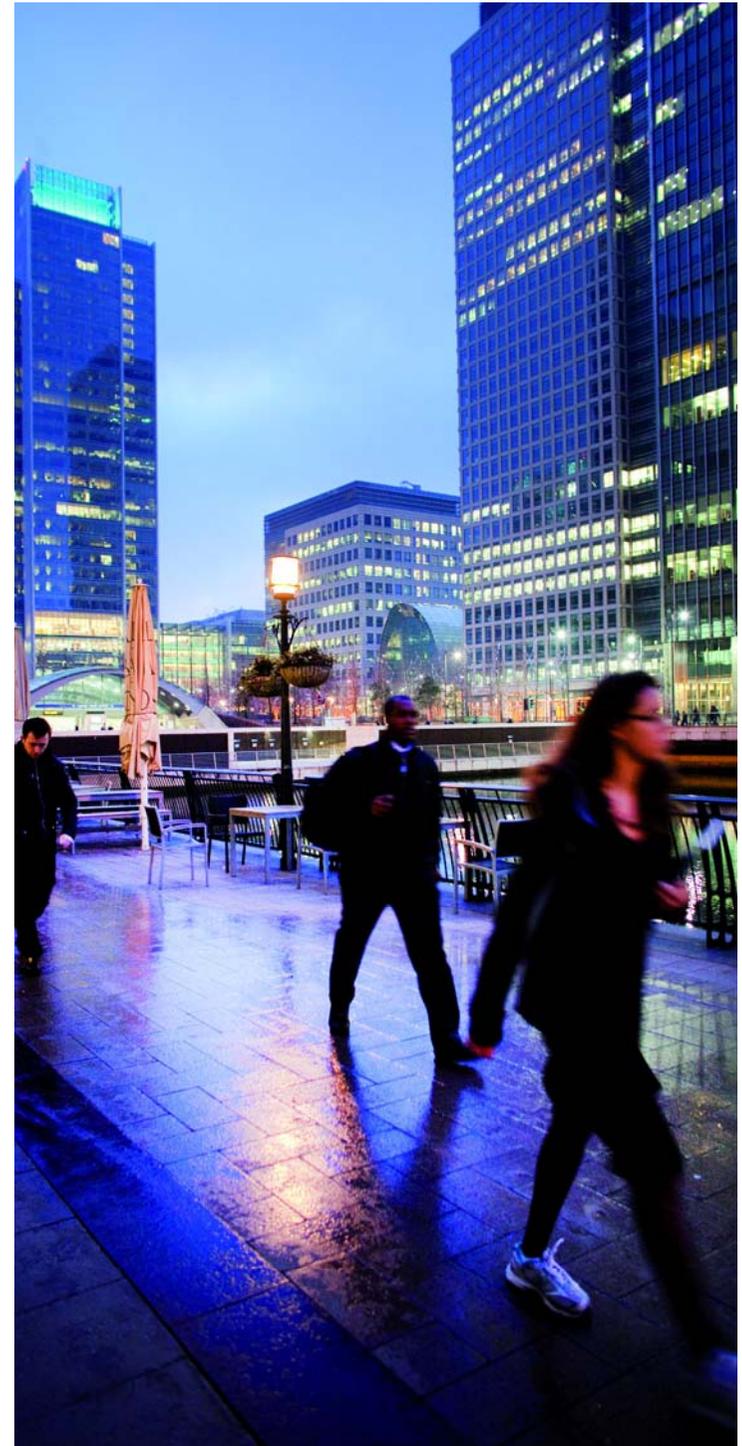




RUPTURE DUCTILE VERROUS ET PERSPECTIVES

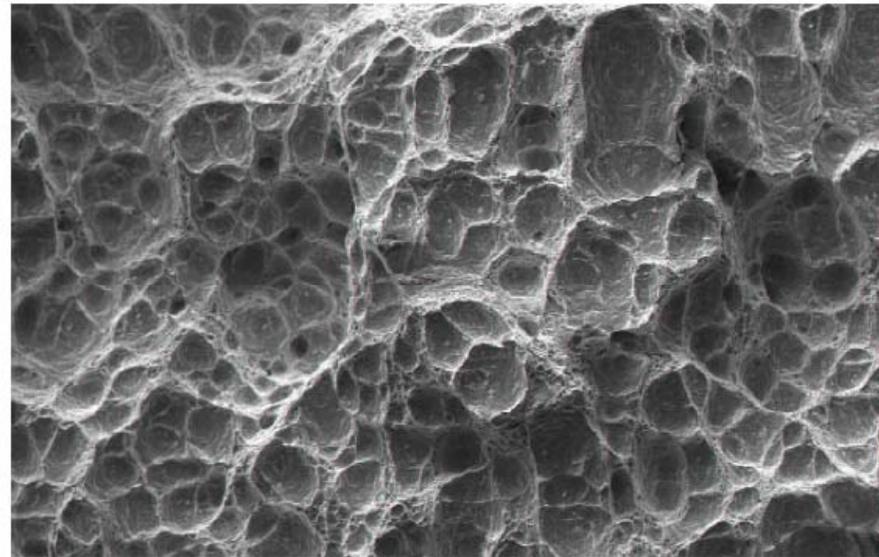
Eric Lorentz (EDF R&D)

Journée Mécamat
25 Septembre 2012



SOMMAIRE

- 1. Besoins industriels*
- 2. Pratique courante*
- 3. Modèles étendus*
- 4. Axes de recherche*





1 – BESOINS INDUSTRIELS



BESOINS INDUSTRIELS

Dimensionnement en conception

- Par défaut, rupture fragile (conservatif, brutal)
- Assortis de coefficients de sécurité réglementaires

Rupture ductile 1) Maîtriser les marges

- Réduction des marges avec le temps
