

Règles de dimensionnement et estimation de nocivité de fissures dans le secteur de l'énergie

S. Chapuliot
Expert Framatome
FRANCE

Contenu de la présentation



- ▶ **Pourquoi de la mécanique de la rupture ?**
 - ◆ Au stade du dimensionnement
 - ◆ Pendant le suivi en service
- ▶ **Les besoins (matériaux, dommages redoutés)**
- ▶ **L'approche globale de la rupture**
 - ◆ Le facteur d'intensité des contraintes
 - ◆ Le paramètre J et la contrainte de référence
 - ◆ Marges et critères
- ▶ **La R&D en cours**
- ▶ **Synthèse**



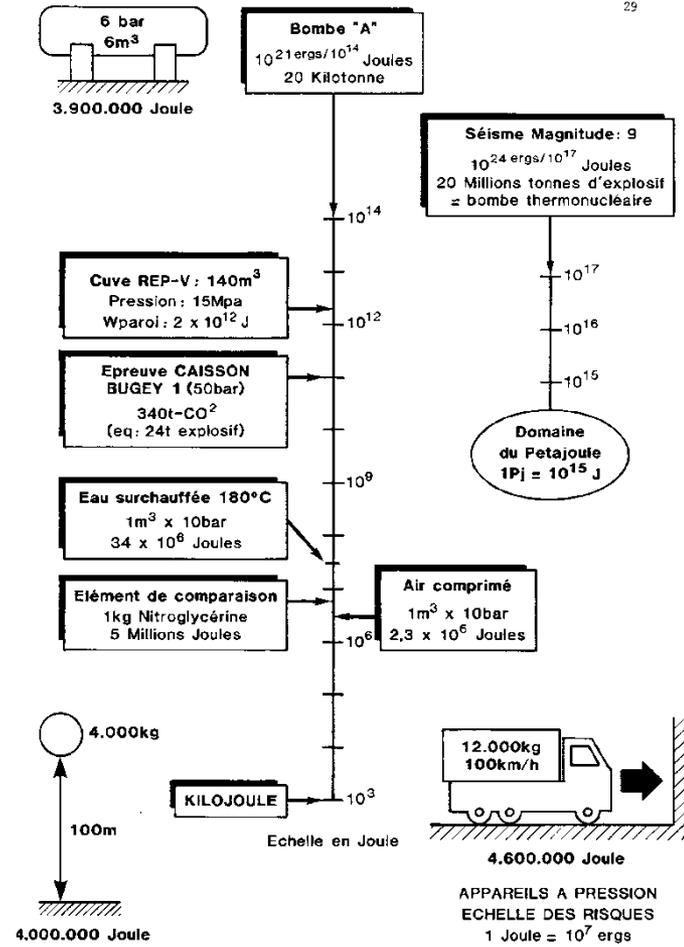
Pourquoi de la mécanique de la rupture ?

Pourquoi de la mécanique de la rupture

► Pourquoi de la mécanique de la rupture ?

↳ Au stade du dimensionnement

- ◆ Appareils à pression avec une forte puissance installée
- ◆ Des systèmes mécano-soudés complexes avec un grand nombre de situations de chargement
- ◆ Des exigences de sûreté/sécurité de plus en plus élevées
- ◆ Dans le domaine nucléaire, des risques écologiques très importants et un environnement médiatique hostile
- ◆ Une histoire industrielle émaillée d'accidents catastrophiques
 - USA (1865): La chaudière du bateau Sultana explose: 1450 morts
 - USA (1895-1904): 3612 explosions de chaudières (1 par jour) tuant environ 7000 personnes
 - Massachusetts (1905): Destruction de l'usine R.B. Grove Shoe: 58 morts, 117 blessés, 500 000 dollars de pertes (slide suivante)



Pourquoi de la mécanique de la rupture

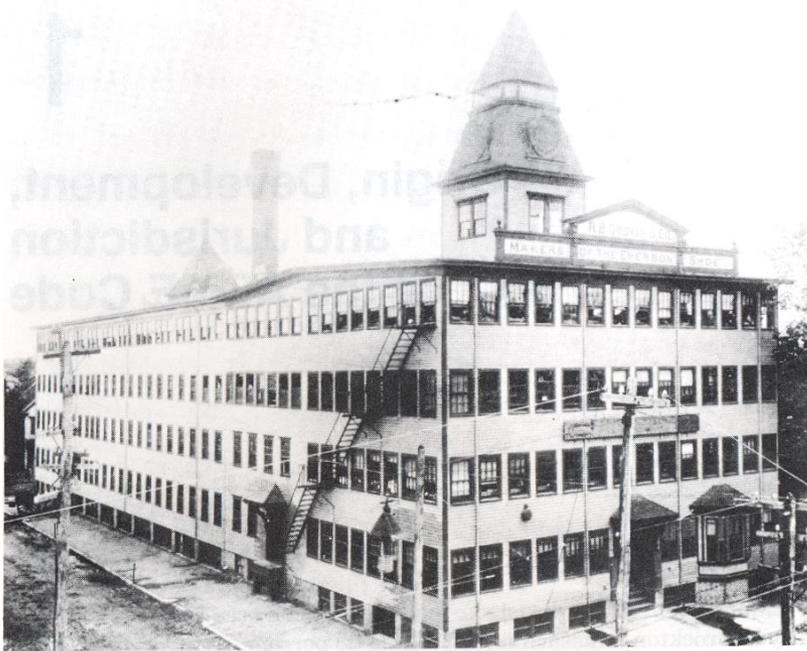
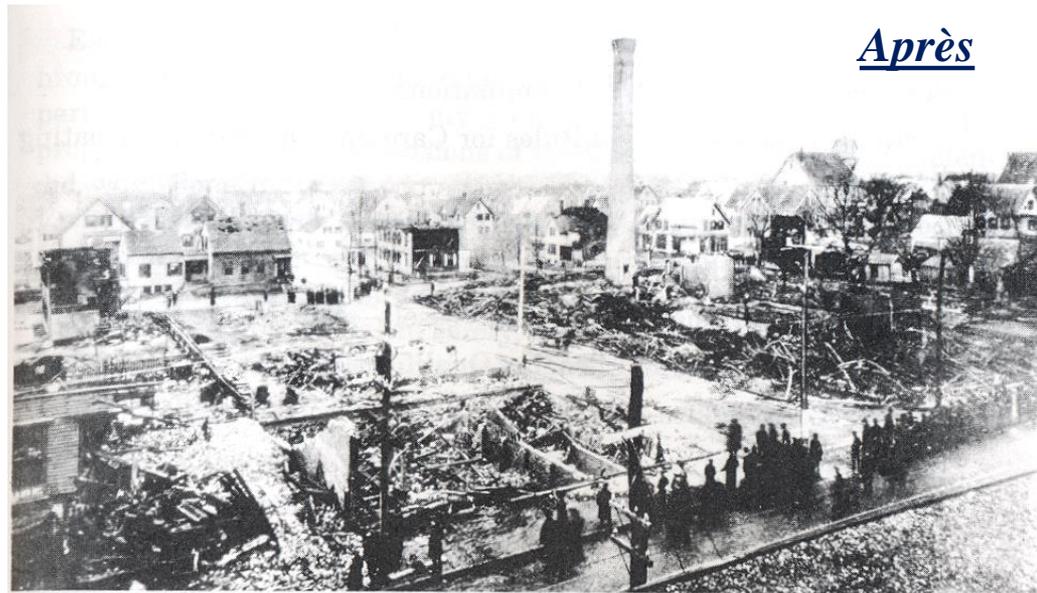


Figure 1.1 The Brockton, Massachusetts, shoe factory. (Courtesy of The Hartford Steam Boiler Inspection and Insurance Company.)

