

Cast3M et la mécanique de la rupture

Objectifs de la présentation :

- Présentation, discussion des particularités liées à la mécanique de la rupture, ses besoins et ses difficultés spécifiques
- Présentation d'exemples concrets

Quels objectifs généraux pour ces calculs ?

L'objectif principal est en général de déterminer les conditions d'amorçage ou de propagation des fissures :

- Pour prévoir les chargements, les conditions pouvant conduire à un amorçage de fissure (règles et critères de dimensionnement)
- Pour comprendre les conditions d'amorçage (interprétations d'essais).
- Pour estimer les vitesses de propagation, analyser leur stabilité

Deux approches du problème

L'approche globale :

- L'approche globale s'appuie sur des paramètres énergétiques globaux pour définir ses critères (K_I , ΔK_I , J , C^* ...)
- Ces paramètres sont des scalaires représentant à eux seuls le chargement imposé à la pointe de la fissure (intensité des contraintes ou taux de dissipation de l'énergie)

Son principal avantage est sa relative simplicité d'application au travers de calculs aux éléments finis ou de méthodes analytiques – Bien entendu, qui dit simplicité, dit aussi approximation et quelques fois manque de pertinence

L'approche locale :

- Au contraire de l'approche globale, l'approche locale cherche à modéliser le comportement du matériau en pointe de fissure
- L'objectif est de déterminer l'endommagement en pointe de fissure pour déterminer les conditions d'amorçage et de propagation de la fissure

Du fait de la présence de la fissure et de la singularité de contraintes qui en découle, l'exercice est difficile – Par contre, l'approche modélise le comportement réel du matériau et est a priori plus prêt de la « réalité physique »

Besoins particuliers pour ces deux approches

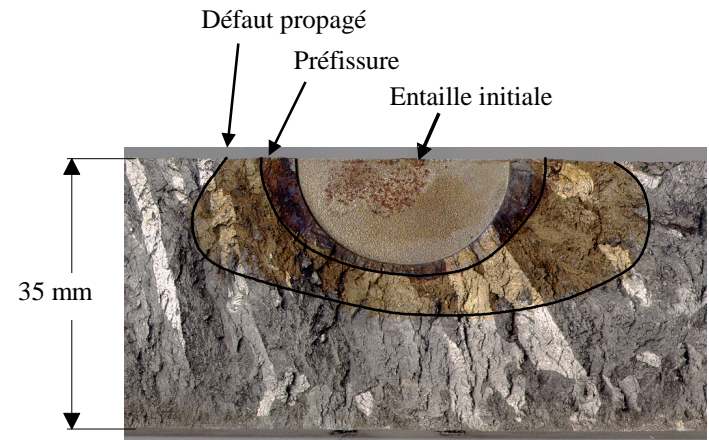
- Maillages fins en pointe de fissure décrivant le front de fissure et permettant de calculer convenablement la concentration de contraintes et déformations
- Modèles de comportement adaptés (éventuellement couplés à un calcul de l'endommagement du matériau)

En particulier pour l'approche globale :

- Maillage rayonnant
- Faces perpendiculaires au front de fissure)

En particulier pour l'approche locale :

- Éléments de petite taille pour décrire de façon suffisamment fine les contraintes
- Éléments à taille imposée (50 μm par exemple)
- Type d'éléments imposé



Des recommandations de calcul pas toujours simples à suivre pour des fissures réelles et conduisant à des modèles très volumineux

Conséquences sur la modélisation

Sur la description du domaine :

- Les fissures sont souvent trop complexes pour être parfaitement reproduites (il faut avoir recours à des approximations)
- Le choix du type d'éléments et de leur taille est fondamental (linéaires, quadratiques...)

Sur la modélisation du comportement des matériaux :

- Les sollicitations en pointes de fissures sont très importantes (en dehors du calage des lois de comportement)
- Les fissures apparaissent toujours dans des zones où les sollicitations sont complexes (fatigue, fluage, plasticité élevée, endommagement...)