 - Vieillessement des matériaux
 - Sévérité des chargements (durcissement règles, conduite, ...)
 - Surveillance en fonctionnement
- Gagner en réalisme / critères réglementaires
 - jugés très conservatifs (effets de structure, par ex.)
 - *Inadaptés au régime de rupture potentiel* (ductile et non pas fragile)

Rupture ductile 2) Conforter l'existant

- Mieux estimer les marges d'un critère de charge limite
- En considérant l'éventualité d'une rupture ductile

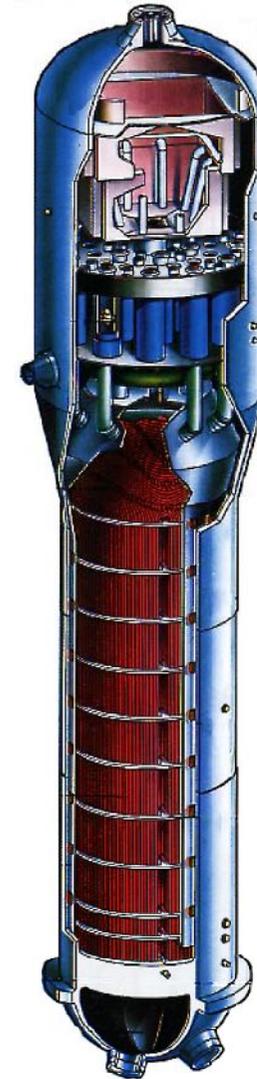
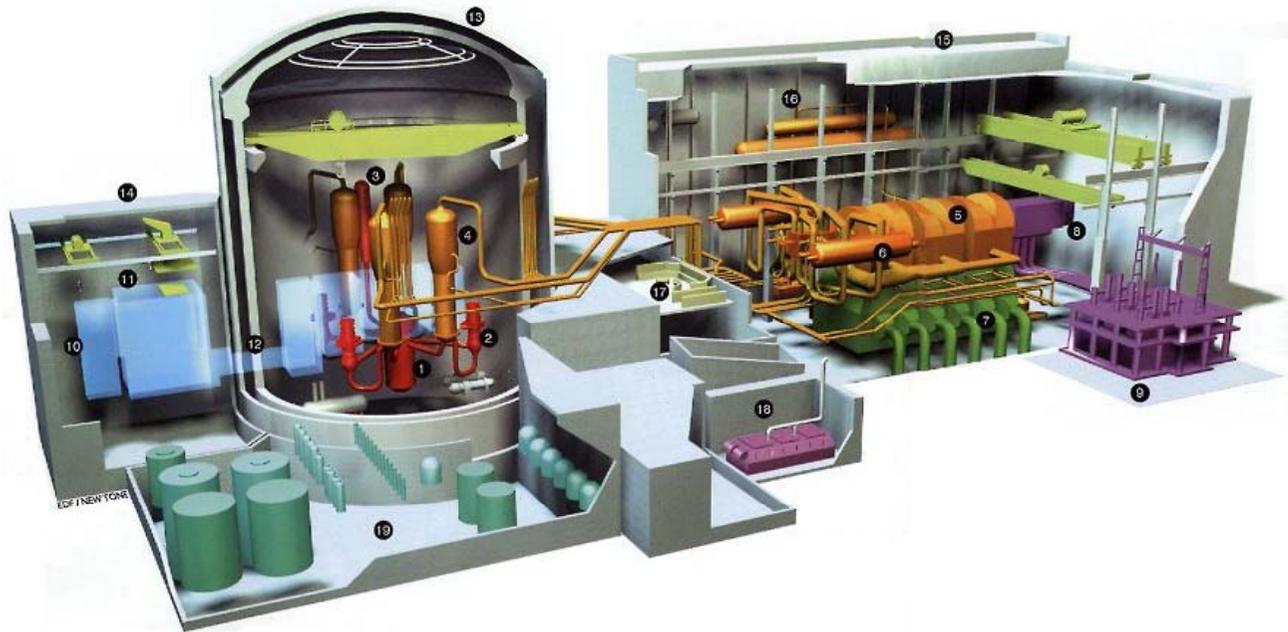


