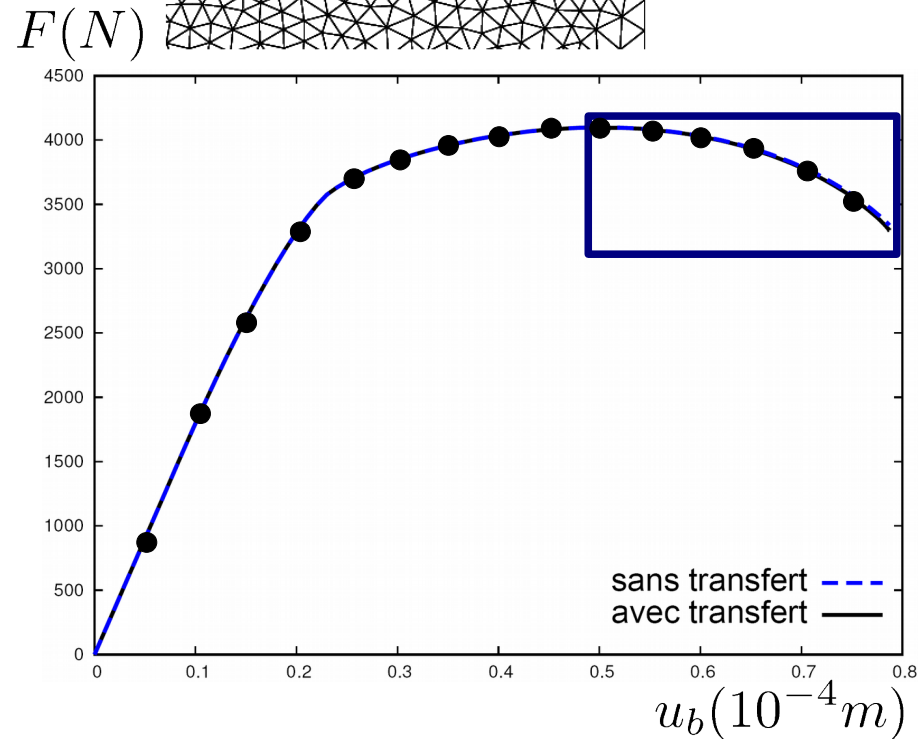
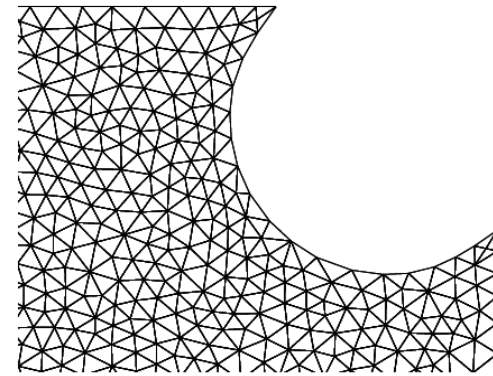
## 2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision

Principe : transfert de champs



Transfert avec fréquence

$$\Delta u_b = 0,05mm$$



# II- Insertion par adaptation de maillage

## 2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision

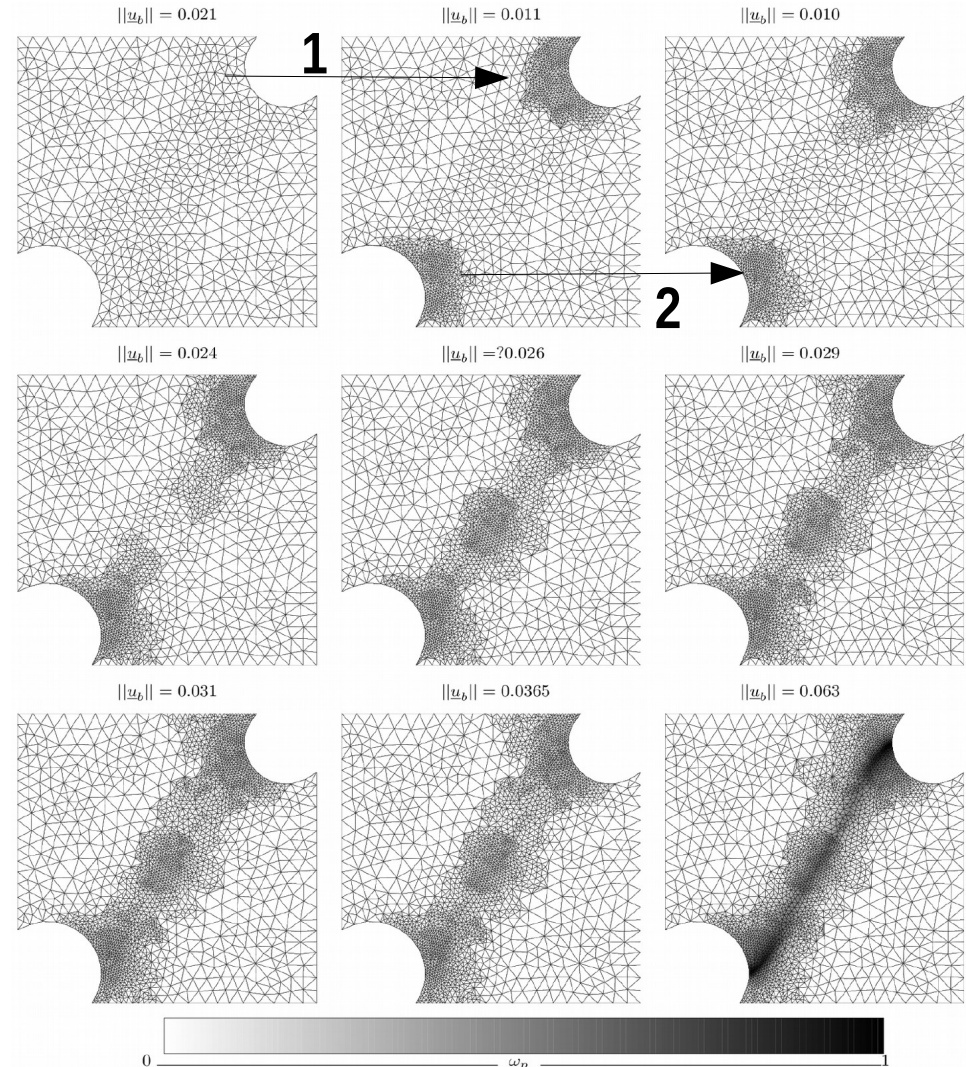
### Principe : transfert de champs

Une solution pour limiter la perturbation: **raffinement local très tôt**

1. Remailler finement **dès que possible** (régime faiblement non linéaire): **lissage**

2. Ne plus changer le maillage dans les zones suffisamment raffinées : point d'intégration le plus proche = **transfert exact**

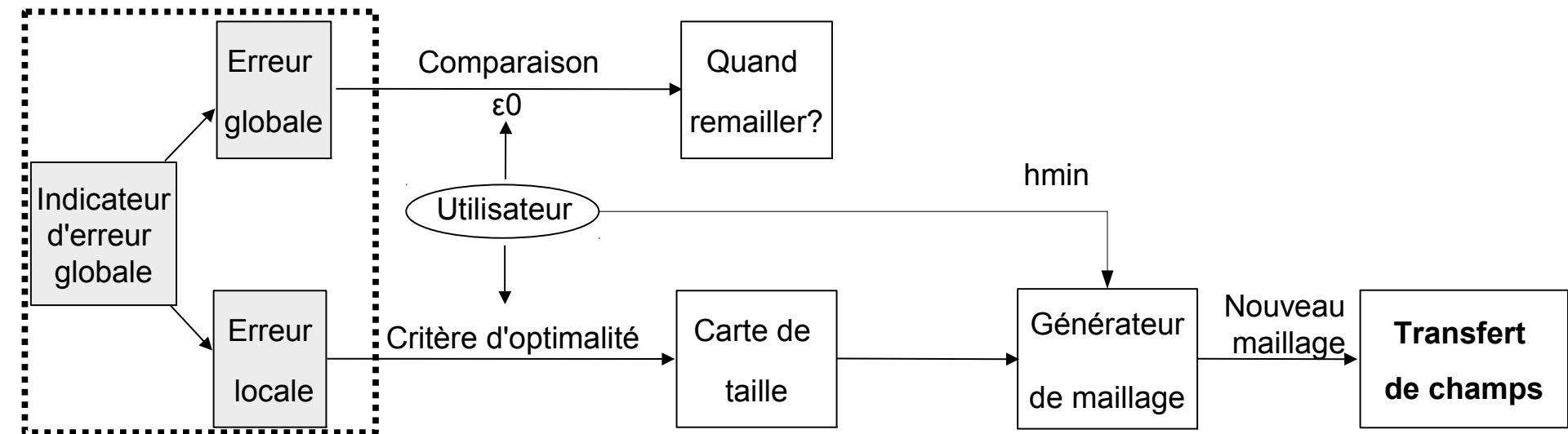
Question du déraffinement après le passage de la fissure en cours d'étude  
→ thèse A. El Ouazani Tuhami (CDM, TransValor)



# II- Insertion par adaptation de maillage

## 2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision

### Principe



1. Estimation d'erreur

2. Définition du nouveau maillage

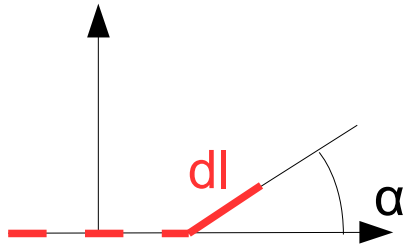
3. Création du nouveau maillage

4. Reprise du calcul

Retour à l'équilibre après :

(→ Étape de rééquilibrage)

→ Division de l'incrément suivant



## Introduction

### I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

Où ?

1. État de l'art des algorithmes de localisation
2. L'algorithme « marching ridges »
3. Quelques applications numériques

Comment ?

### II. Insertion par adaptation de maillage

Quand ?

Jusqu'à où ?

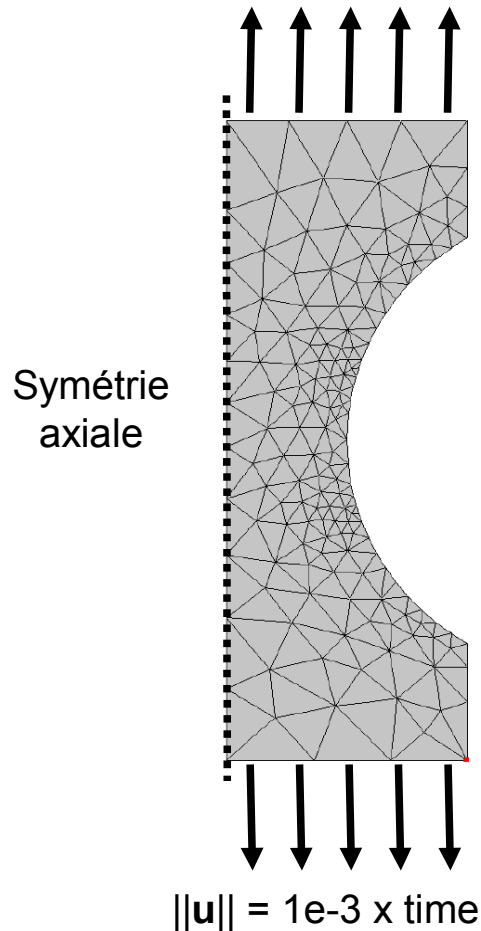
→  $dl \geq 0$  ?