Sur la modélisation de la propagation :

- L'avancée de fissure conduit à de très fortes non linéarités (problèmes de convergence dans les algorithmes)
- Du fait de la discrétisation, la modélisation de l'avancée de fissure est nécessairement discrète et plus ou moins liée à la taille des éléments

La propagation des fissures reste encore un domaine très difficile à aborder par la simulation numérique

Conséquences sur la modélisation

Sur la réalisation des maillages :

Les outils automatiques sont bien souvent incapables de réaliser les maillages

- Parce qu'il y a incompatibilité entre les dimensions de la structure et la finesse nécessaire au maillage de la fissure
- Parce que l'approche locale ou l'approche globale demandent des spécificités de maillage difficiles à prendre en compte

Le calculateur doit donc avoir recours au développement de ses propres outils. Ce développement peut s'avérer difficile, d'autant plus si l'on cherche à construire une procédure paramétrique

Les difficultés de maillage ont été et sont encore un frein à l'analyse numérique en mécanique de la rupture

Beaucoup de critères mis au point à l'aide de modèles 2D sont aujourd'hui rediscutés dans le cadre de modélisation 3D

Utilisation de l'outil numérique dans le labo

Le laboratoire a développé une approche couplée Essais / Calculs :

- Développement de paramètres pertinents en mécanique de la rupture
- Développement d'outils analytiques et critères associés
- Développement / Validation de critères

Cast3M constitue un outil de recherche privilégié pour le laboratoire : souplesse d'utilisation, développement d'outils spécifiques, intégrations de critères et lois...

Quelques exemples : amorçage des fissures dans les piquages

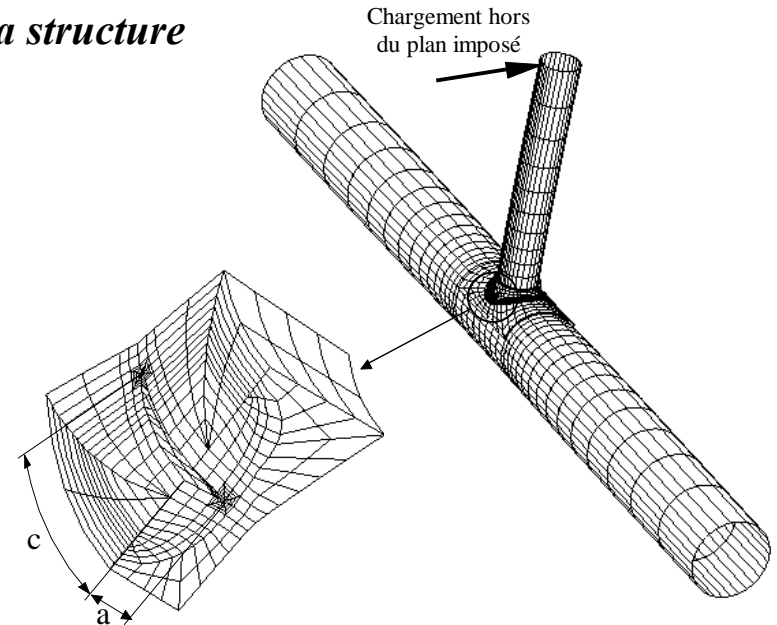
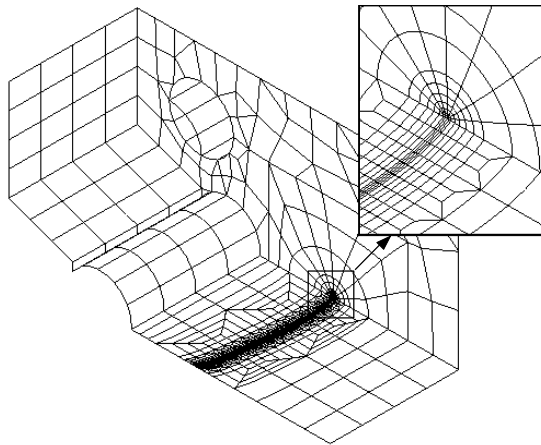
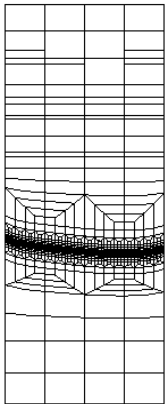
Problématique : Peut-on utiliser le critère $J < J_{IC}$ pour prédire l'amorçage ductile d'une fissure dans un piquage ?