Codification

Formulation
Validation éprouvettes
Validation quasi-structures
Industrialisation / protocole



LE GÉNÉRATEUR DE VAPEUR



TRONÇON ARE / ASG

Contexte

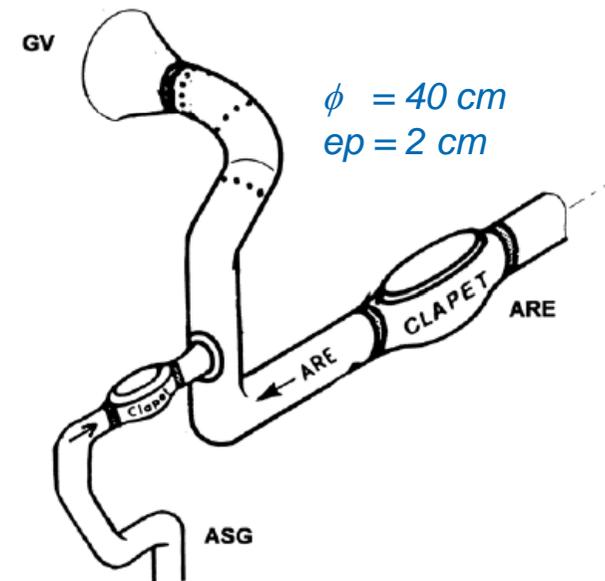
- Critères réglementaires très conservatifs → Défaut critique très petit
- Matériau : acier carbone manganèse
- Régime de transition fragile / ductile (T° minimales)

Démarche / taille de défaut critique

- Prendre en compte les effets de structure
- Démontrer l'absence de risque de rupture fragile
- Evaluer le défaut critique en rupture ductile

Analyses à mener

- Critère d'amorçage en rupture fragile
 - Effets de structure
 - Zone de transition (grandes déformations plastiques)
- Compétition fragile / ductile



PLAQUE DE PARTITION

Contexte

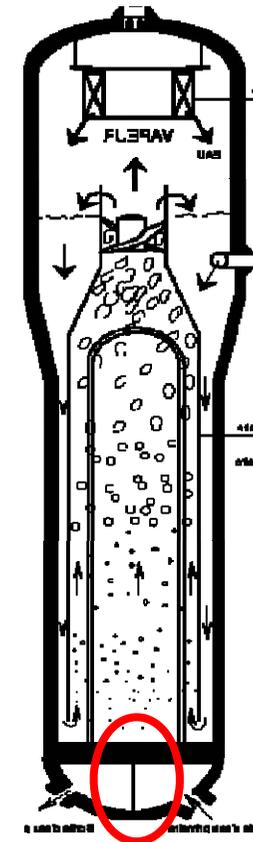
- Apparition de défauts sur la plaque
- Matériau à haute ténacité (Inconel 600)
- Justification par analyse limite (ruine plastique)

Démarche de justification

- Refroidissement du cœur → OK avec les trois autres GV
- Intégrité du GV / pression → OK sans la plaque
- Intégrité de la plaque → OK analyse limite

Analyses complémentaires à mener

- Marge ruine plastique vs. propagation ductile ?
- Compétition entre les deux modes de ruine
- Simulation détaillée ou critère discriminant ?