1. Aperçu des méthodologies possibles
2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision
3. **Quelques applications numériques**

## Bilan et discussion

## Adaptation de maillage en grandes déformations – cas axisymétrique

Rupture dite en « cône-cuvette »



Modèle type GTN:  
régularisation de la porosité avec 2  
variables non locales  
[Besson, CRAC 2013]

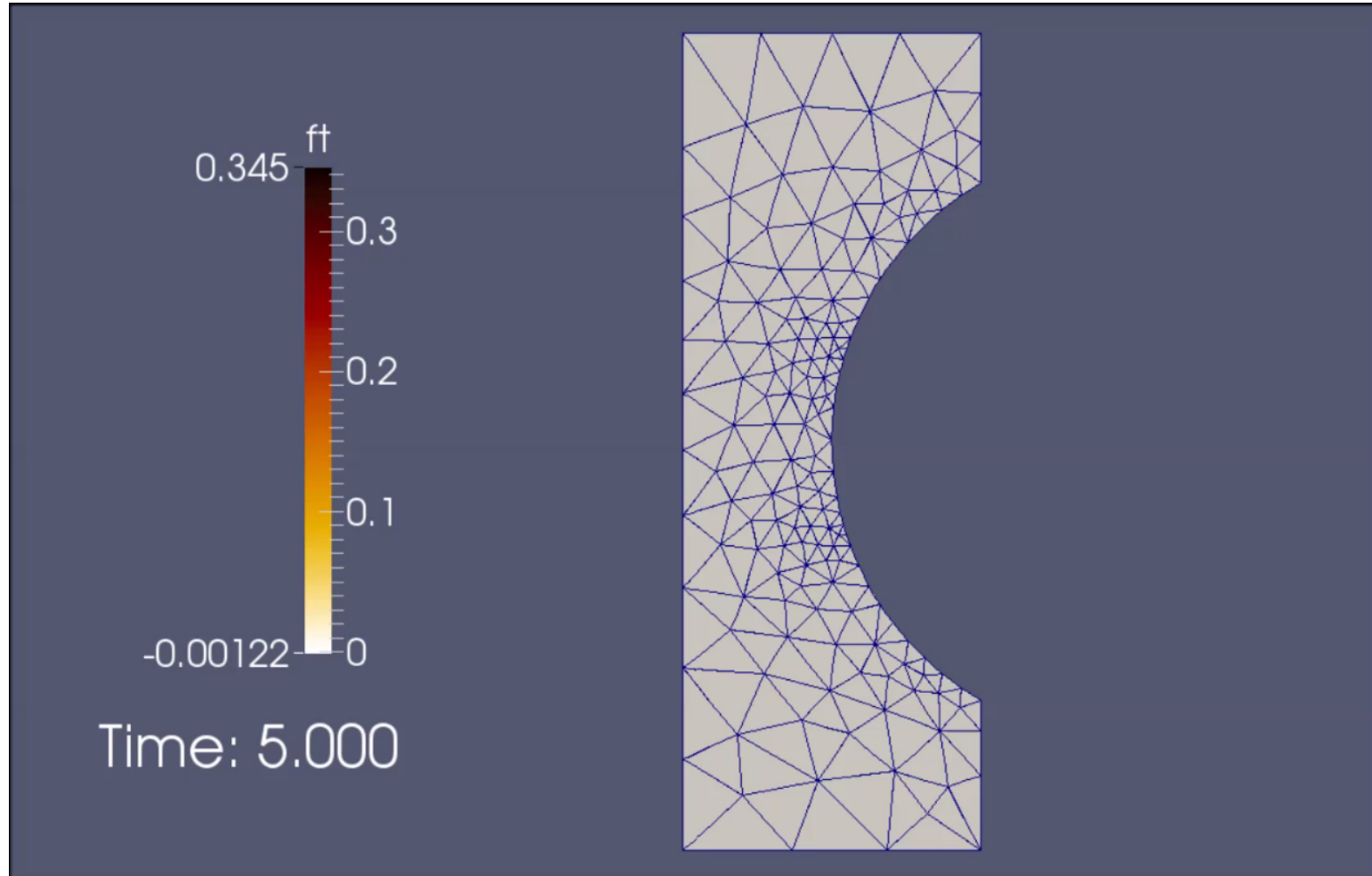
## II- Insertion par adaptation de maillage

### 3. Quelques applications numériques

#### Adaptation de maillage en grandes déformations – cas axisymétrique

Résolution implicite avec le  
code Zset/Zebulon

Rupture dite en « cône-cuvette »





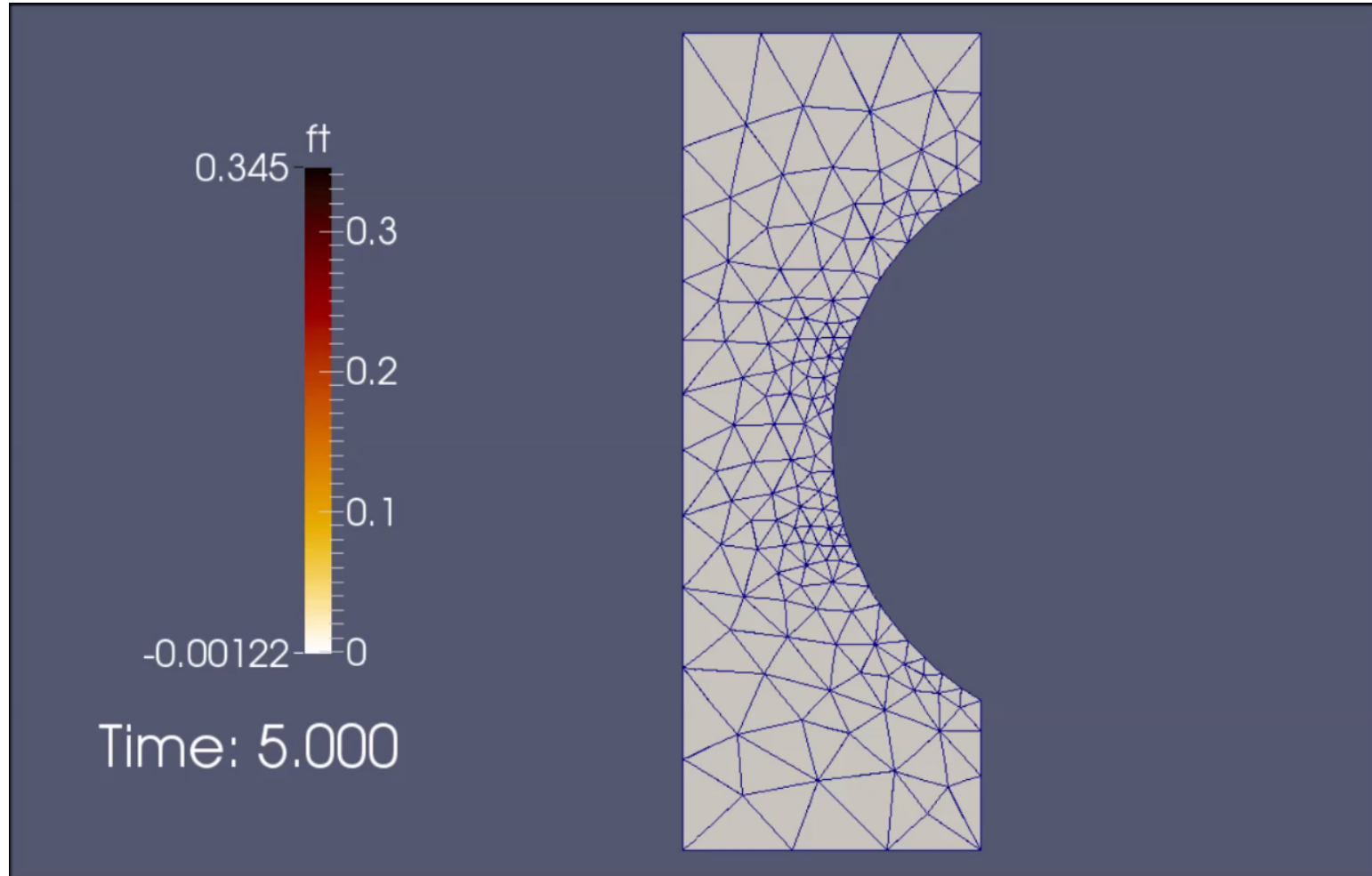
## II- Insertion par adaptation de maillage

### 3. Quelques applications numériques

#### Adaptation de maillage en grandes déformations – cas axisymétrique

Résolution implicite avec le  
code Zset/Zebulon

Rupture dite en « cône-cuvette »



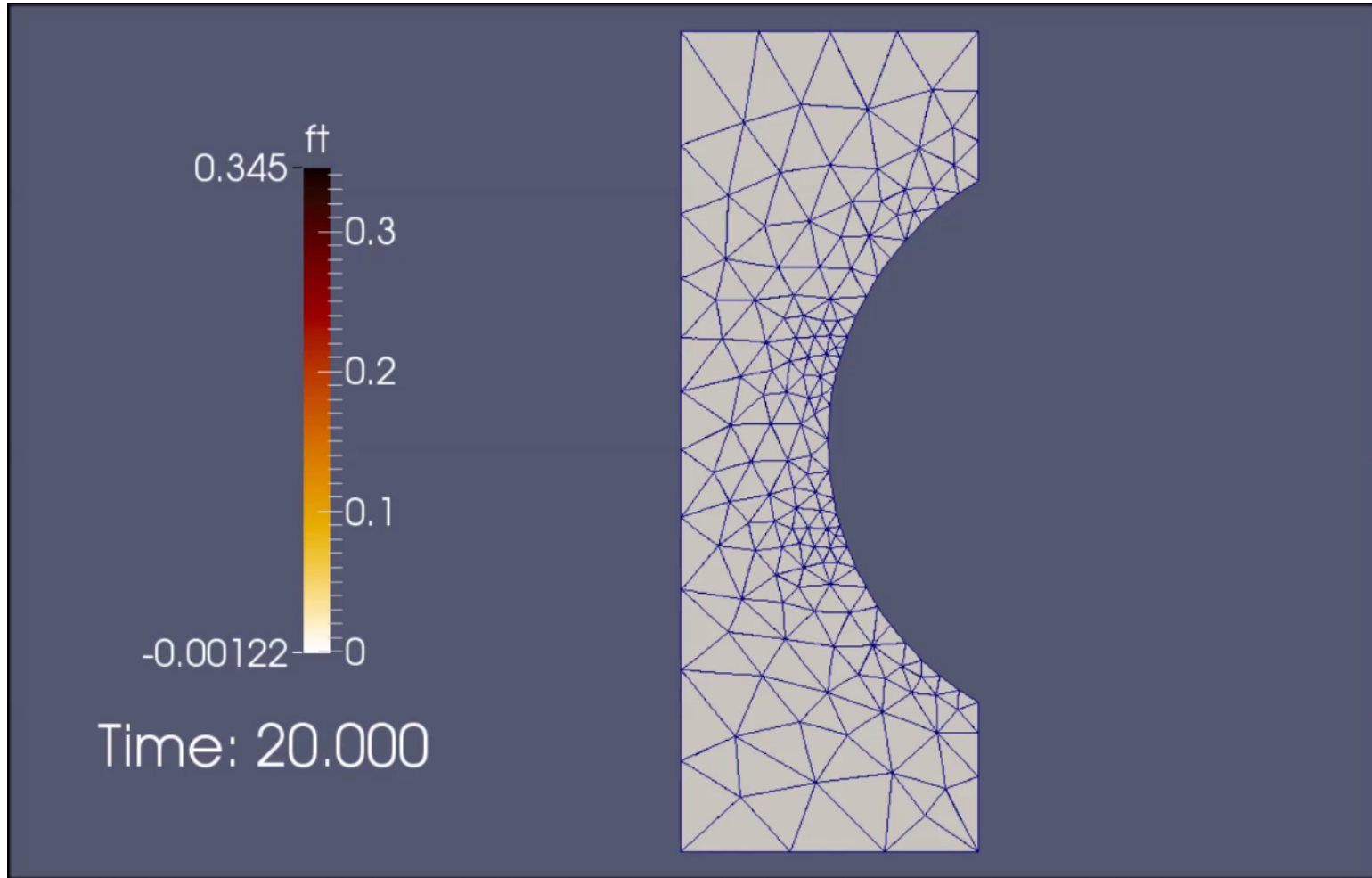
## II- Insertion par adaptation de maillage