Approche :

- Réalisation d'essais sur éprouvettes et structures
- Interprétation numérique – Évaluation de la validité du critère

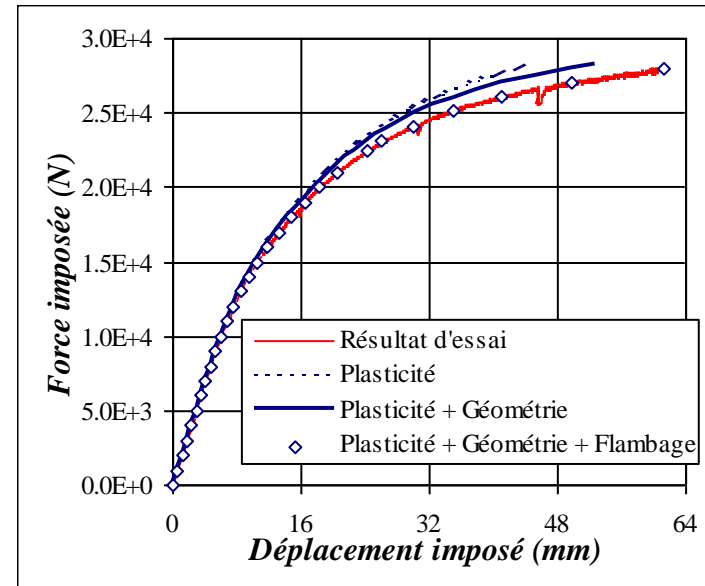
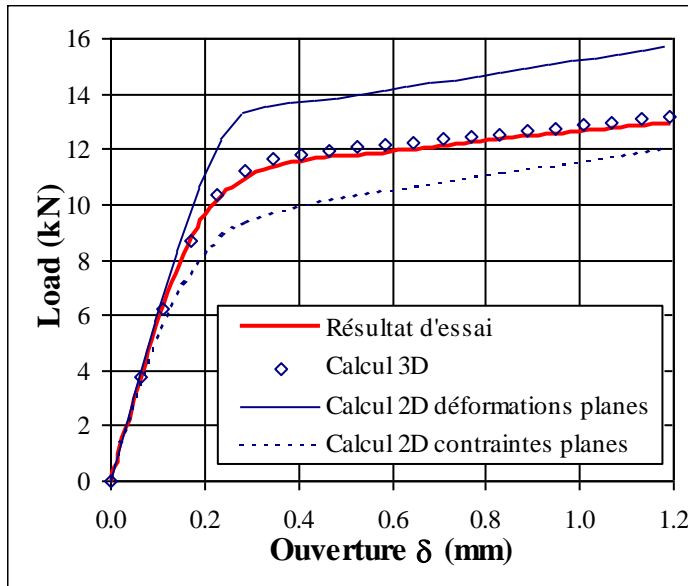
Deux types de modèles : l'éprouvette CT et la structure

Modélisation du front réel



Quelques exemples : amorçage des fissures dans les piquages

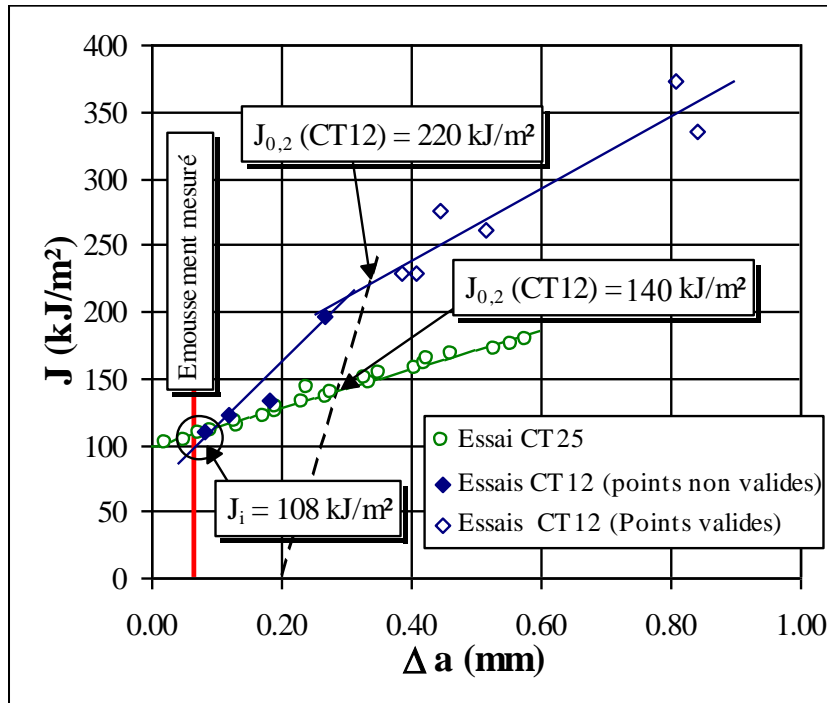
Première étape : Validation des modèles par comparaison Essais / Calculs