2 – PRATIQUE COURANTE



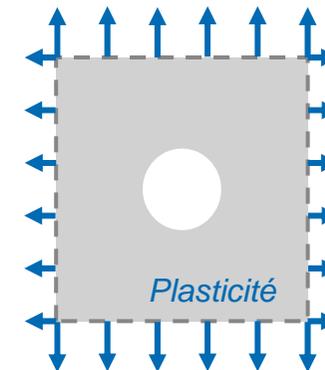
DÉCHIRURE DUCTILE : APPROCHE LOCALE

Méthodologie : croissance d'une cavité

- Cavité sphérique dans un milieu plastique infini

$$\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) = \alpha \int_0^{\varepsilon_{eq}^p} \exp\left(\frac{3}{2} \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) d\varepsilon_{eq}^p$$

- Calcul en post-traitement

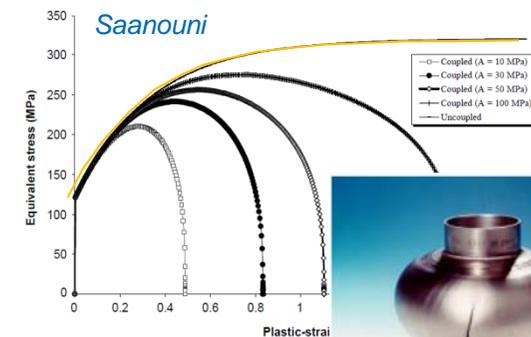


Limitation majeure

Pas d'effet de l'endommagement sur la mécanique



Critère à réserver à des analyses préliminaires



DÉCHIRURE DUCTILE : APPROCHE GLOBALE

Méthodologie $J - \Delta a$

- Approximation de la plasticité par un potentiel élastique

$$\mathcal{E}(t) = \int_0^t \mathcal{P}_{ext} dt \approx \int_{\Omega} \Phi_{HM}(\boldsymbol{\varepsilon}) d\Omega \quad \mathcal{F}_{fis}(t) = G_c \Delta a$$

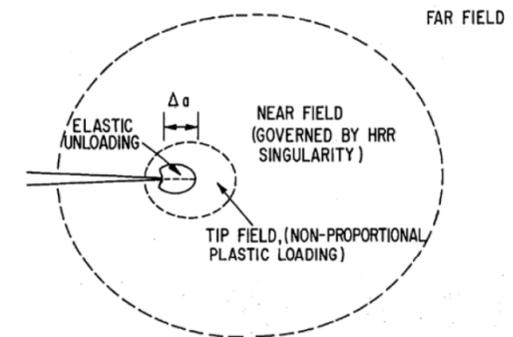
$$G = - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathcal{E}(t + \Delta t) - \mathcal{E}(t)}{a(t + \Delta t) - a(t)} \leq G_c$$

- Calcul par intégrale de domaine ($G-\theta$)
- Démarches expérimentales normalisées \rightarrow seuil $J(\Delta a)$



Limitations

- **Pas d'équivalence plasticité \Leftrightarrow élasticité non linéaire**
 - Décharges
 - Charges non radiales
- Dépendance des courbes $J(\Delta a)$ à la géométrie
 - Les éprouvettes CT et SENB sont jugées conservatives





3 – MODÈLES ÉTENDUS



CRITÈRES ÉTENDUS À LA PLASTICITÉ

Energies liées à la plasticité en présence d'une fissure

$$\mathcal{E}(t) = \int_0^t \mathcal{P}_{ext} dt = \int_{\Omega} \Phi(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\alpha}) d\Omega + \int_{\Omega} \int_0^t \Psi(\dot{\boldsymbol{\alpha}}) dt d\Omega \quad \mathcal{F}_{fis}(t) = G_c \Delta a$$

$$G = - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathcal{E}(t + \Delta t) - \mathcal{E}(t)}{a(t + \Delta t) - a(t)} \leq G_c$$