### 3. Quelques applications numériques

#### Adaptation de maillage en grandes déformations – cas axisymétrique

Rupture dite en « cône-cuvette »

Résolution implicite avec le  
code Zset/Zebulon



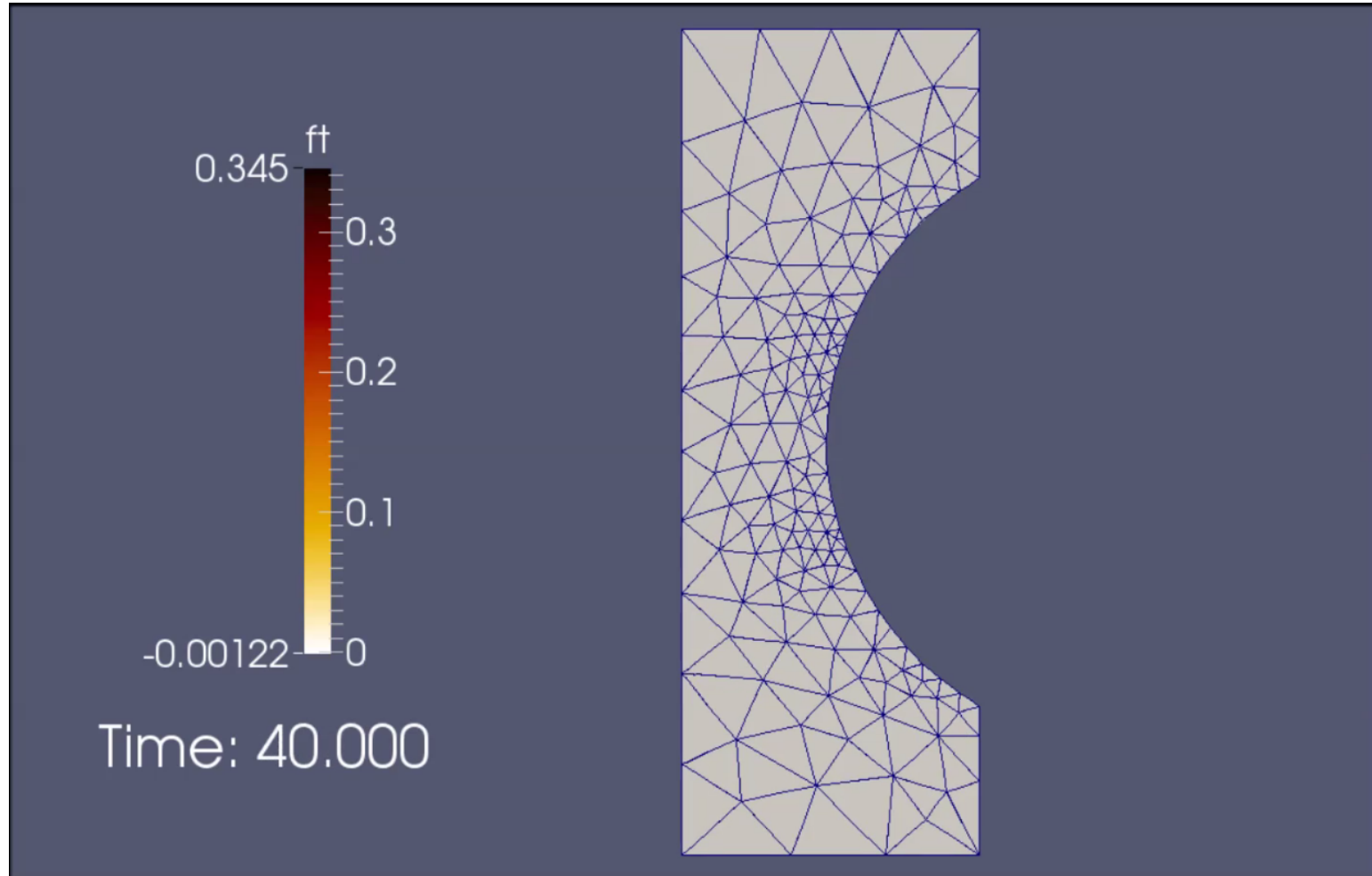
## II- Insertion par adaptation de maillage

### 3. Quelques applications numériques

#### Adaptation de maillage en grandes déformations – cas axisymétrique

Résolution implicite avec le  
code Zset/Zebulon

Rupture dite en « cône-cuvette »



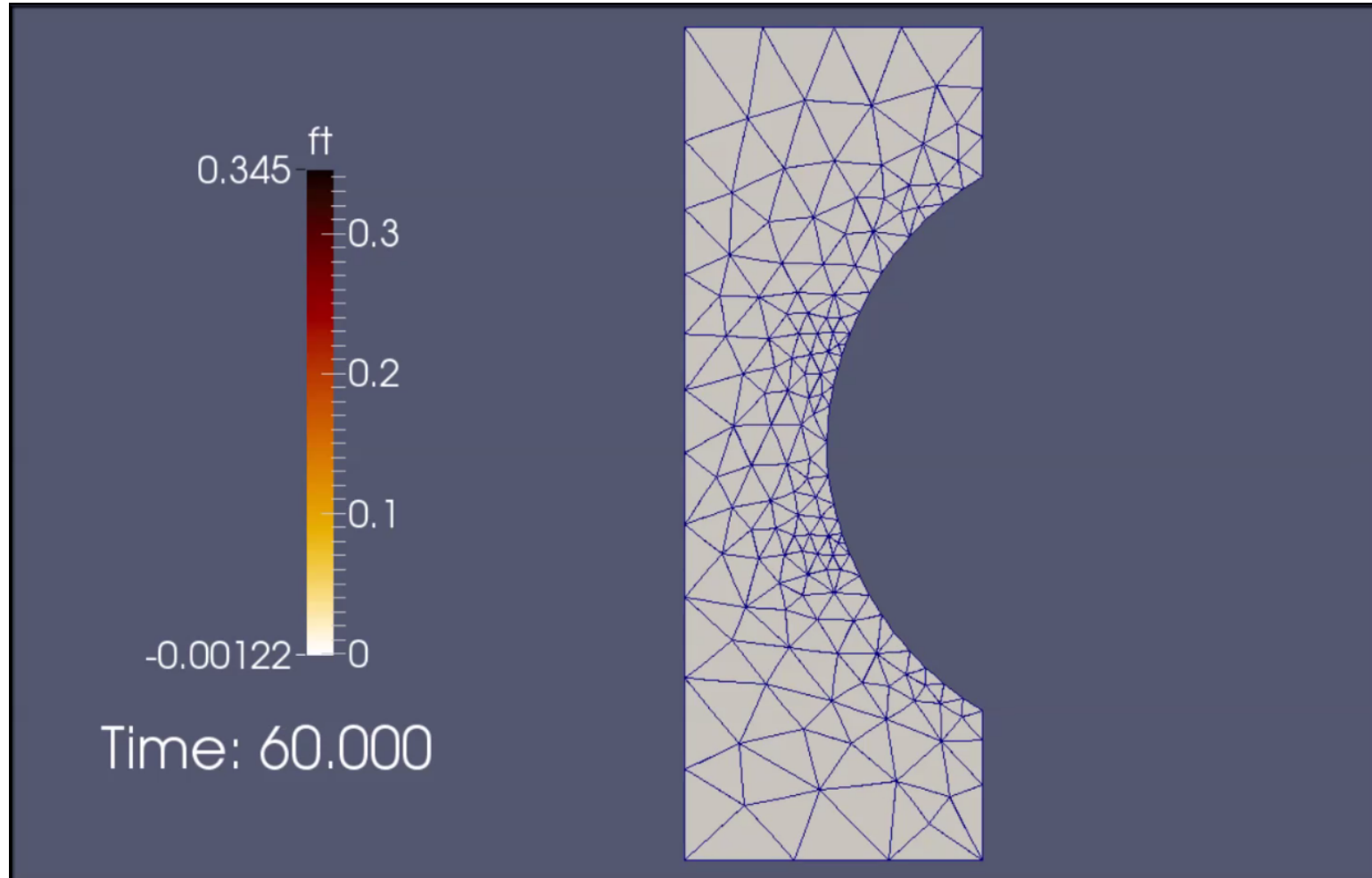
## II- Insertion par adaptation de maillage

### 3. Quelques applications numériques

#### Adaptation de maillage en grandes déformations – cas axisymétrique

Résolution implicite avec le  
code Zset/Zebulon

Rupture dite en « cône-cuvette »