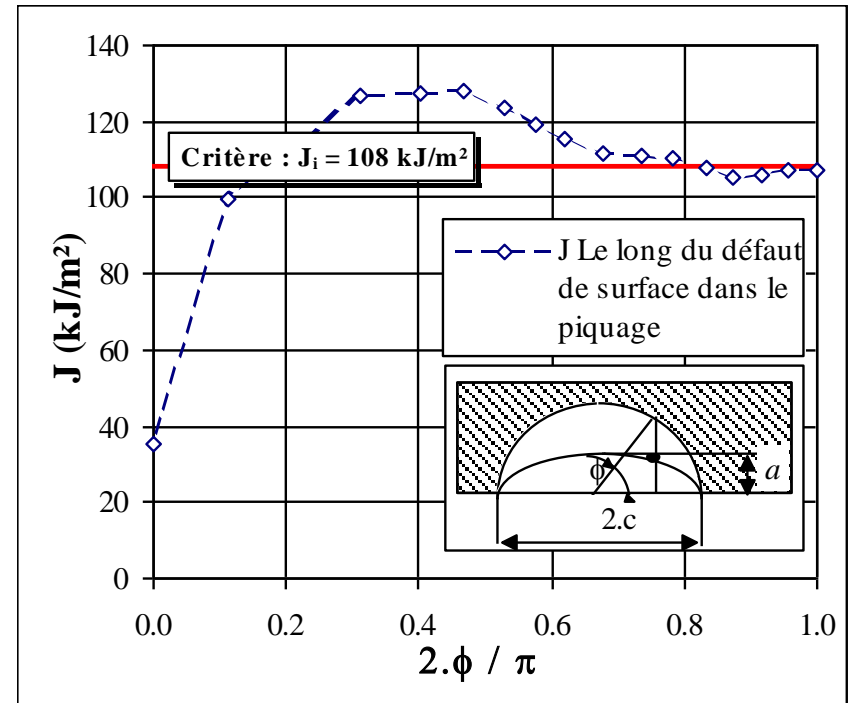
Quelques exemples : amorçage des fissures dans les piquages

Seconde étape : Validation du critère – recommandations

Définition précise du critère sur éprouvette CT



Application au piquage



Quelques exemples : propagation des fissures en fatigue thermique

Problématique :