- Bilan sur l'énergie restituée après plasticité (extension)
- Même philosophie pour G_P (fragile), G_{TP} (ductile) et G_{FR} (ductile ; S. Marie)

Interrogations

- Caractère non nul de G (cf. paradoxe de Rice)
- Prise en compte des grandes déformations
- Spécificité ductile vs. fragile
- Méthodologie de calcul

RÉGULARISATION PAR UNE ENTAILLE

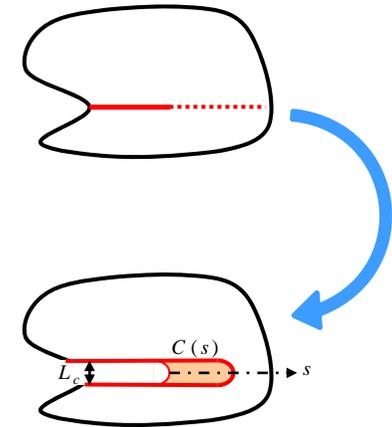
Stabilité des calculs via la propagation d'une entaille

- Champs réguliers → Disparition des singularités
- Intégrales de domaine → Calcul « classique »

Formulation en termes d'endommagement

$$\mathcal{E}(t) = \int_{\Omega} \left[\chi \Phi_{\text{el}}(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^p) + \chi \Phi_{\text{bl}}(\alpha) + \chi \int_0^t \Psi(\dot{\alpha}) dt \right] d\Omega \quad \chi \in \{0,1\}$$

- Choix des termes pondérés : autant de formulations différentes...



Difficultés pressenties

- Les limites par rapport à L_c et Δa ne commutent pas → **Modèles distincts**
- **Caractère universel d'une entaille ?**
- Extension aux grandes déformations

CRITÈRES ÉNERGÉTIQUES : PERSPECTIVES

Points positifs

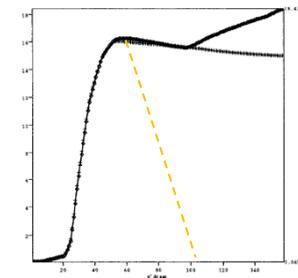
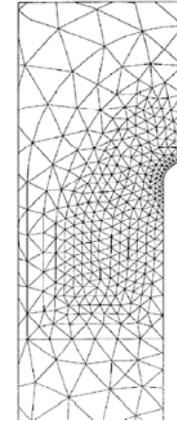
- Cohérence avec le cas élastique
- Qualitativement satisfaisant en présence de décharges

Limitations

- Validation expérimentale limitée
- Energie de surface de type rupture fragile (Griffith)
- **Modélisation par une entaille** (forme, rayon, ...)

Axes de recherche potentiels

- Relation entaille \Leftrightarrow émoussement
 - Paramètres de l'entaille liés à l'émoussement
 - *Modélisation par une fissure en grandes déformations*
- Spécificité de la rupture ductile
 - *Domaine d'élasticité fonction de la trace des contraintes*
 - *Energie de surface fonction de l'état mécanique (triaxialité, plasticité)*



Étude d'un défaut sous le revêtement de la cuve



4 – AXES DE RECHERCHE



MODÈLES COHÉSIFS : PERSPECTIVES

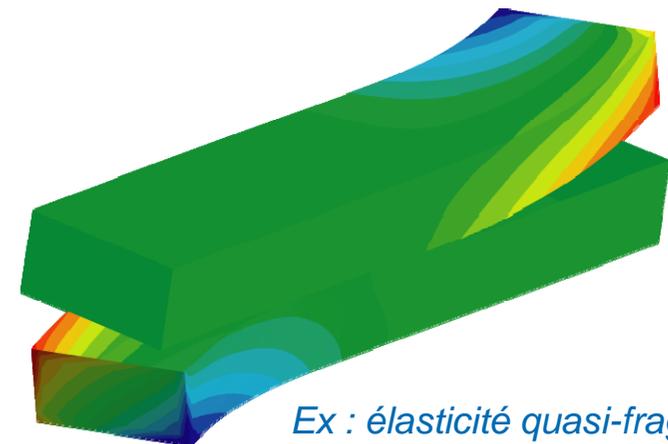
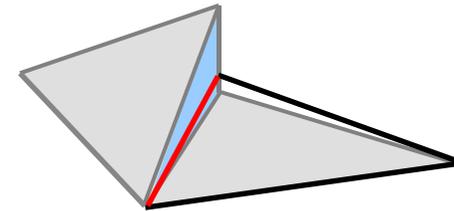
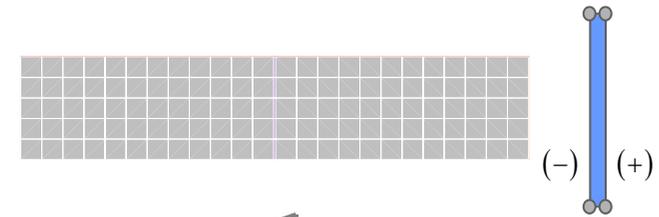
Cadre numérique