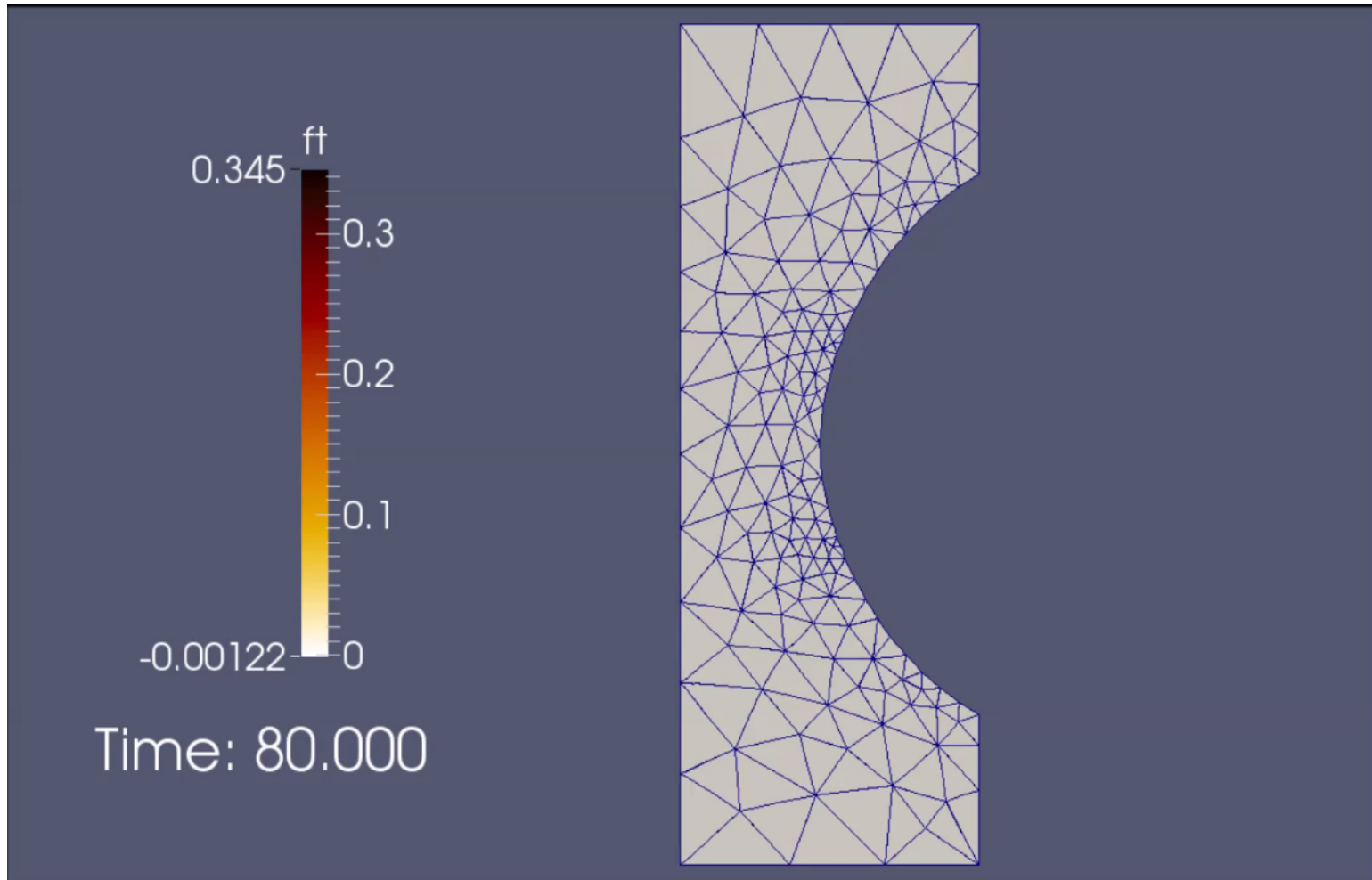


## II- Insertion par adaptation de maillage

### 3. Quelques applications numériques

#### Adaptation de maillage en grandes déformations – cas axisymétrique

Rupture dite en « cône-cuvette »



Résolution implicite avec le  
code Zset/Zebulon

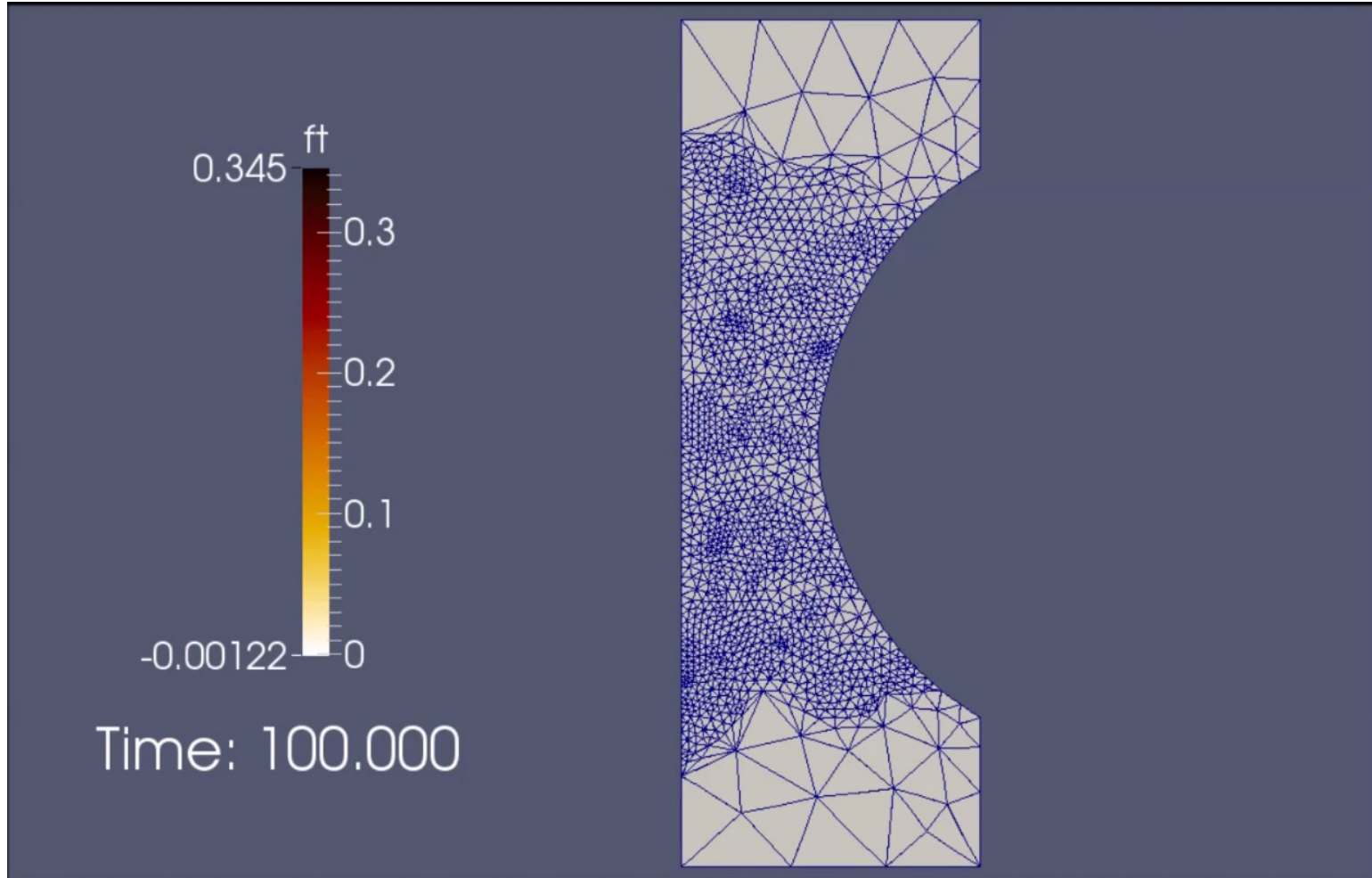
## II- Insertion par adaptation de maillage

### 3. Quelques applications numériques

#### Adaptation de maillage en grandes déformations – cas axisymétrique

Rupture dite en « cône-cuvette »

Résolution implicite avec le  
code Zset/Zebulon



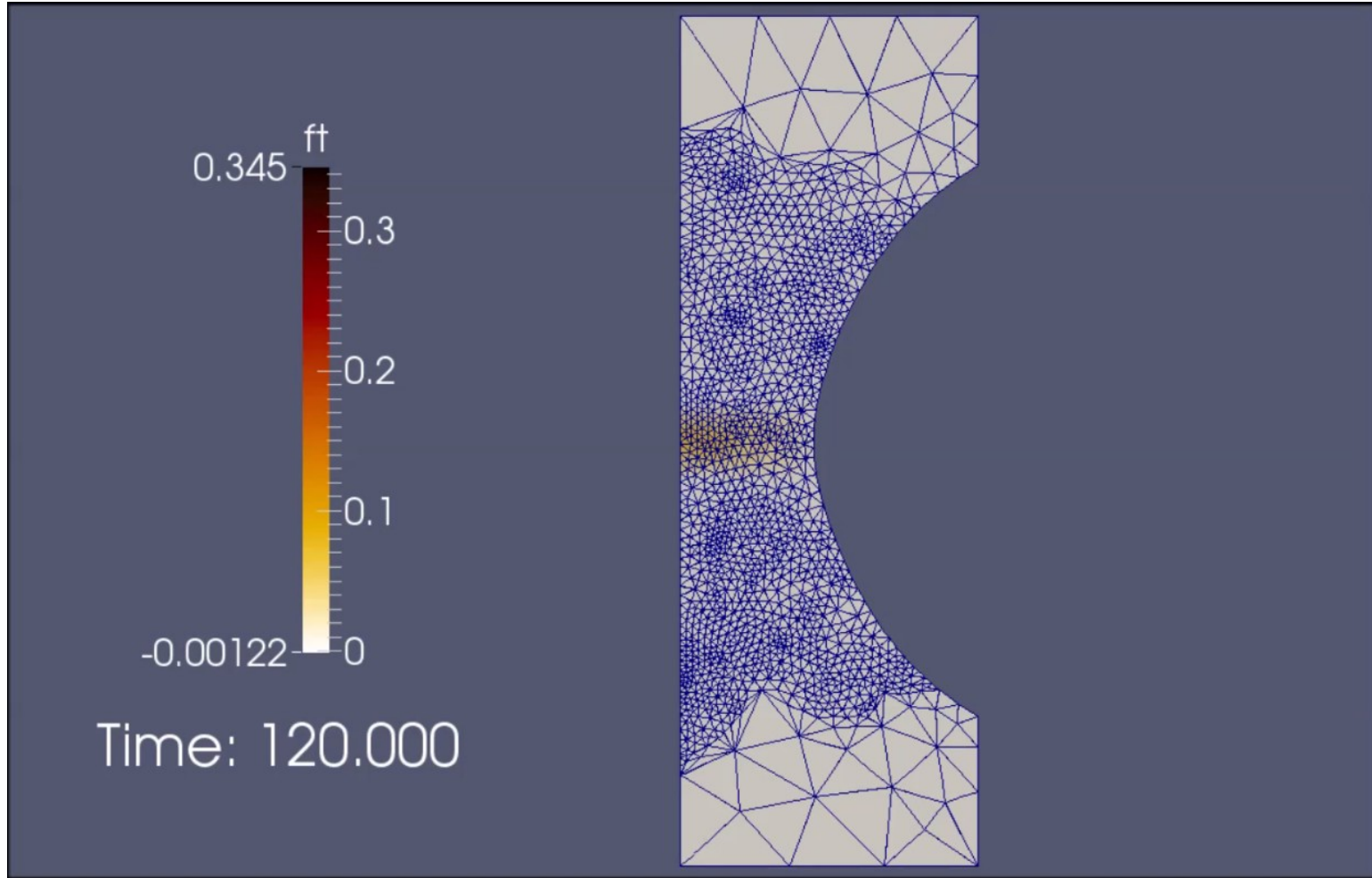
## II- Insertion par adaptation de maillage

### 3. Quelques applications numériques

#### Adaptation de maillage en grandes déformations – cas axisymétrique

Rupture dite en « cône-cuvette »