Avant

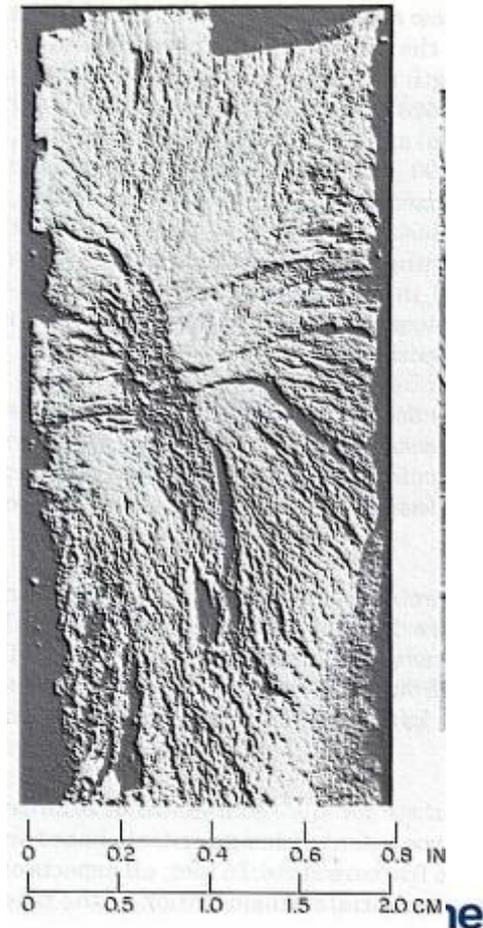
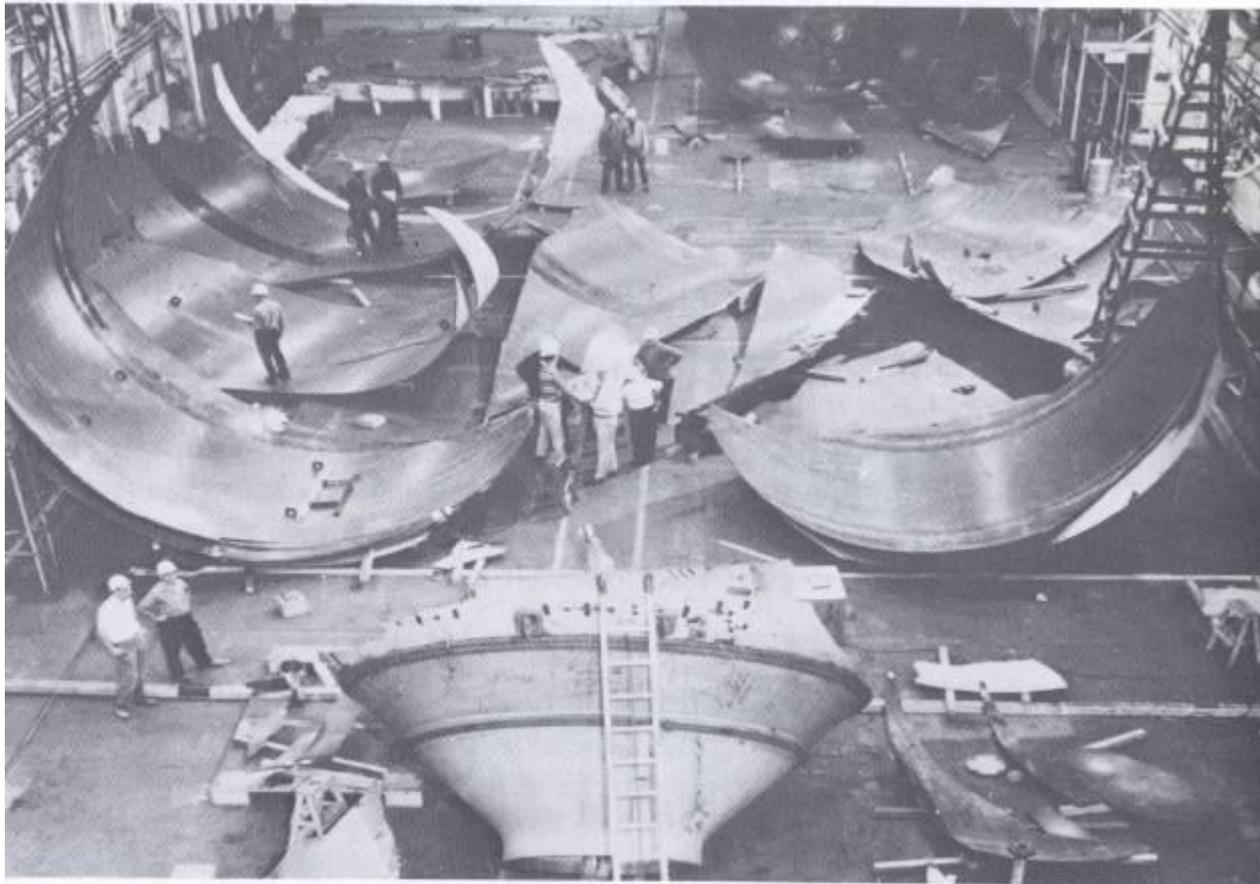


Après

Figure 1.2 Shoe factory after the boiler explosion of March 20, 1905, which led to the adoption of many state boiler codes and the ASME Boiler and Pressure Vessel Code. (Courtesy of The Hartford Steam Boiler Inspection and Insurance Company.)

Pourquoi de la mécanique de la rupture

Des conséquences désastreuses dont l'origine peut être de très petite taille



Pourquoi de la mécanique de la rupture

► Pourquoi de la mécanique de la rupture ?

↳ Au stade du dimensionnement

- ◆ Le risque redouté est le risque d'instabilité d'un défaut potentiel dans la structure
 - Incapacité de la structure à supporter le chargement imposé (notamment la pression) du fait de la présence d'un défaut
 - Rupture souvent explosive (du fait de l'énergie stockée)
- ◆ Mécanisme de la rupture car pour ce dommage la ruine est atteinte par un mécanisme de fissuration

► Plusieurs mesures pour limiter le risque

- ◆ Choix de matériaux suffisamment ductiles et tenaces pour l'emploi envisagé
- ◆ Qualité et suivi de la qualité de fabrication
- ◆ Contrôles de fabrication dans les zones à risque vis-à-vis de la présence d'un défaut (soudures, pièces moulées)

► Donc en théorie pas de défaut au stade de la fabrication

- ◆ Analyse réalisées avec défaut postulé (défaut conventionnel de grande taille) dans les zones les plus sollicitées
- ◆ Démonstration de l'absence de risque de rupture brutale dans toutes les situations de chargements potentiels

→ notion de défense en profondeur

Pourquoi de la mécanique de la rupture

▶ Pourquoi de la mécanique de la rupture ?

↳ Pendant le suivi en service

- ◆ Un grand nombre de zones (ex. des soudures) font l'objet de Contrôles Non Destructifs
- ◆ Dans ce cadre, possibilités de détecter des défauts
 - Défauts apparus en service (fatigue, corrosion, fluage...)
 - Défauts de fabrication non détectés précédemment (changement de protocole de contrôle, amélioration des procédés...)