- Eléments finis d'interface
- Simulations non linéaires 3D
- Retour d'expérience en quasi-fragile

Interrogations

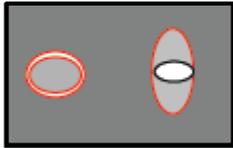
- Influence de l'état mécanique (triaxialité)
- Interaction avec la plasticité
- Connaissance du trajet a priori en ductile
- Choix de la forme de la loi cohésive
- Modes mixtes
- Grandes déformations

Thèse (Marigo, LMS)



Ex : élasticité quasi-fragile

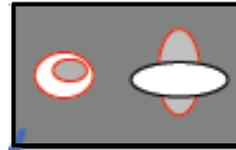
LOI D'ENDOMMAGEMENT DE ROUSSELIER



GERMINATION

$$f(0) = f_0$$

Modèle très simpliste



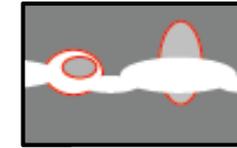
CROISSANCE

$$\dot{f} = 3(1-f)D_m^p$$

$$F_{VM}(\tau, p) + \sigma_1 D f \exp\left(\frac{\tau_m}{\sigma_1}\right) \leq 0$$



- **Grandes déformations**
- **Trace des contraintes**
- **Effet de la porosité**
- **Viscoplasticité**



COALESCENCE

$$\text{Si } f \geq f_c$$
$$\dot{f} = 3A(1-f)D_m^p$$

Modèle très simpliste

POINTS DE VIGILANCE

Discrétisations espace et temps

- Blocage par incompressibilité plastique
- Sensibilité à l'intégration temporelle

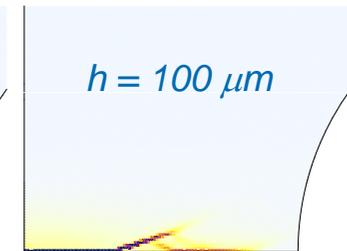
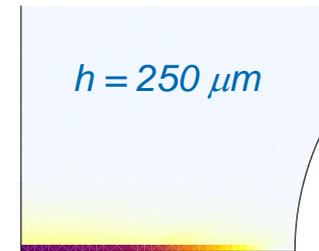
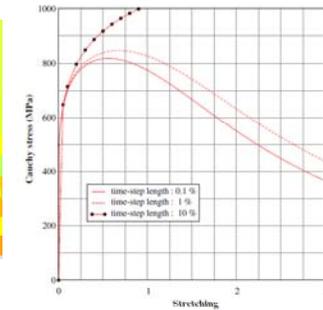
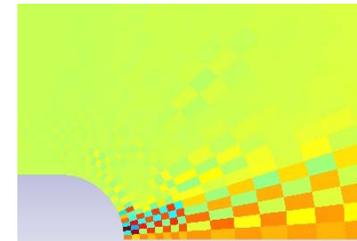
Localisation des déformations

- Dépendance au maillage
- Formulations non locales
 - *Choix de la formulation et des variables*
 - *Identification*

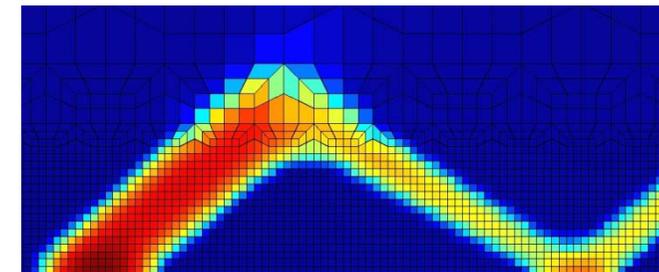
Déchirure

- Lien endommagement \leftrightarrow fissuration
- Propagation et remaillage
- Instabilités (physiques ?)