Résolution implicite avec le  
code Zset/Zebulon



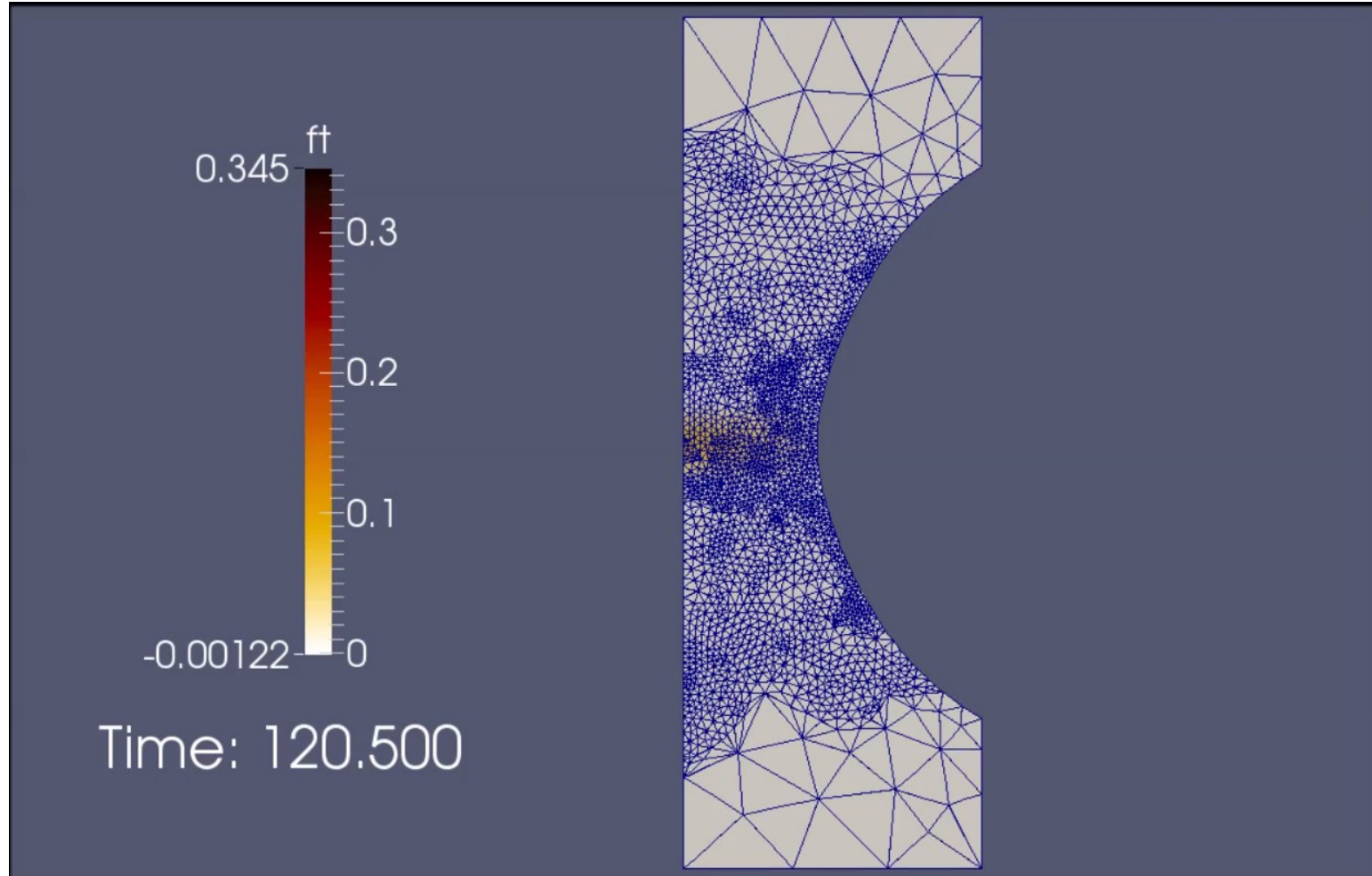
## II- Insertion par adaptation de maillage

### 3. Quelques applications numériques

#### Adaptation de maillage en grandes déformations – cas axisymétrique

Rupture dite en « cône-cuvette »

Résolution implicite avec le  
code Zset/Zebulon





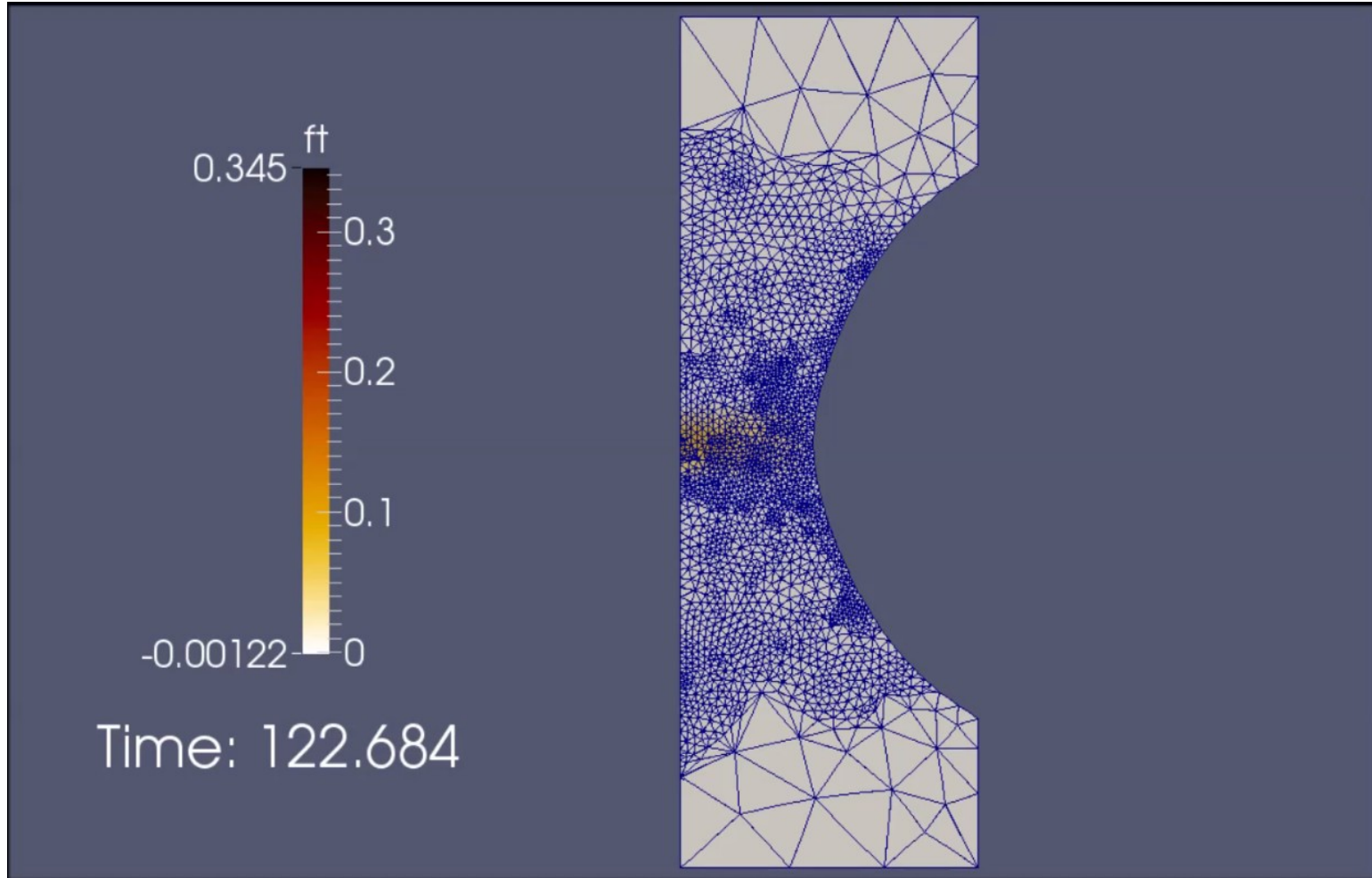
## II- Insertion par adaptation de maillage

### 3. Quelques applications numériques

#### Adaptation de maillage en grandes déformations – cas axisymétrique

Rupture dite en « cône-cuvette »

Résolution implicite avec le  
code Zset/Zebulon

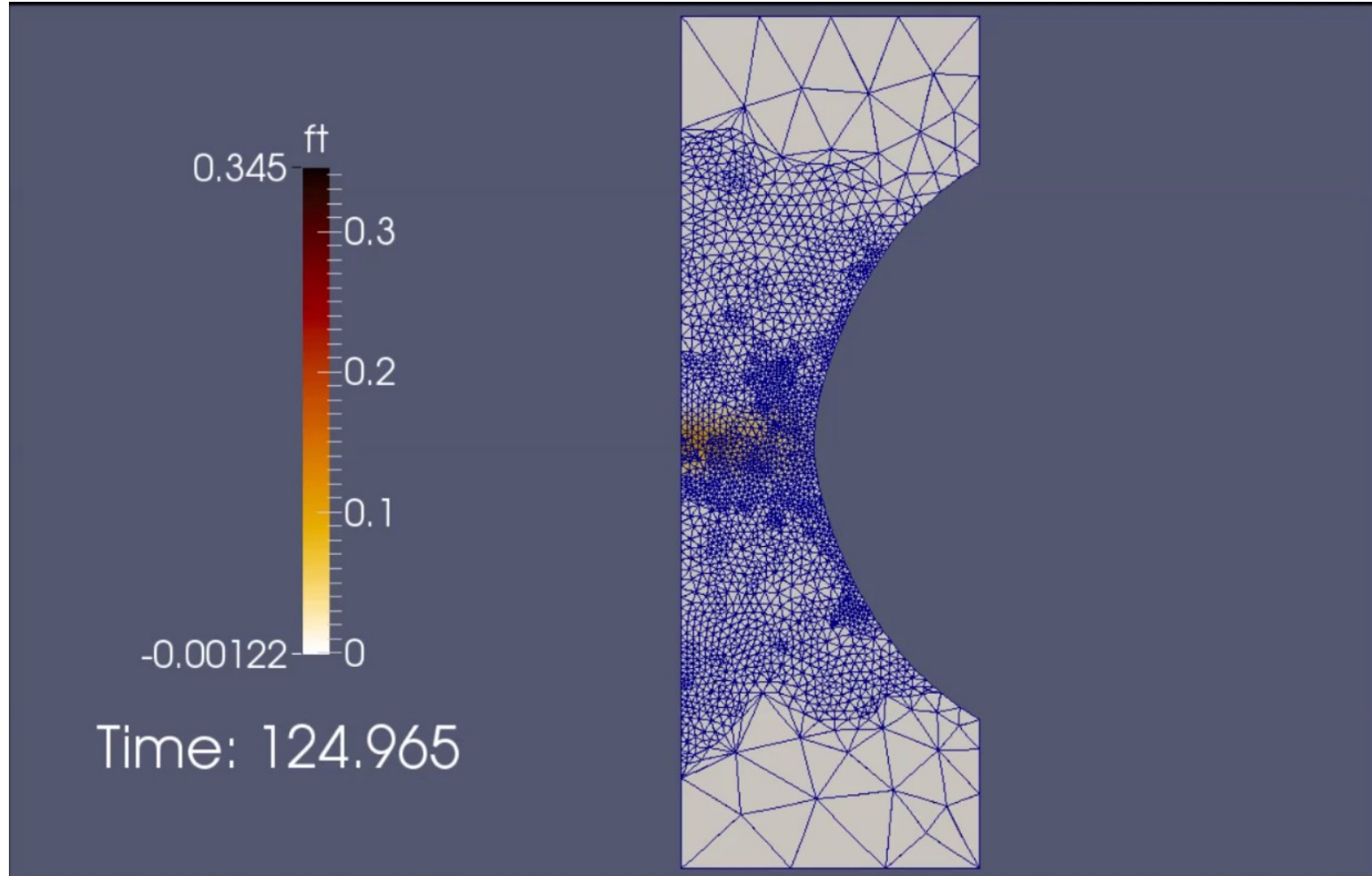


## II- Insertion par adaptation de maillage

### 3. Quelques applications numériques

#### Adaptation de maillage en grandes déformations – cas axisymétrique

Rupture dite en « cône-cuvette »