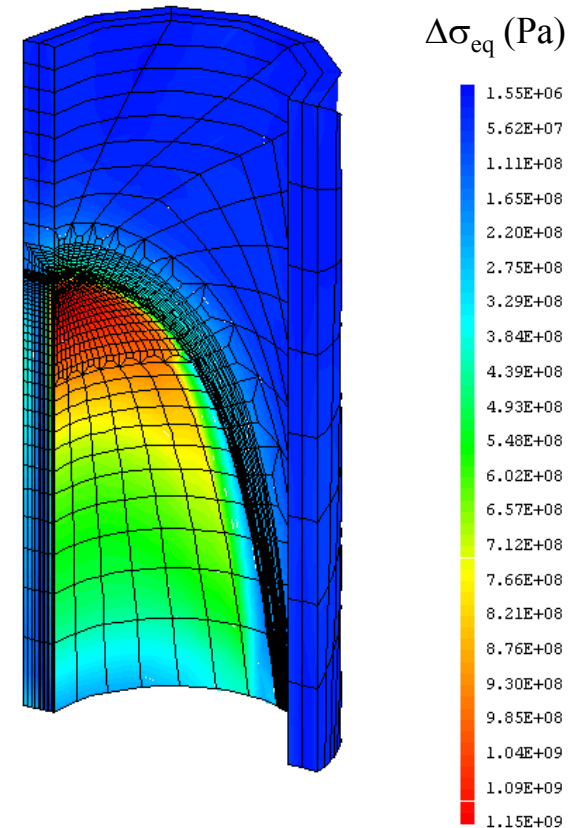
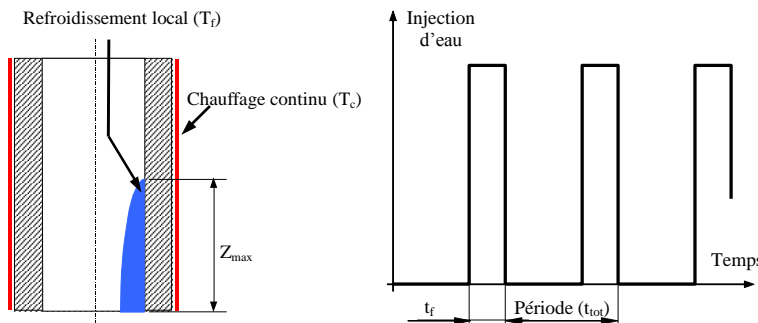
- Peut-on obtenir une fissuration profonde sous sollicitation thermique cyclique ?
- Peut-on l'estimer à l'aide de la loi de Paris du matériau $da/dN = C.\Delta K^n$?

Approche :

- Développement d'un nouvel essai démonstratif
- Interprétation par le calcul – Validation ou non du critère

Difficulté :

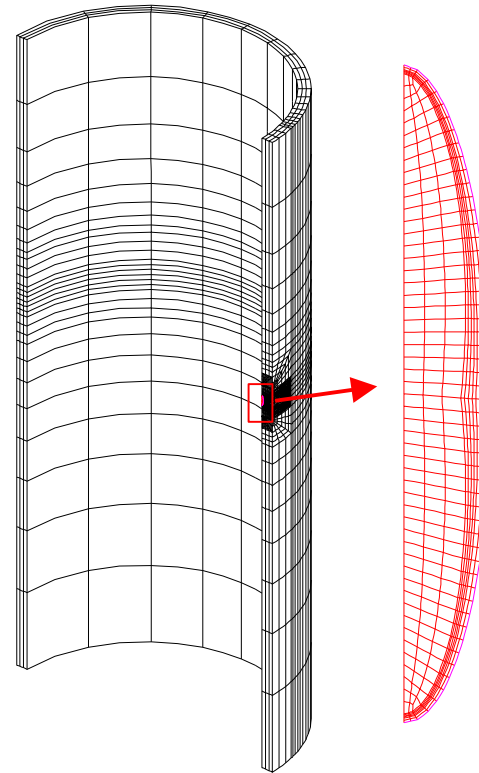
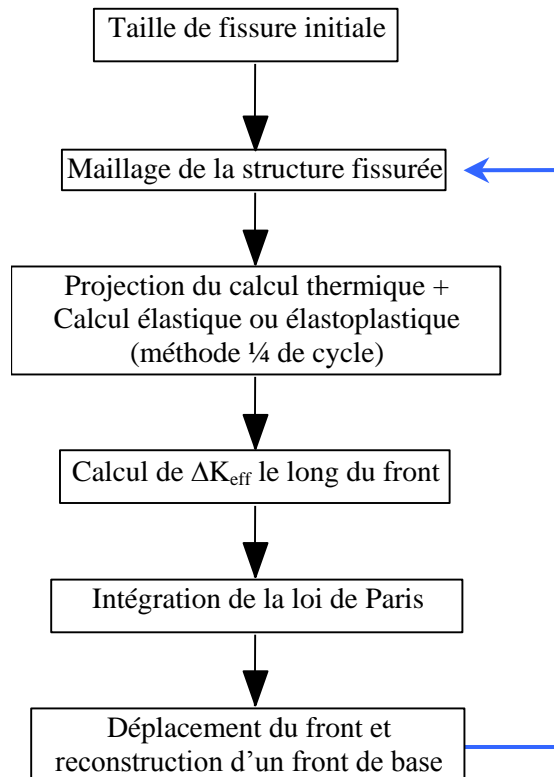
- Dans le cas d'essais thermiques, le chargement mécanique imposé n'est pas directement mesuré : il faut avoir recours à la modélisation thermique pour le déterminer
- Ce calcul passe par une étape préalable de calage numérique qui peut s'avérer fastidieuse