▶ Dans un cas comme celui-là, la mécanique de la rupture est un des outils d'aide à la décision

- ◆ Quelle est la nocivité (le risque) associé à la présence du défaut détecté ?
- ◆ Peut-on, doit-on réparer ou remplacer ? A quelle échéance ?
- ◆ Si non remplacement, comment le défaut va-t-il évoluer ?
- ◆ A nouveau, si décision de ne pas réparer (dans l'immédiat ou définitivement), démonstration de l'absence de risque de rupture brutale dans toutes les situations de chargements potentiels

▶ Très forte pression car enjeux industriels importants

- ◆ Réponse rapide → besoin de solutions simples, robustes et rapides



Les besoins en termes de matériaux et dommages redoutés

Les besoins

Composants, matériaux, dommages redoutés

▶ Le risque redouté est le risque d'instabilité d'un défaut de type fissure dans la structure

◆ On parle de risque de rupture brutale

▶ Dans les aciers de nos composants, deux mécanismes de rupture

◆ La rupture fragile et la rupture ductile

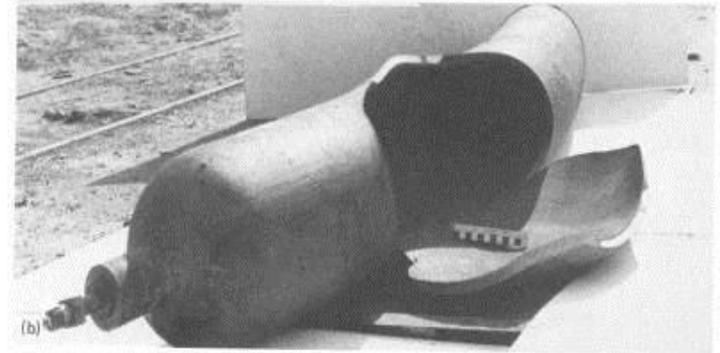
◆ Attention, on ne peut cependant pas dire:

*Matériau ductile ⇔ propagation stable
ou : Matériau fragile ⇔ propagation instable,*

Même si c'est vrai que la ductilité favorise la stabilité et la fragilité favorise l'instabilité !



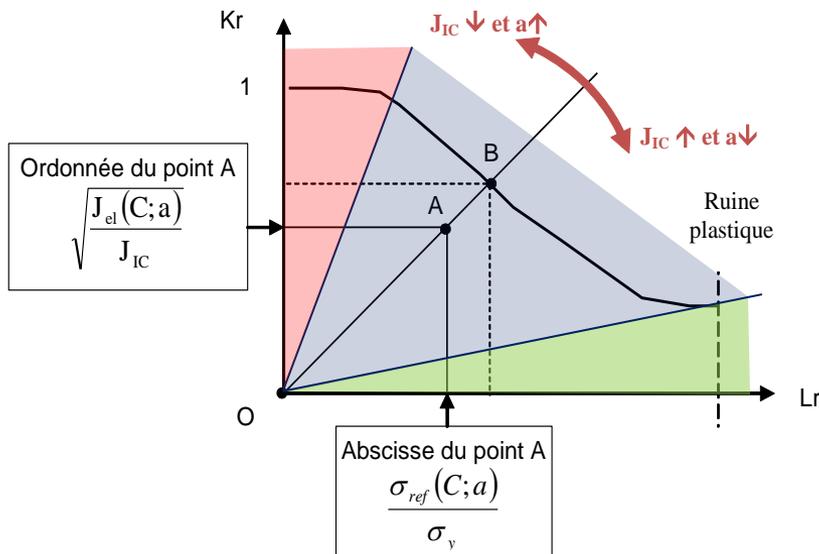
*Les deux mécanismes de ruine sont à étudier,
notamment vis-à-vis du risque pression qui est par
nature instable*



Les besoins

Composants, matériaux, dommages redoutés

- ▶ **Toujours pour les aciers de construction de nos composants, la rupture brutale est très souvent en compétition avec la ruine plastique**
 - ◆ Fort effet d'échelle du fait que le terme de chargement dépend de la taille de fissure (J est exprimé en kJ/m² ou N.mm)
 - ◆ Même en présence d'une fissure, **une pièce mince ruinera forcément par ruine plastique**
 - ◆ En présence d'une fissure de grande taille, **le mode de ruine d'une structure épaisse est la rupture brutale**



Evidemment, la notion de mince ou épais dépend du matériau !

Il faut donc développer tout un ensemble d'outils et de critères pour évaluer le risque de façon sûre et pertinente pour des structures complexes de grande taille

↳ Essais à l'échelle 1 quasi-impossibles à réalisés

Les besoins

Composants, matériaux, dommages redoutés

- ▶ Les critères utilisés aujourd'hui pour les structures sont essentiellement des critères d'approche globale, sous la forme:

$$J(\text{Chargement}) \leq J_{IC}(T) \text{ ou } K_J(\text{Chargement}) \leq K_{IC}(T)$$

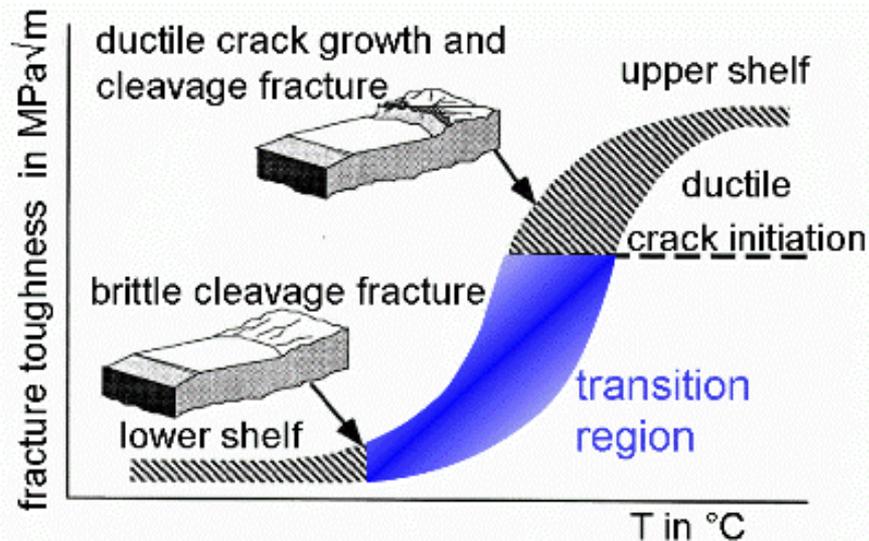
- ◆ Raisons historiques et de simplicité de mise en œuvre (très grand nombre de configurations à justifier)
 - ◆ Des critères plus sophistiqués comme l'approche locale peuvent être utilisés, mais plus dans un cadre d'expertise ou de justifications théoriques
-
- ▶ Dans un tel schéma de critère, deux ingrédients majeurs
 - ◆ La ténacité du matériau J_{IC} ou K_{IC} (domaines fragile et ductile)
 - ◆ La donnée de chargement J ou K_J

Les besoins

Composants, matériaux, dommages redoutés

► La rupture fragile se rencontre pour les aciers ferritiques

- ◆ Pas de clivage pour les microstructures CFC (les aciers inoxydables)
- ◆ Mode de rupture cristallographique (instabilité du matériau), généralement piloté par la contrainte, avec une plasticité faible, très fortement dispersé pour l'acier
- ◆ Pour l'acier ferritique, forte dépendance avec la température – présence d'une transition Fragile / Ductile
- ◆ Tous les gros composants ferritiques sont potentiellement concernés (fortes épaisseurs, chocs thermiques froids)