Résolution implicite avec le  
code Zset/Zebulon

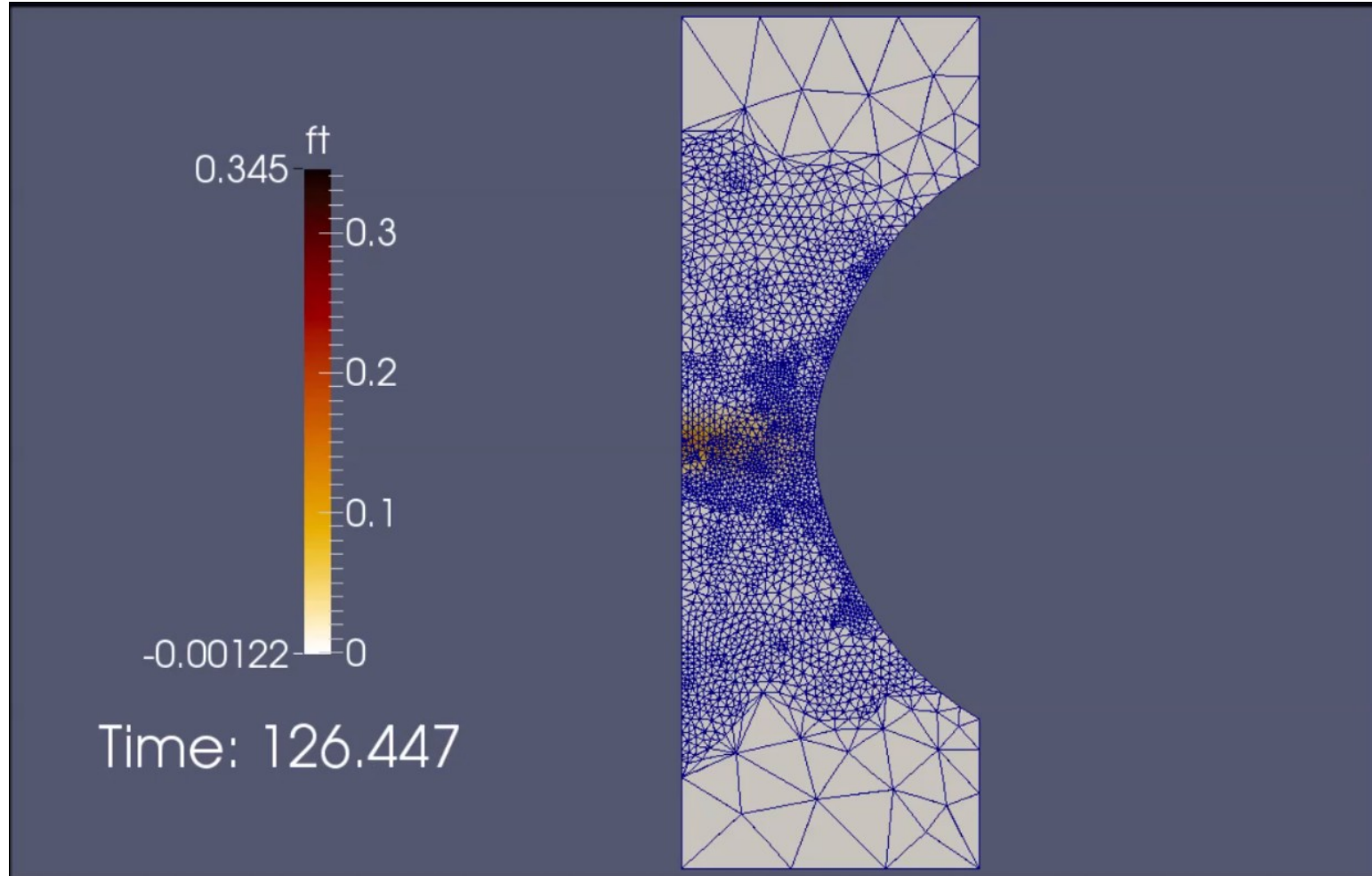
## II- Insertion par adaptation de maillage

### 3. Quelques applications numériques

#### Adaptation de maillage en grandes déformations – cas axisymétrique

Résolution implicite avec le  
code Zset/Zebulon

Rupture dite en « cône-cuvette »



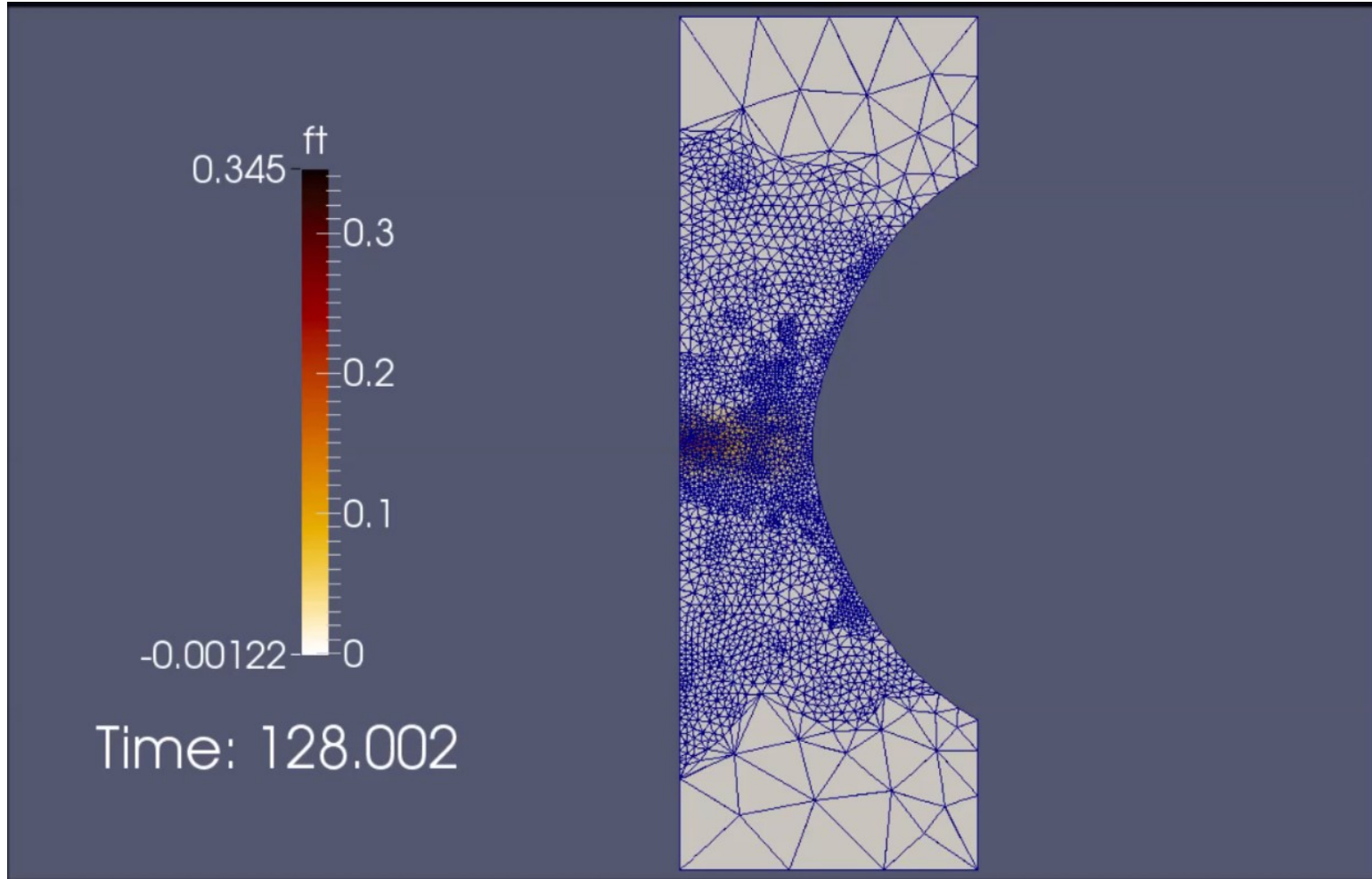
## II- Insertion par adaptation de maillage

### 3. Quelques applications numériques

#### Adaptation de maillage en grandes déformations – cas axisymétrique

Résolution implicite avec le  
code Zset/Zebulon

Rupture dite en « cône-cuvette »



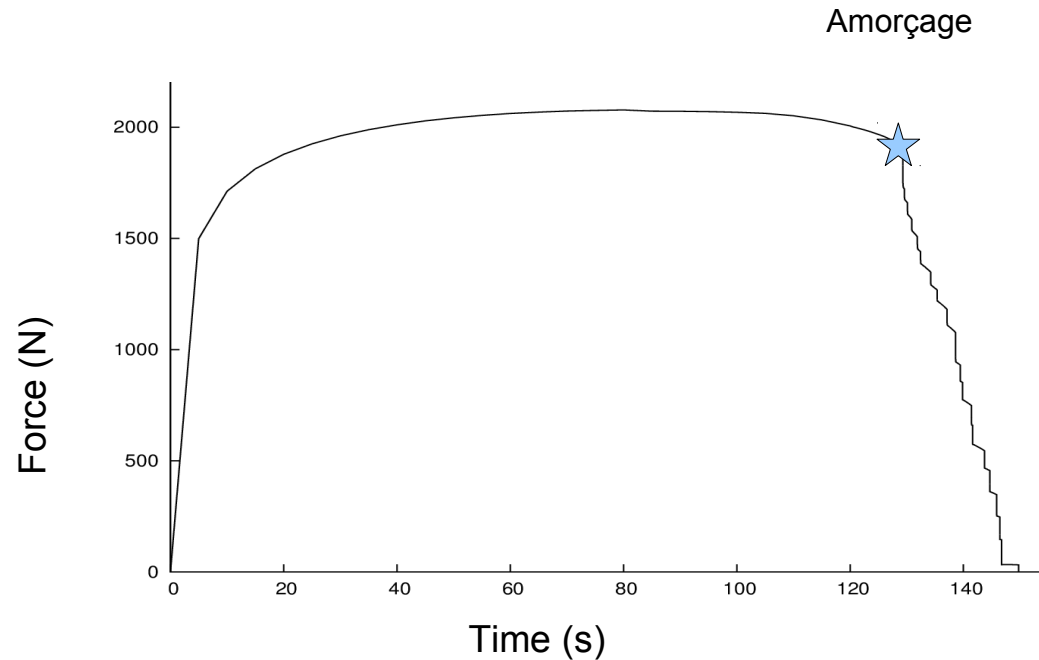
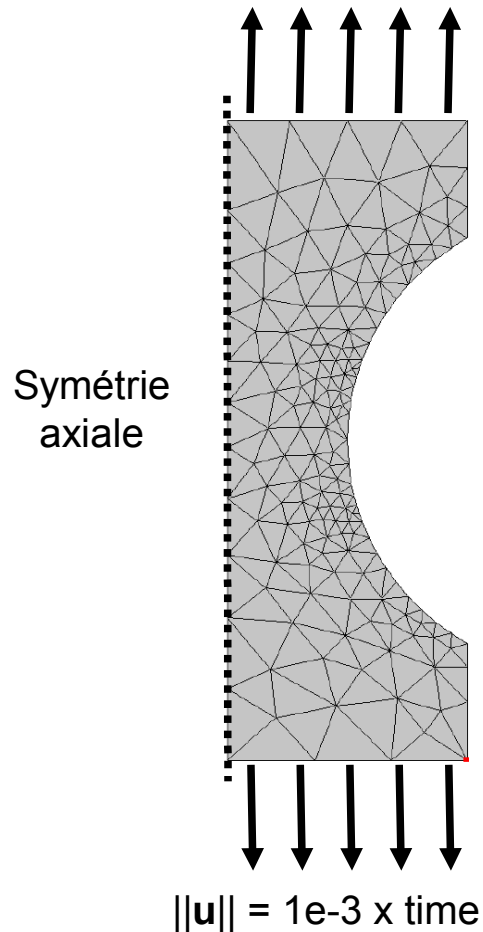
## II- Insertion par adaptation de maillage