Quelques exemples : propagation des fissures en fatigue thermique

Développements de modèles :

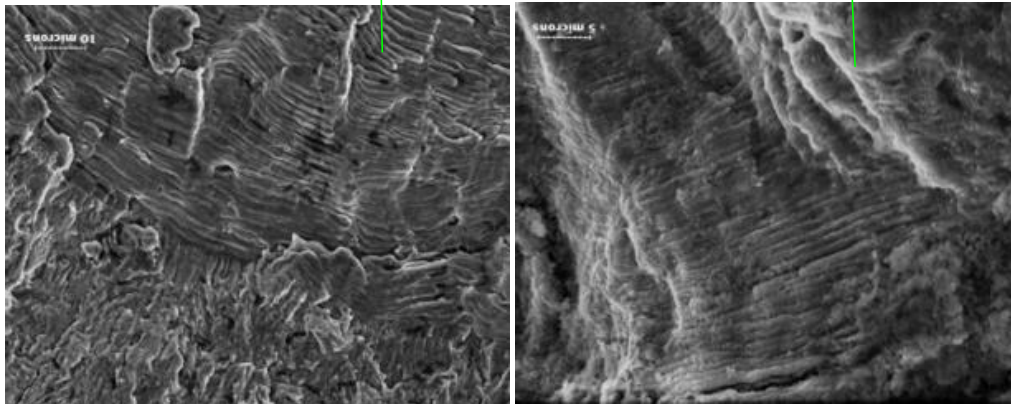
- Pour reproduire au mieux les évolutions de températures observées au cours des essais
- Pour modéliser la propagation d'une fissure



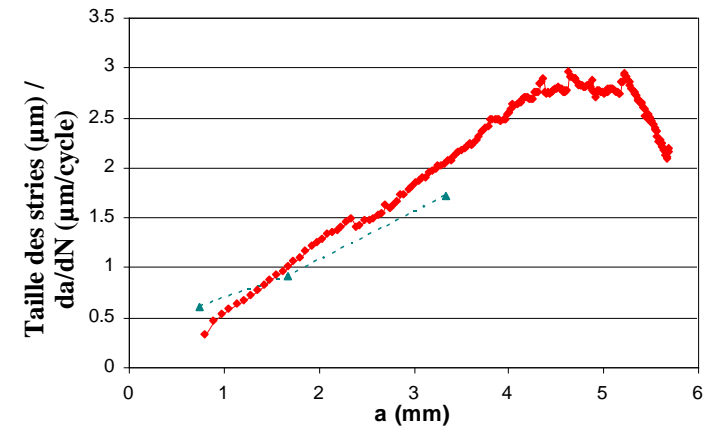
Quelques exemples : propagation des fissures en fatigue thermique

Validation du critère de propagation :

Observation des faciès de rupture



Comparaison Essais / Calculs



Quelques exemples : Développement de formulaires

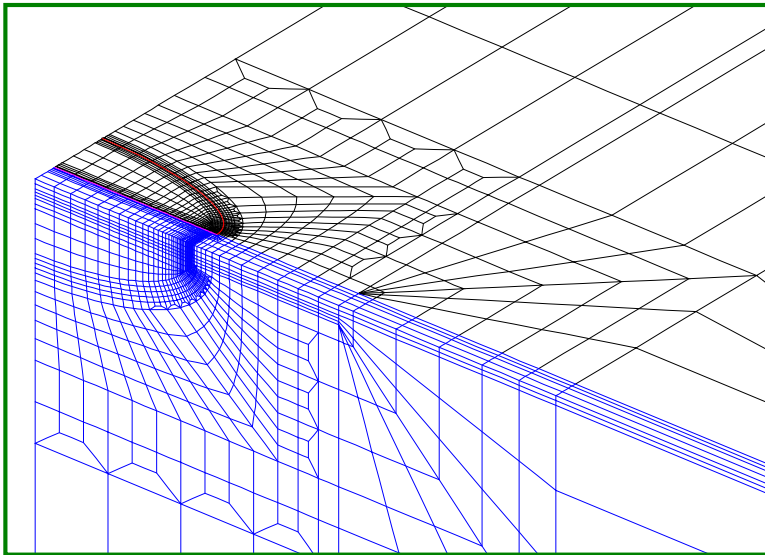
Problématique :