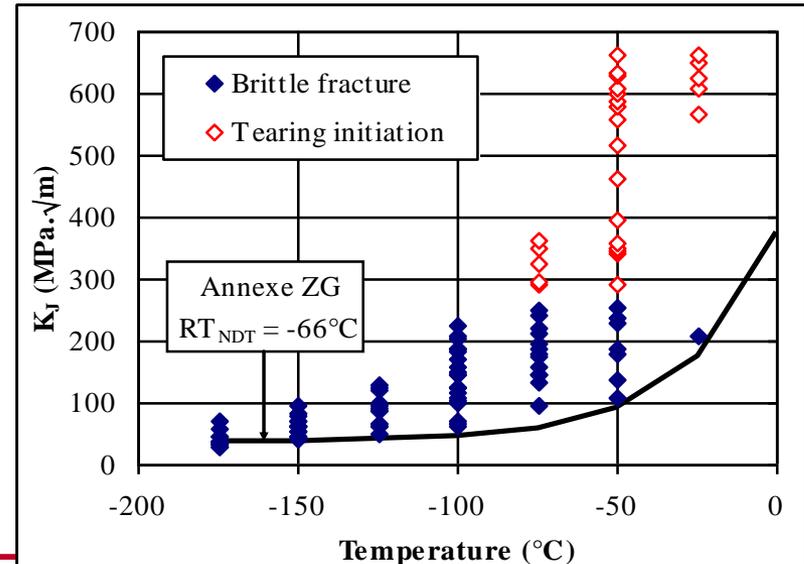
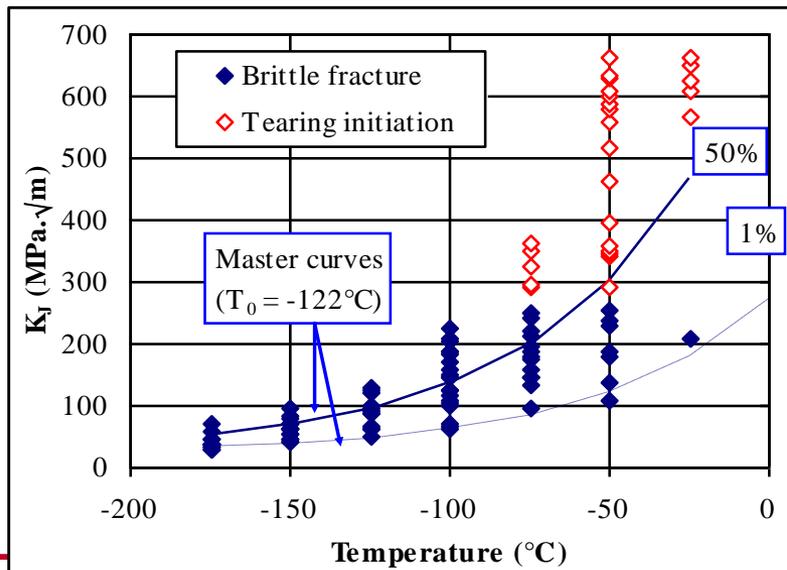


Les besoins

Composants, matériaux, dommages redoutés

► La rupture fragile se caractérise par des résultats très dispersés

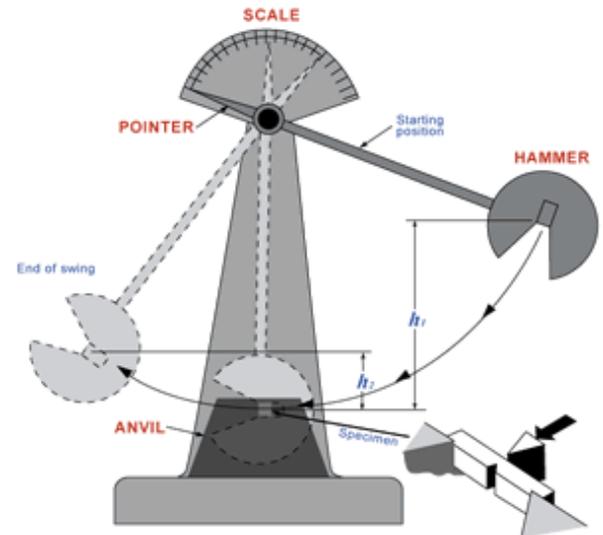
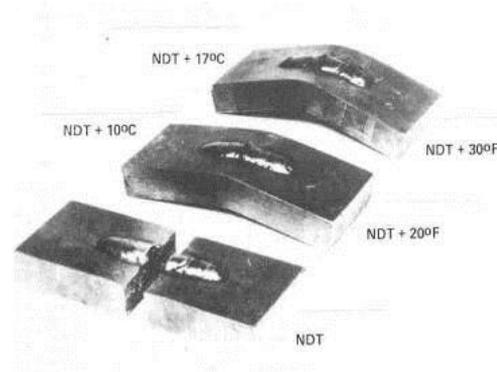
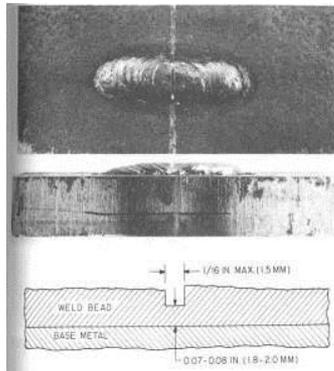
- ◆ Ténacité fortement dépendant de la température, en particulier dans la zone de transition fragile / ductile
- ◆ Le besoin pour l'analyse d'intégrité est la définition d'une enveloppe mini
→ pour nos matériaux, définition de courbes 'enveloppes' ou 'maitresses' pour définir cette donnée
 - Repérage conventionnel de cette transition par une température de référence unique : RT_{NDT} (approche conventionnelle) ou T_0 (master curve)
 - Possibilité offerte par le fait que l'on reste toujours dans la même famille de matériaux
↔ Changer de matériau représente un investissement énorme en termes de caractérisation (et des risques)



Les besoins

Composants, matériaux, dommages redoutés

- ▶ Compte tenu du grand nombre de pièces à caractériser, des essais 'ingénieurs' ont été mis en place pour rapidement caractériser, en recette, cette température de référence
 - ◆ L'essai PELINI : détermination de T_{NDT}
 - ◆ L'essai Charpy
 - ◆ Le tout associé de formules empiriques qui n'ont de sens que pour la famille de matériau concernée

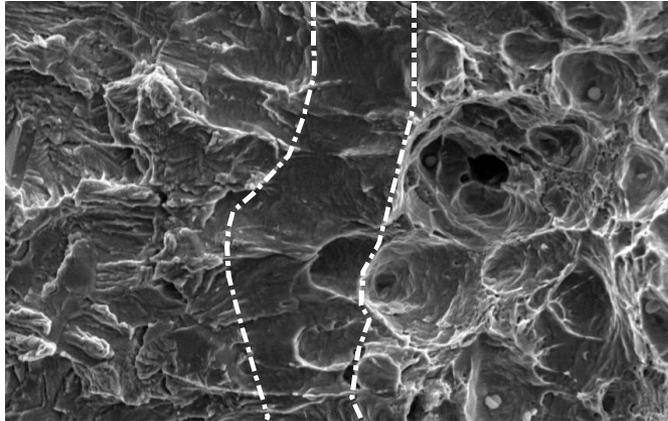


$$RT_{NDT} = \text{Max} [T_{NDT}, T_{CV} - 33^{\circ}\text{C}]$$

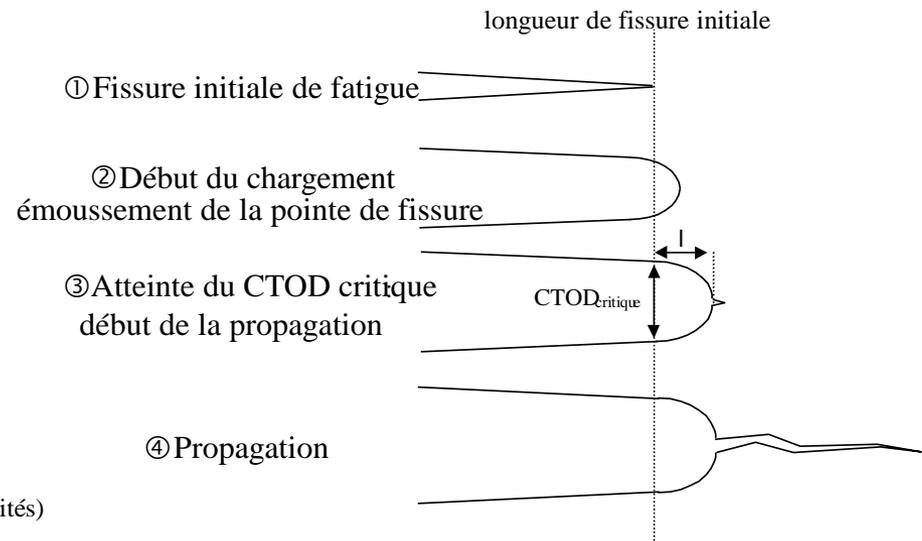
Les besoins

Composants, matériaux, dommages redoutés

- ▶ L'amorçage de la rupture ductile demande en général beaucoup d'énergie (nos matériaux sont sélectionnés pour cela)
 - ◆ Evolution plus régulière de la ténacité → on se contente de caractériser les ténacités à l'ambiante et à chaud (~350°C)
 - ◆ Essais plus complexes (et donc coûteux) pour caractériser l'amorçage et la propagation