### 3. Quelques applications numériques

#### Adaptation de maillage en grandes déformations – cas axisymétrique

Résolution implicite avec le  
code Zset/Zebulon

Rupture dite en « cône-cuvette »



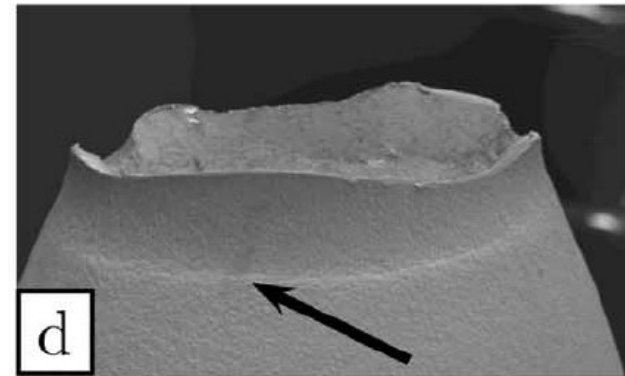
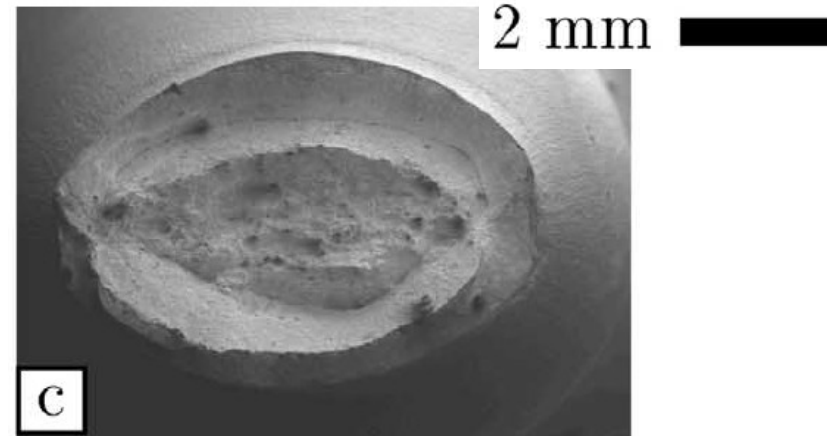
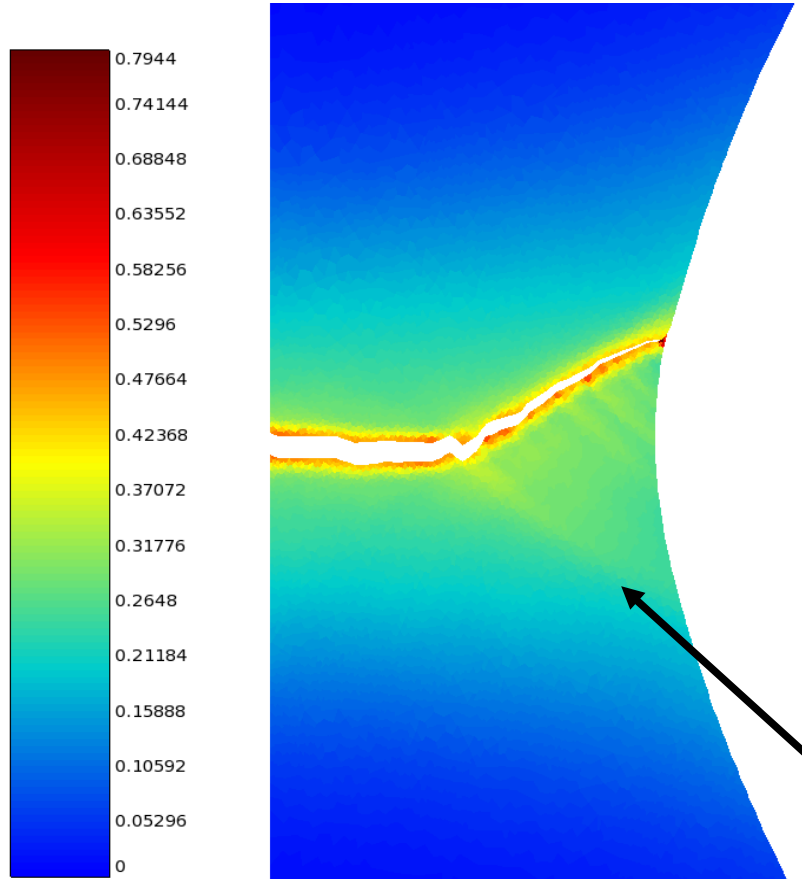
## II- Insertion par adaptation de maillage

### 3. Quelques applications numériques

#### Adaptation de maillage en grandes déformations – cas axisymétrique

Résolution implicite avec le code Zset/Zebulon

Rupture dite en « cône-cuvette »



Experimentally observed cup-cone and slant fractures: (c,d) Anisotropic material; the arrow indicates a secondary deformation band.

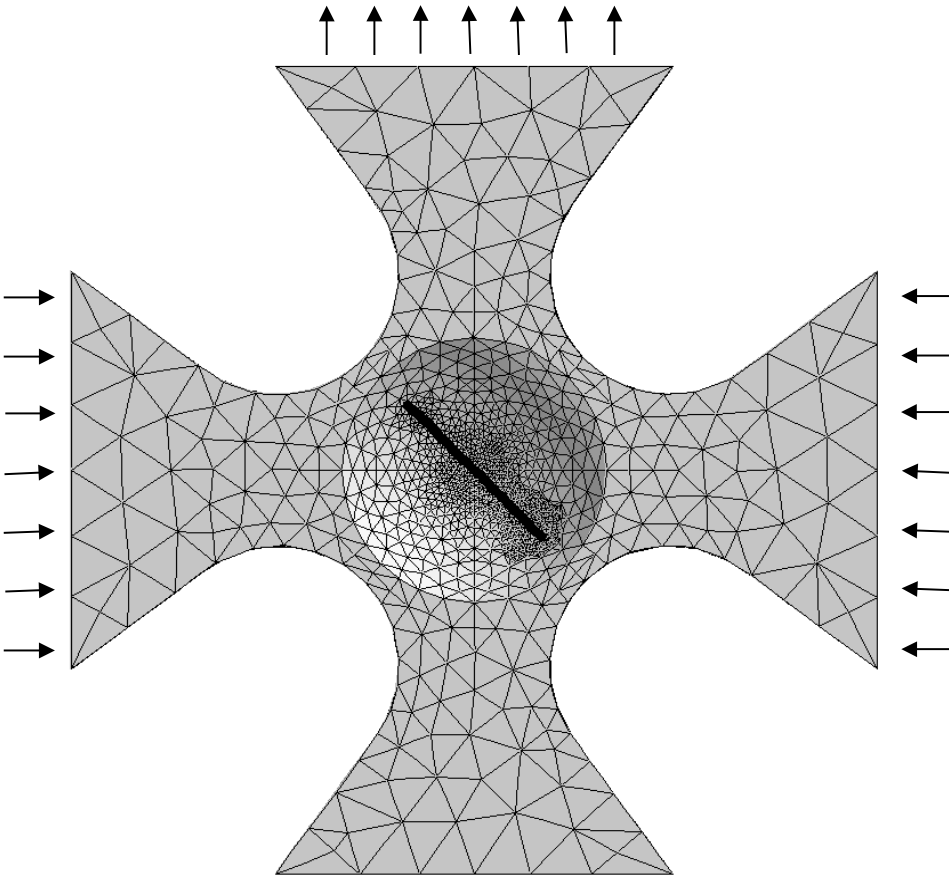
[Besson et al, Int. J. Solids and Structures, 2001]

## II- Insertion par adaptation de maillage

### 3. Quelques applications numériques

#### Adaptation de maillage en grandes déformations – cas 3D

Amorçage au cœur d'une éprouvette en croix avec chargement bi-axial de cisaillement

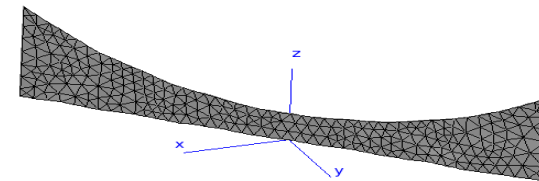


Modèle d'endommagement  
Régularisation par gradient  
implicite en petites déformations  
d'un modèle élasto-visco-  
plastique endommageable

[Engelen, Geers, Baaijens, Int. J. Plasticity, 2003]

EF à 4 champs mixtes non locaux

[Feld-Payet, Besson, Feyel,  
Int. J. Damage Mechanics, 2011]



Résolution implicite avec le  
code Zset/Zebulon

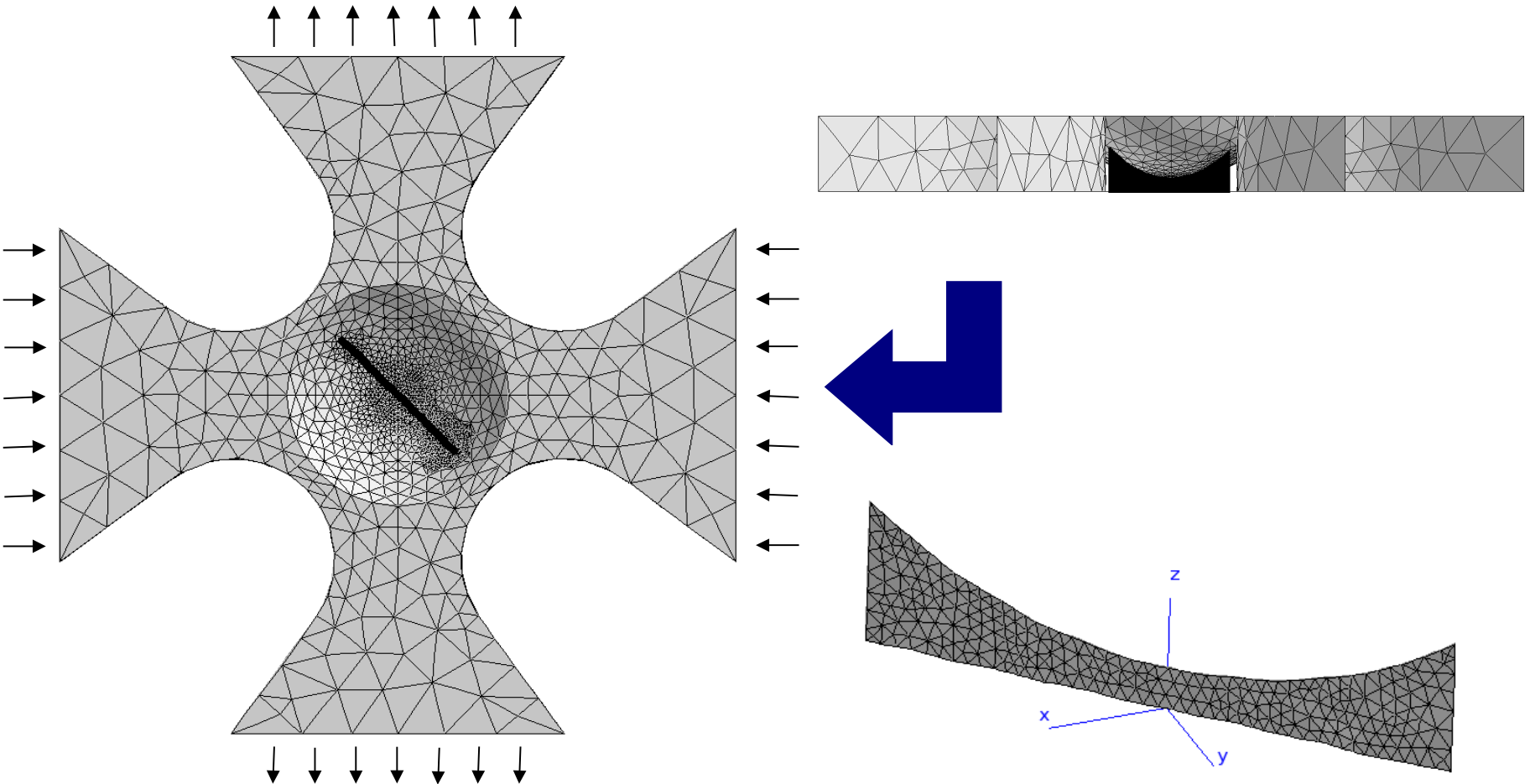
## II- Insertion par adaptation de maillage