- Définition de formulaires pour le calcul de K_I des défauts dans les structures épaisses revêtues (outils pour l'analyse de nocivité des défauts)
- Formulation compatible avec le cas du choc thermique pressurisé calculé par un modèle 2D

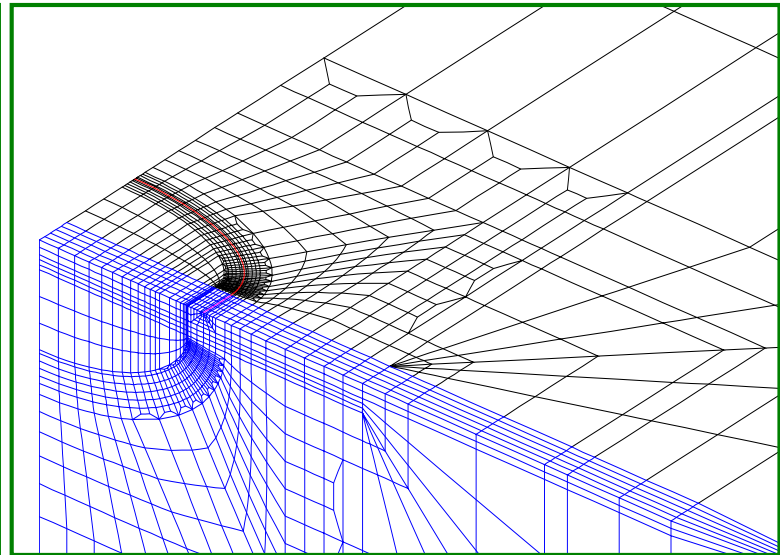
Difficulté : Problème 3D important, à généraliser pour le rendre adimensionnel

Approche : Développement d'un outil de maillage automatique – Réalisation d'une grille de calculs

Défaut sous revêtement



Défaut travers revêtement



Quelques exemples : Développement de formulaires

Proposition d'une formulation :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 K_I = \left(\sigma_0 i_0 + \sigma_{0r} i_{0r} + \sigma_1 i_1 + \sigma_{1r} i_{1r} \right) \left(\frac{a+r}{h+r} \right) \sqrt{\pi(a+r)} \quad \text{for the through clad surface crack} \\
 K_I = \left(\sigma_0 i_0 + \sigma_1 i_1 \right) \left(\frac{a+r}{h+r} \right) \sqrt{\pi a} \quad \text{for the subclad flaw}
 \end{array} \right.$$

Fonctions d'influence déterminées par le calcul et tabulées dans le code, fonctions de la taille relative et la géométrie du défaut

Contraintes nominales, déterminée sur le structure sans défaut (modèle 2D axisymétrique)

Conclusions

La modélisation en mécanique de la rupture reste difficile :

- Du fait de la présence d'une singularité, de la finesse de maillage requise ou des modèles de comportement matériau poussés à leurs limites
- Du fait des fortes non-linéarités induites par la propagation des fissures

Elle est pourtant indispensable pour avancer dans la compréhension des mécanismes de rupture, le développement d'outils et critères :

- Pour la détermination des paramètres critiques à l'amorçage ou en cours de propagation
- Pour le développements des outils et critères associés

Le laboratoire SEMT/LISN a développé une approche couplée Essais / Calculs pour progresser dans le comportement des fissures

Pour nous, Les développements à court terme c'est :

- Les éléments de type XFEM pour le modélisation non explicite des fissures
- Les outils pour la modélisation de la propagation dynamique des fissures