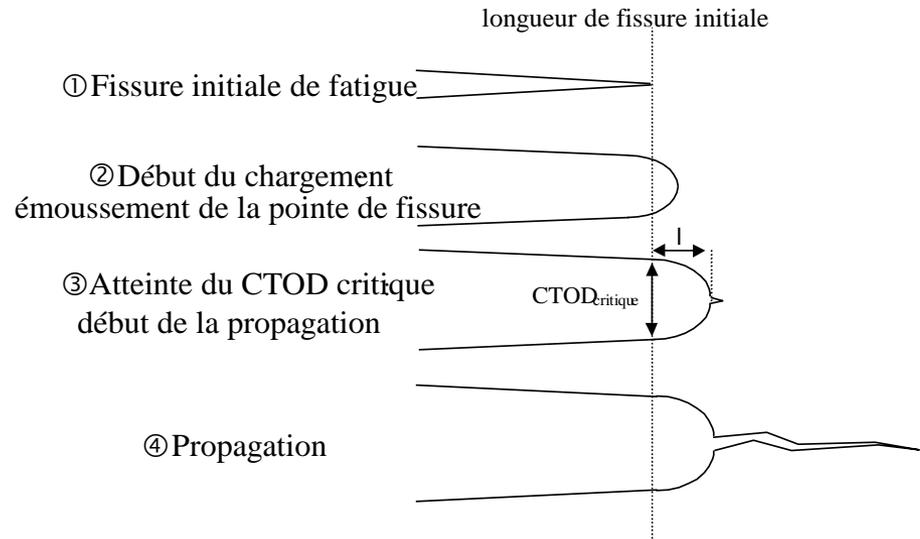
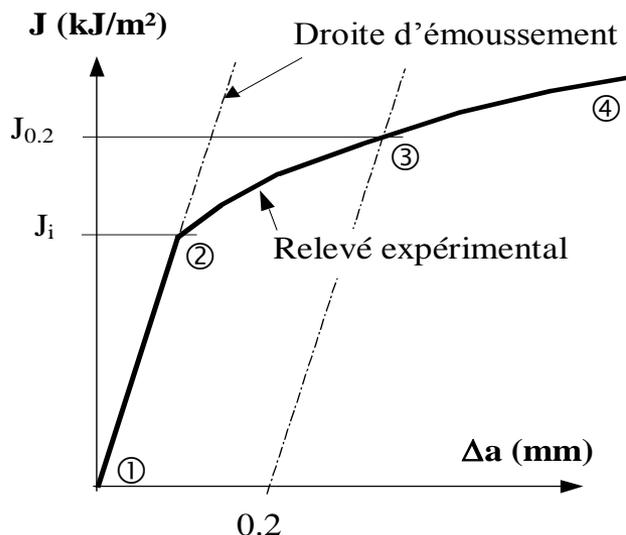
Propagation par fatigue (faciès lisse et strié) Zone d'érousement Déchirure ductile (faciès caractérisé par les cavités)



Les besoins

Composants, matériaux, dommages redoutés

- ▶ L'amorçage de la rupture ductile demande en général beaucoup d'énergie (nos matériaux sont sélectionnés pour cela)
 - ◆ Deux grandeurs à caractériser : la ténacité à l'amorçage J_{IC} et la résistance à la déchirure (courbe $J-\Delta a$ ou autre critère énergétique)
 - ◆ A nouveau, en recette, souvent une simple vérification au travers d'essais Charpy et de corrélations empiriques





L'approche globale de la rupture

L'approche globale de la rupture

Détermination du paramètre de chargement

- ▶ L'approche globale de la rupture est privilégiée car elle peut se décliner sous formes analytique ou semi-analytique
 - ◆ Simplicité de mise en œuvre
 - ◆ Résultats rapides (ex. pour les applications 'suivi en service')

- ▶ Dans le domaine des températures investiguées ici, deux paramètres principaux
 - ◆ Le facteur d'intensité des contraintes
 - ◆ La force fissurante J (équivalente au taux de restitution de l'énergie G)

- ▶ C'est sur la base de ces deux paramètres que sont réalisées la quasi-totalité des analyses de risque de rupture brutale

L'approche globale de la rupture

Le Facteur d'Intensité des Contraintes K

▶ Point de départ des analyses

- ◆ Il caractérise l'intensité de concentration de contraintes élastiques
- ◆ Il constitue le support d'un grand nombre de critères (K_{IC} , fatigue...)

▶ Sa détermination n'est cependant pas triviale

- ◆ Seules quelques configurations idéales présentent une solution exacte (configurations 2D, milieux infinis...)
- ◆ Dans la plupart des cas, nécessité d'une analyse par le calcul aux éléments finis

▶ Pour les configurations et chargements « usuels » (tubes, plaques) solutions déclinées sous la forme de formulaires

$$K_I = \sigma \cdot f \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

- ◆ f : fonction d'influence, adimensionnelle, tabulée fonction des dimensions « relatives », de la géométrie de la structure et de la forme du défaut
- ◆ σ une contrainte nominale, déterminée sur la structure sans défaut

On comprends aisément l'intérêt de la formulation qui peut s'appliquer en post-traitement d'un calcul élastique classique (sans fissure)

L'approche globale de la rupture

Le Facteur d'Intensité des Contraintes K

- ▶ Pour les appareils à pression, des solutions ont été déclinées pour des distributions de contrainte polynomiales à travers la paroi du composant

- ◆ Pour un lissage à travers la paroi sous la forme d'un polynôme d'ordre 3

$$\sigma\left(\frac{u}{h}\right) = \sigma_0 + \sigma_1 \cdot \frac{u}{h} + \sigma_2 \cdot \left(\frac{u}{h}\right)^2 + \sigma_3 \cdot \left(\frac{u}{h}\right)^3$$

- ◆ Le facteur d'intensité des contraintes se déduit de la formule

$$K_I = \left[\sigma_0 \cdot i_0 + \sigma_1 \cdot i_1 \cdot \frac{a}{h} + \sigma_2 \cdot i_2 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^2 + \sigma_3 \cdot i_3 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^3 + \sigma_{gb} \cdot F_{gb} \right] \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

- ◆ Les solutions tabulées sont les fonction i_0 à i_3 (et F_{gb} pour les applications tuyauterie)

- ▶ Intérêts et lacunes de cette approche

- ◆ Approche complètement découplée entre détermination des contraintes et calcul de K
- ◆ Besoin d'établir les formulaires de fonction d'influence dans le scope visé (celles-ci sont fonction de la géométrie du défaut et de la structure dans la zone où il se situe)
- ◆ En partie courante, si $a/h > 1/4$, solutions quasi-indépendantes de la structure