Thèse (Besson, CdM)

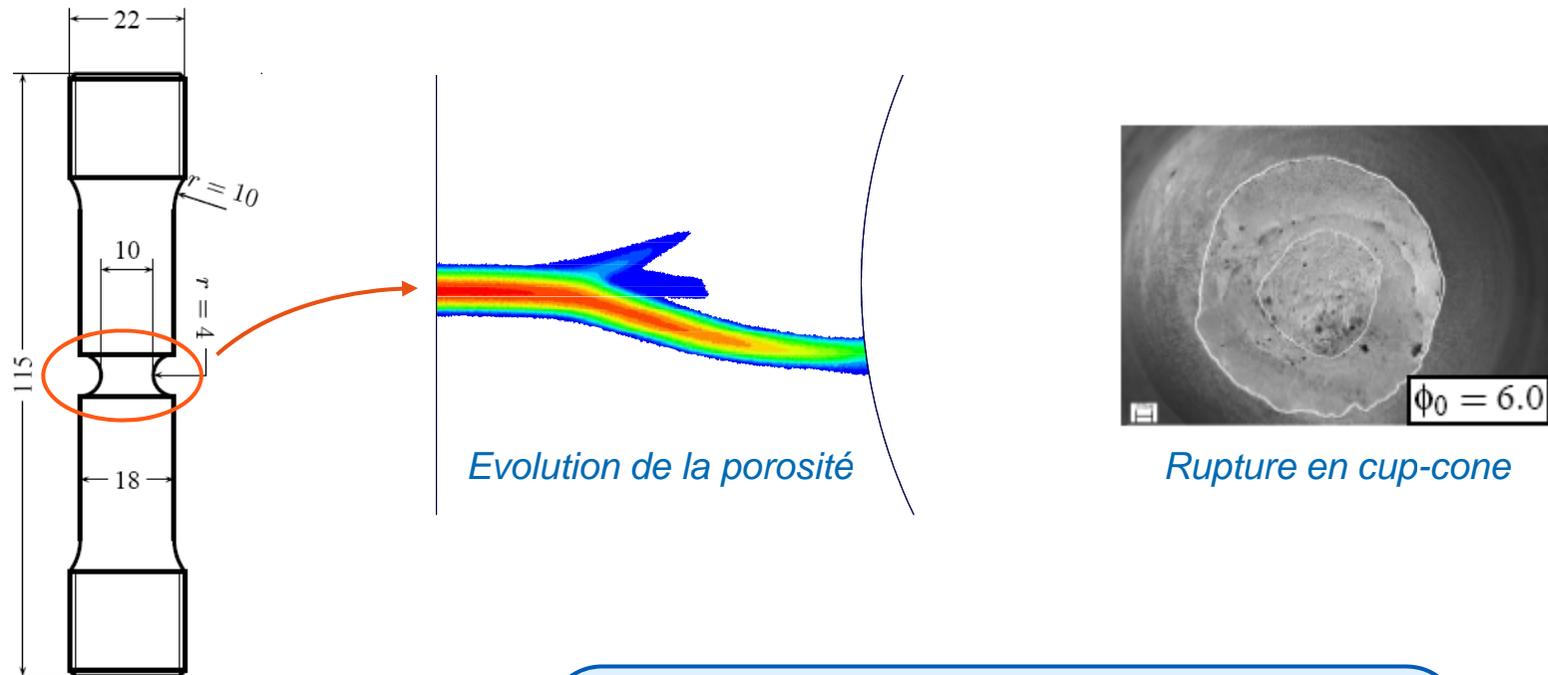


Thèse (Feyel, ONERA)



Éprouvette CT

QUELQUES RÉSULTATS PROMETTEURS



Problématique des performances

- Finesse de la discrétisation en temps
- Finesse de la discrétisation spatiale
- Richesse des éléments finis

CONCLUSION