### 3. Quelques applications numériques

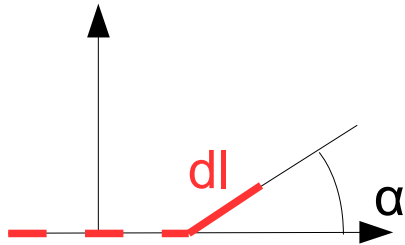
#### Adaptation de maillage en grandes déformations – cas 3D

Amorçage au cœur d'une éprouvette en croix avec chargement bi-axial de cisaillement

Résolution implicite avec le  
code Zset/Zebulon







## Introduction

### I- Localisation de fissures à partir d'un champ d'endommagement

Où ?

1. État de l'art des algorithmes de localisation
2. L'algorithme « marching ridges »
3. Quelques applications numériques

Comment ?

### II. Insertion par adaptation de maillage

Quand ?

Jusqu'à où ?

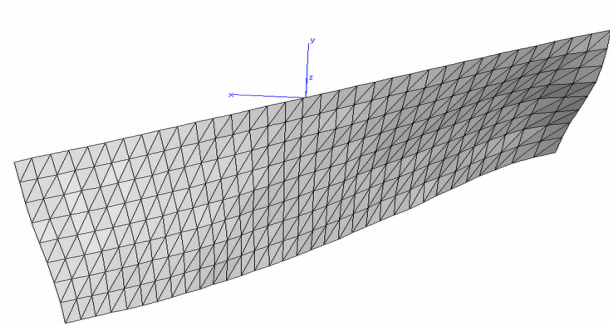
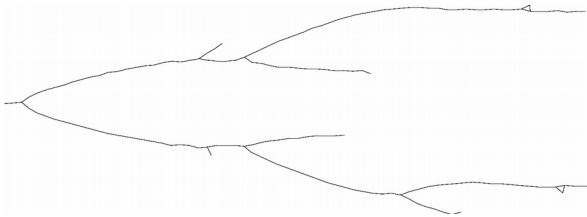
→  $dl \geq 0$  ?

1. Aperçu des méthodologies possibles
2. Une stratégie optimisant le rapport coût/précision
3. Quelques applications numériques

## Bilan et discussion

## 1. Où ?

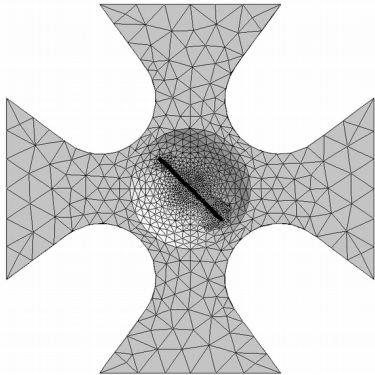
→ Algorithme de localisation de fissure : **Marching ridges**



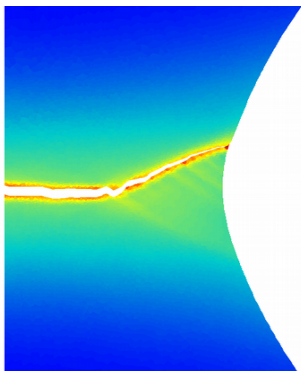
- algorithme **local** s'appuyant sur un champ scalaire (peu coûteux)
- **non intrusif**
- **polyvalent** : post traitement / incrément, petites déformations, transformations finies, 2D/3D, compatible avec adaptation de maillage/érosion/X-FEM,...
- applicable à **n'importe quel modèle de comportement régularisé** avec une variable représentant la dégradation matériau
- permet de visualiser des **surfaces de fissure 3D complexes**

**2D suffisamment robuste pour analyse d'images**  
**3D → reste à montrer branchement et intersection**

## 2. Comment ? → **Adaptation de maillage**



- Conserver un **bon facteur de forme en grandes déformations**
- **Optimiser le rapport coût/précision** avec un choix cohérent :  
indicateur d'erreur/critère d'optimalité/opérateur de transfert de champs



- **Mécanique Linéaire de la Rupture: robuste, performant et déjà utilisé par les industriels**
- **Non linéaire : adaptation avant fissuration serait un bon premier pas pour industrialisation** (SafranTech)

3. Quand ?  
Jusqu'à où ?  
→  $dl \geq 0$  ?

→ Critère d'insertion

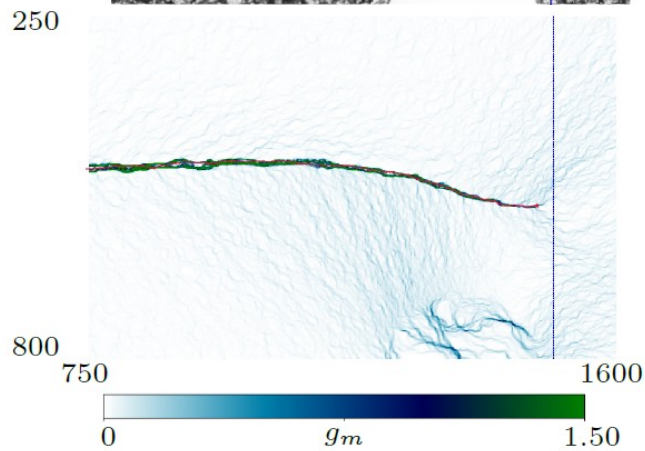
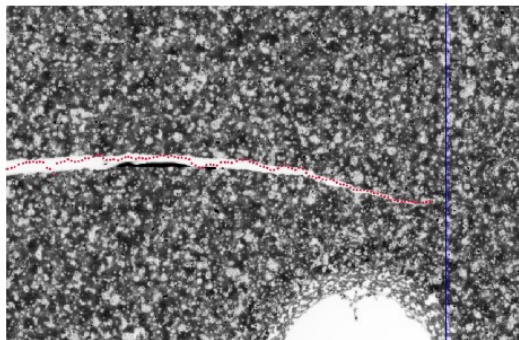
Améliorations possibles :

- s'appuyer sur une étape de rééquilibrage

- **limiter les perturbations**

ex : introduction d'éléments de zone cohésive  
**Attention à réduire autant que possible les autres sources d'instabilité (ex: verrouillage) avant de vouloir modifier le modèle.**

- Nécessité d'avoir des **comparaisons essai-calcul** pour comparer les trajets et les vitesses d'avancée de fissure,...



Maximum du gradient de  $||u||$

# Discussion

Avant même la transition endommagement/fissure, attention au point de départ :  
**un modèle continu d'endommagement**

Avoir confiance nécessite des comparaisons essai-calcul pour identifier les paramètres des modèles

→ question ouverte du choix du paramètre de régularisation

Retour sur chacune des briques pour validation ou révision

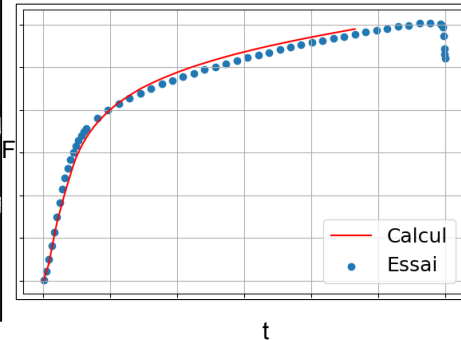
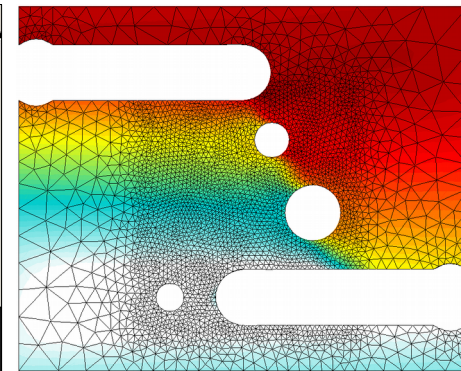
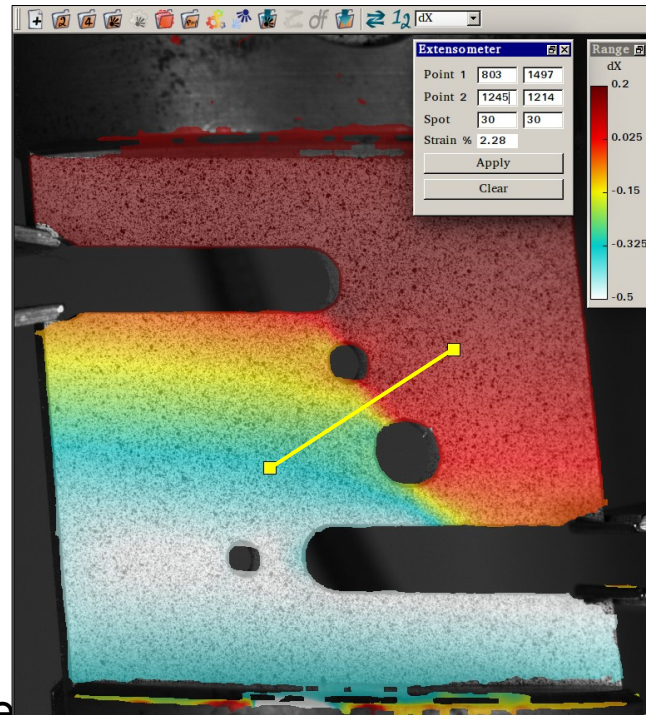
Thèses :

A. El Ouazani Tuhami

(TransValor+CDM) : quasi-statique

O. Voreux (SafranTech) : fatigue

V. Davaze (PSA) : dynamique

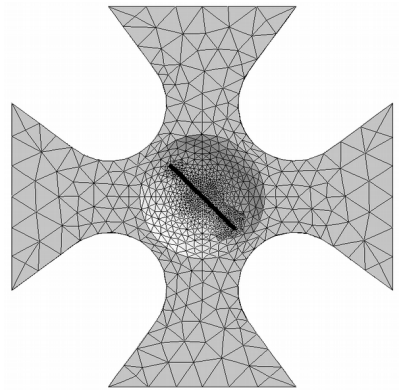


Escale : plateforme de dialogue essai-modèle-calcul

[Thèse F. Bettonte (Onera, 2017)]

# Transition endommagement-fissure : détection par suivi de crête et insertion par adaptation de maillage

Sylvia Feld-Payet



Merci pour votre attention