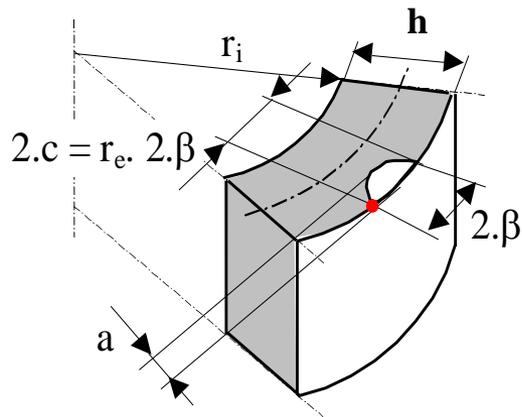
L'approche globale de la rupture

Le Facteur d'Intensité des Contraintes K

- Un grand nombre de solutions développées dans les années 2000 pour les besoins du suivi en service

- ◆ Solutions consignées dans l'annexe 5.4 du RSE-M

Exemple du tube comportant un défaut circonférentiel semi-elliptique en surface externe



Tubes épais

→

Tubes minces

	a / c	a / h	i_0 en surface							
			h/r _i =1	h/r _i =1/2	h/r _i =1/5	h/r _i =1/10	h/r _i =1/20	h/r _i =1/40	h/r _i =1/80	h/r _i =0
Défauts courts	1	0	0.744	0.744	0.744	0.744	0.744	0.744	0.744	0.744
	1	0.1	0.750	0.749	0.748	0.748	0.748	0.748	0.747	0.748
	1	0.2	0.755	0.755	0.754	0.753	0.753	0.753	0.753	0.754
	1	0.4	0.784	0.785	0.787	0.788	0.788	0.788	0.786	0.789
	1	0.6	0.832	0.836	0.844	0.848	0.849	0.849	0.847	0.853
	1	0.8	0.898	0.904	0.917	0.922	0.924	0.924	0.919	0.927
	0.5	0	0.704	0.704	0.704	0.704	0.704	0.704	0.704	0.704
	0.5	0.1	0.717	0.715	0.713	0.712	0.712	0.712	0.712	0.712
	0.5	0.2	0.732	0.730	0.728	0.727	0.726	0.726	0.725	0.726
	0.5	0.4	0.797	0.798	0.802	0.804	0.804	0.804	0.802	0.806
0.5	0.6	0.901	0.907	0.926	0.935	0.939	0.939	0.936	0.947	
0.5	0.8	1.043	1.048	1.086	1.103	1.110	1.111	1.103	1.117	
Défauts infinis	0.25	0	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568
	0.25	0.1	0.588	0.587	0.586	0.585	0.585	0.585	0.585	0.585
	0.25	0.2	0.608	0.608	0.608	0.608	0.608	0.607	0.607	0.608
	0.25	0.4	0.667	0.678	0.696	0.704	0.708	0.710	0.709	0.714
	0.25	0.6	0.717	0.758	0.826	0.860	0.880	0.890	0.891	0.900
	0.25	0.8	0.732	0.837	0.996	1.080	1.130	1.152	1.156	1.167
	0.125	0	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432
	0.125	0.1	0.447	0.447	0.447	0.447	0.447	0.447	0.447	0.445
	0.125	0.2	0.458	0.461	0.465	0.467	0.468	0.468	0.468	0.469
	0.125	0.4	0.454	0.478	0.513	0.533	0.545	0.552	0.555	0.559
0.125	0.6	0.378	0.467	0.553	0.620	0.670	0.701	0.717	0.725	
0.125	0.8		0.415	0.555	0.710	0.843	0.932	0.979	1.006	
0.0625	0	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	
0.0625	0.1	0.334	0.335	0.336	0.336	0.336	0.336	0.336	0.336	
0.0625	0.2	0.333	0.338	0.344	0.348	0.350	0.351	0.352	0.353	
0.0625	0.4		0.331	0.350	0.369	0.385	0.396	0.403	0.410	
0.0625	0.6			0.342	0.374	0.418	0.459	0.489	0.515	
0.0625	0.8			0.330	0.350	0.426	0.530	0.622	0.729	
0	0								0.000	
0	0.1								0.000	
0	0.2								0.000	
0	0.4								0.000	
0	0.6								0.000	
0	0.8								0.000	

L'approche globale de la rupture

La détermination du paramètre J

- ▶ Les premières propositions de calcul analytique de J sont similaires à celles du calcul de K_I (solution EPRI) :

- ◆ Un découplage des parties élastique et plastique de J

$$J = J_e(a) + J_p(a,n)$$

- ◆ La construction de formulaires établis par des calculs aux éléments finis de J_p et des lois de comportement de type Ramberg-Osgood

$$J_p = \alpha \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot a \cdot \left[\frac{F}{F_0} \right]^{n+1} \cdot h_1 \left(\frac{a}{W}, n \right) \quad \text{Pour :} \quad \frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_0} = \alpha \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n$$

- F est ici la charge imposée
- F_0 est la charge limite de la structure (définie en fonction de la géométrie de la structure et de la contrainte σ_0)
- h_1 est le coefficient tabulé dans le formulaire, W est l'épaisseur

L'approche globale de la rupture

La détermination du paramètre J

- ▶ Les premières propositions de calcul analytique de J sont similaires à celles du calcul de K_I (solution EPRI) :

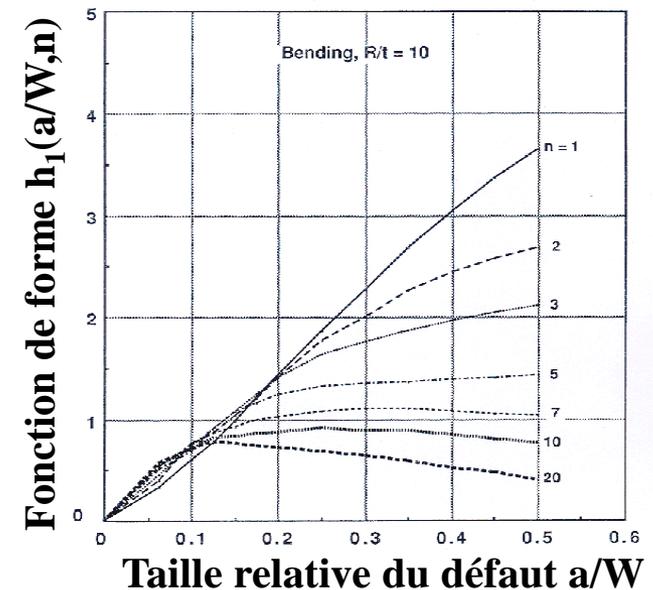
- ◆ Un découplage des parties élastique et plastique de J

$$J = J_e(a) + J_p(a, n)$$

- ◆ La construction de formulaires établis par des calculs aux éléments finis de J_p et des lois de comportement de type Ramberg-Osgood

La solution a été abandonnée car difficilement généralisable:

- *Fonction h_1 très dépendante de l'exposant n*
- *Approche fortement dépendante de la structure et du matériau (au travers de la charge limite)*
- *Matériaux réels avec des lois d'écrouissage différentes d'une loi puissance (Pb de lissage)*
- ...



L'approche globale de la rupture

La détermination du paramètre J

- ▶ Ainsworth a généralisé ce formalisme pour s'affranchir de la loi de comportement Ramberg-Osgood :

$$J_p = \alpha \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot a \cdot \left[\frac{F}{F_{ref}} \right]^{n+1} \cdot h'_1 \left(\frac{a}{W} \right)$$

- ◆ F_{ref} est cette fois la charge de référence optimisée pour rendre le coefficient h'_1 indépendant de l'exposant n

- ◆ La formulation devient :
- $$J = J_e + J_p = \frac{K_I(a)^2}{E} \cdot \left[\frac{E \cdot \varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \Psi_1 \right]$$

- ▶ Dans cette formulation :

- ◆ σ_{ref} est la contrainte de référence, proportionnelle à la charge imposée F et pouvant s'approcher par l'analyse limite :
$$\sigma_{ref} = \sigma_0 \cdot \frac{F}{F_0}$$
- ◆ ε_{ref} est la déformation associée sur la courbe de traction du matériau (quelque soit la courbe de traction)
- ◆ ψ_1 est une correction de plasticité confinée (négligeable lorsque la plasticité se généralise)

L'approche globale de la rupture

La détermination du paramètre J

- ▶ **Au final, deux ingrédients suffisent pour le calcul du paramètre J**
 - ◆ Le formulaire de K_I
 - ◆ La contrainte de référence

- ▶ **Des difficultés tout de même, qui proviennent du fait que :**
 - ◆ La contrainte de référence est celle de la structure fissurée (il faut donc savoir prendre en compte la fissure dans le calcul de la charge limite)
 - ◆ La contrainte «idéale» n'est pas exactement celle issue de l'analyse limite
 - ◆ On observe une petite dépendance avec la courbe de traction lorsque l'on plastifie peu

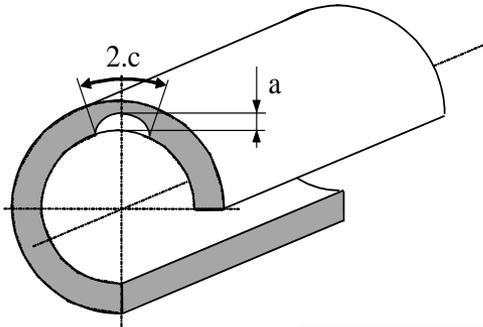
- ▶ **Pour cela, un large effort a été réalisé pour traiter précisément les situations les plus courantes (gros composants revêtus et éléments de tuyauterie)**
 - ◆ Toutes ces solutions sont déduites/recalées sur la base de calculs aux éléments finis
 - ◆ Deux formulations proposées dans l'annexe 5.4 du RSE-M avec chacune une approche différente pour définir la contrainte de référence

L'approche globale de la rupture

La détermination du paramètre J

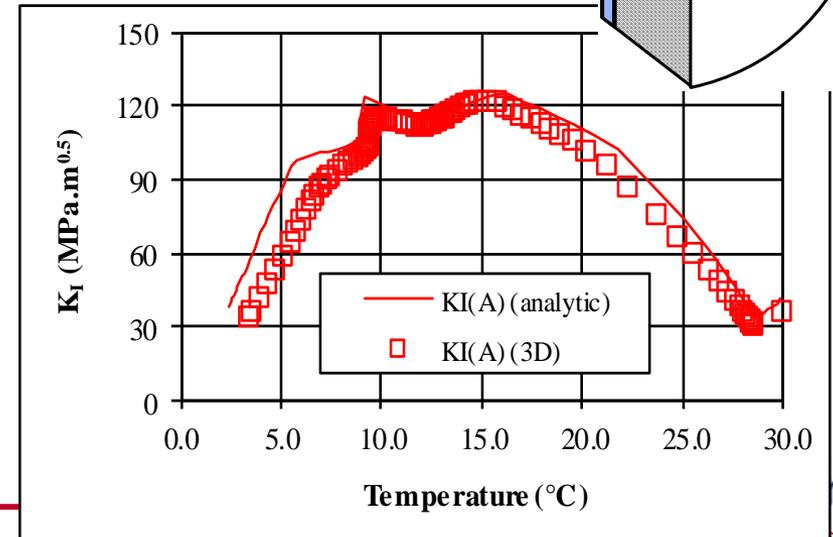
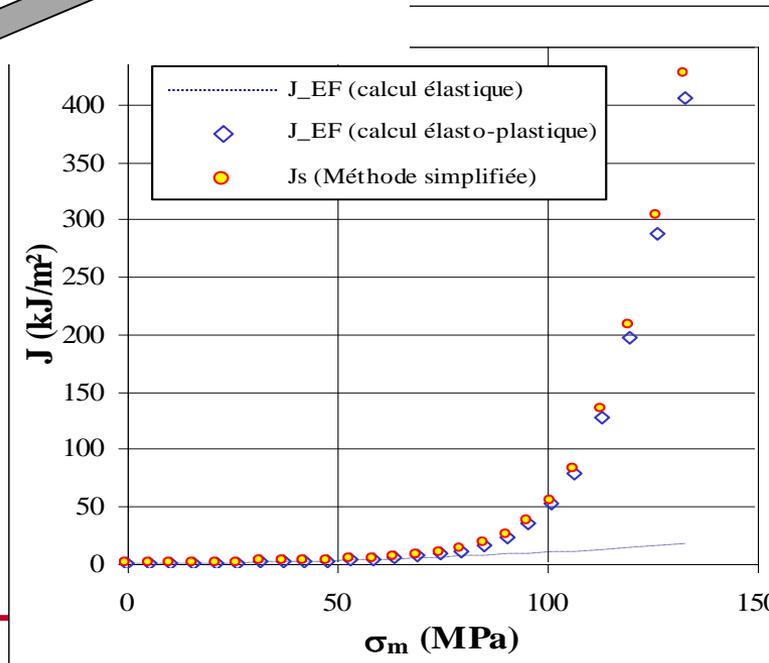
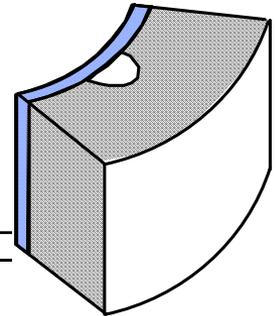
► Deux exemples d'application (applications purement analytiques ici)

- ◆ Un tube comportant un défaut de surface interne
- ◆ Une virole revêtue avec un défaut sous revêtement



Dans leur domaine d'applications, les méthodes analytiques peuvent s'avérer très performantes

→ En dehors, ce n'est plus le cas !



L'approche globale de la rupture

Les Marges

- ▶ **La notion de marge est primordiale pour la démonstration d'intégrité des composants**
 - ◆ Marges explicites mises en place par l'introduction de coefficients de sécurité sur le chargement → coefficients imposés par la loi : arrêté du 10 Novembre 1999
 - ◆ Marges implicites par l'adoption d'enveloppes ou de méthodes et critères pessimistes → Marges implicites qui ne sont pas toujours connues et sont souvent non quantifiables
 - Définition du chargement, définition de la ténacité, critères... des marges implicites à tous niveaux!
 - Une des conséquences néfaste est la possibilité de buter sur des 'faux problèmes'

- ▶ **Fort Impacts de ces marges sur le coût et la possibilité de justification des structures**
 - ◆ Emergence d'approches probabilistes pour mieux appréhender la physique et le risque → Approche non acceptée en France

- ▶ **Pour nous, ces marges constituent un vecteur de R&D pour :**
 - ◆ L'amélioration des règles d'analyse
 - ◆ La recherche de méthodes et critères plus pertinents
 - ◆ La définition d'un lien explicite entre marge et probabilité de rupture

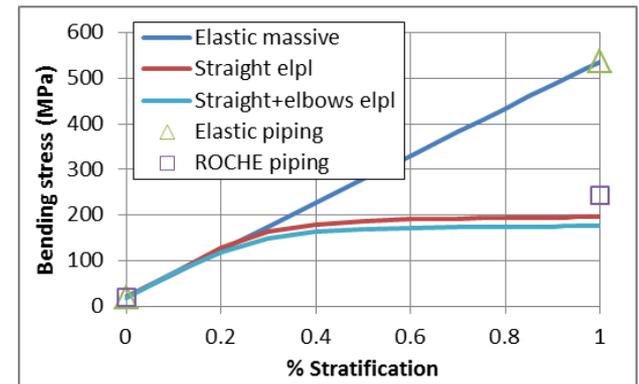
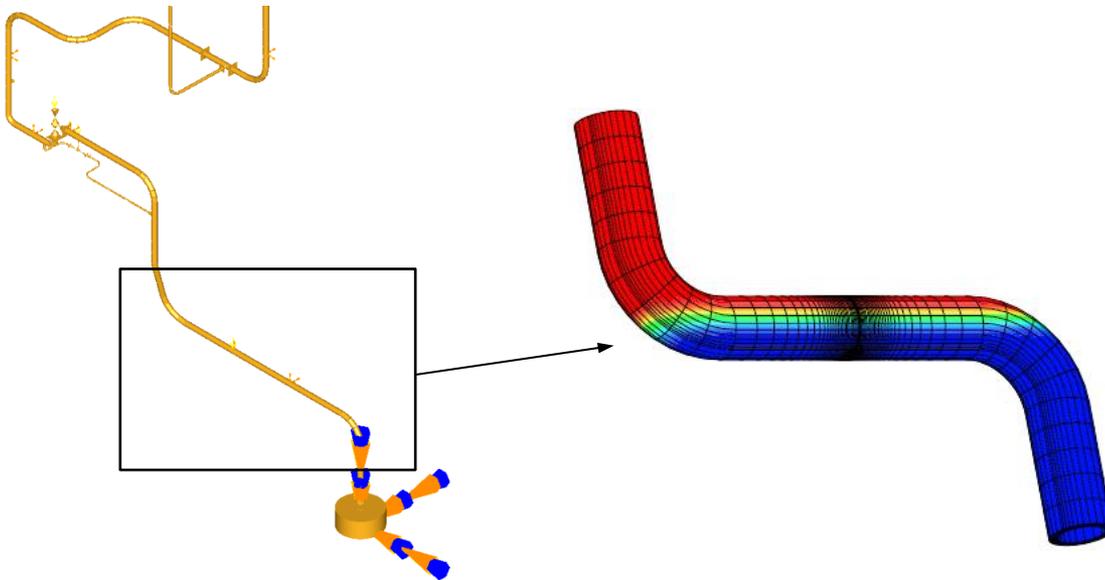
↳ *R&D pour couvrir de nouveaux dommages ou réduire les marges implicites*



La R&D en cours

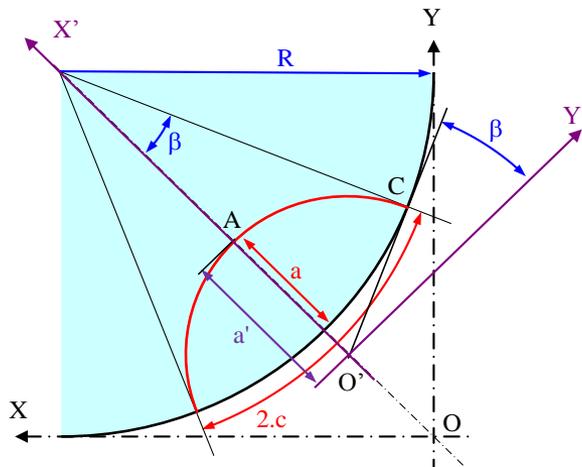
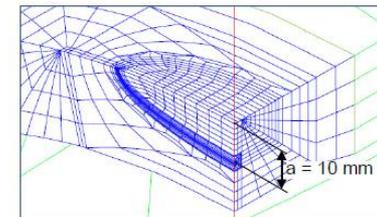
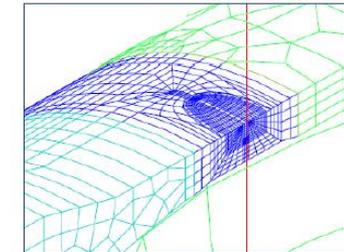
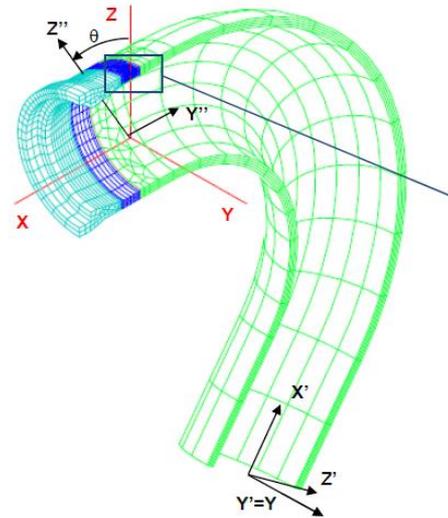
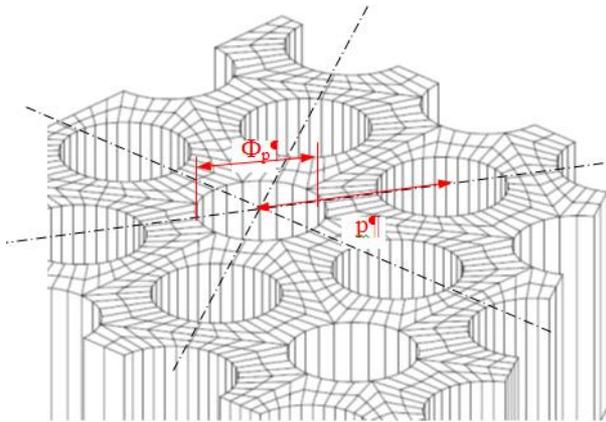
La R&D en cours

- ▶ Compte tenu du contexte précédent (marges, pression, enjeux), la R&D est très appliquée et à très court terme
 - ◆ Solutions semi-analytiques pour l'analyse de la stratification
 - Déclinaison du calcul de J en présence d'un moment de nature secondaire (chargement de type déplacement imposé)



La R&D en cours

- ▶ Compte tenu du contexte précédent (marges, pression, enjeux), la R&D est très appliquée et à très court terme
 - ◆ Solutions pour le calcul de K_I et J dans de nouvelles configurations



La R&D en cours

- ▶ **Compte tenu du contexte précédent (marges, pression, enjeux), la R&D est très appliquée et à très court terme**
 - ◆ Définition et considération des contraintes résiduelles
 - ◆ Stabilité des fissures sous choc thermique (risque d'éclatement des composants sous pression dans le domaine ductile)
 - ◆ ...

- ▶ **Mais aussi plus amont et long terme (ex. sous la forme de thèses)**
 - ◆ Approche locale de la rupture sous chargement cyclique (allez voir Almahdi)
 - ◆ Transition fragile/ductile des Liaisons Bi- Métalliques (thèse de Ghassen)
 - ◆ Développement des outils et données matériau pour la Simulation Numérique du Soudage (détermination des contraintes résiduelles)



Synthèse

- ▶ **Mécanique de la rupture appliquée aux structures**
 - ◆ Arguments de défense en profondeur au stade du dimensionnement
 - ◆ Aide à la décision pour les défauts détectés en service

- ▶ **Pour les structures métalliques de grande taille et sous pression**
 - ◆ Le risque redouté est celui de rupture brutale
 - ◆ Les mode de ruine investigués ici sont la rupture fragile et la rupture ductile (aux températures modérées <400°C)

- ▶ **Etudes presque exclusivement sur les bases de l'approche globale**
 - ◆ Besoin de caractériser la ténacité en fonction de la température
→ Courbes enveloppes associées et des corrélations $K_{IC}/K_V/T_{NDT}$
 - ◆ Développement de tout un lot d'outils pour le calcul de K_I et J dans les situations les plus courantes
→ Approches pertinentes lorsque l'on est dans le domaine d'application
 - ◆ R&D en continu pour étendre le domaine d'application et réduire le conservatisme intrinsèque des outils et critères