Mécanique de la rupture
Endommagement par fatigue

Claude ROBIN
Ecole des Mines de Douai
Janvier – décembre 2010

Plan du cours

- MECANIQUE DE LA RUPTURE
  - GÉNÉRALITÉS ET PRINCIPES DE BASE DE LA MÉCANIQUE DE LA RUPTURE
  - MECANISMES DE RUPTURE ET DE CROISSANCE DE FISSURE
  - CHAMP DE CONTRAINTE ELASTIQUE A LA POINTE D'UNE FISSURE
  - ZONE PLASTIFIEE A LA POINTE DE FISSURE
  - DETERMINATION DE LA TENACITE D'UN MATERIAU
  - PRINCIPES ENERGETIQUES
  - MECANIQUE ELASTOPLASTIQUE DE LA RUPTURE

Plan du cours

- FATIGUE
  - FATIGUE ENDURANCE
  - FATIGUE PLASTIQUE OLIGOCYCLIQUE
  - FISSURATION PAR FATIGUE
  - PREDICTION DE DUREE DE VIE

Généralités et principes de base de la mécanique de la rupture

- Introduction
- Comportement d'une structure comportant une fissure
- Contrainte à la pointe d'une fissure
- Le facteur d'intensité de contrainte, paramètre caractéristique
- Conclusion

INTRODUCTION : quelques exemples spectaculaires

- Incidents spectaculaires ayant conduit au développement de la mécanique de la rupture.

- Remarques préliminaires

  - Importance de la transition fragile / ductile.
  - Importance de la limite d 'élasticité : peu de déformation plastique si la limite d'élasticité est élevée.
  - Les aciers à haute limite d'élasticité ont une résistance à la fissuration faible.

LES LIBERTY SHIP

Liberty Ship était le nom donné aux bateaux de type EC2 construits en urgence par la Marine Américaine.

Le premier des 2751 Liberty Ships était le SS Patrick Henry lancé le 27 Septembre1941. Les 250000 pièces du bateau étaient préfabriquées en éléments de 250 tonnes à travers le pays et soudés ensemble en 70 jours.

Un Liberty Ship, le SS Robert Peary a été construit en 4 jours et demi.

LA RUPTURE DU SS SCHENECTADY (Janvier 1943)

En janvier 1943,le Tanker T2 SS Schenectady vieux d'un jour avait terminé avec succès ses essais en mer et retournait au port par un temps calme

quand….

CAUSES DES AVARIES DE PLUS DE 200 LIBERTY SHIPS

- Construction entièrement soudée qui a éliminé les éléments rivetés qui servent d'arrêt à la propagation des fissures,
- Présence de défauts assimilables à des fissures dans des joints soudés réalisés par opérateurs inexpérimentés et pressés par les exigences du programme,
- Utilisation d'aciers à basse résistance à la propagation de fissure qui sera réduite par la froide température du mois de janvier.

NAUFRAGE DU FLARE (16 JANVIER 1998)

Le 16 janvier 1998, le navire coule au large de Terre-Neuve.

EXPLOSION D'UNE CONDUITE DE GAZ A GHISLENGHIEN (BELGIQUE)

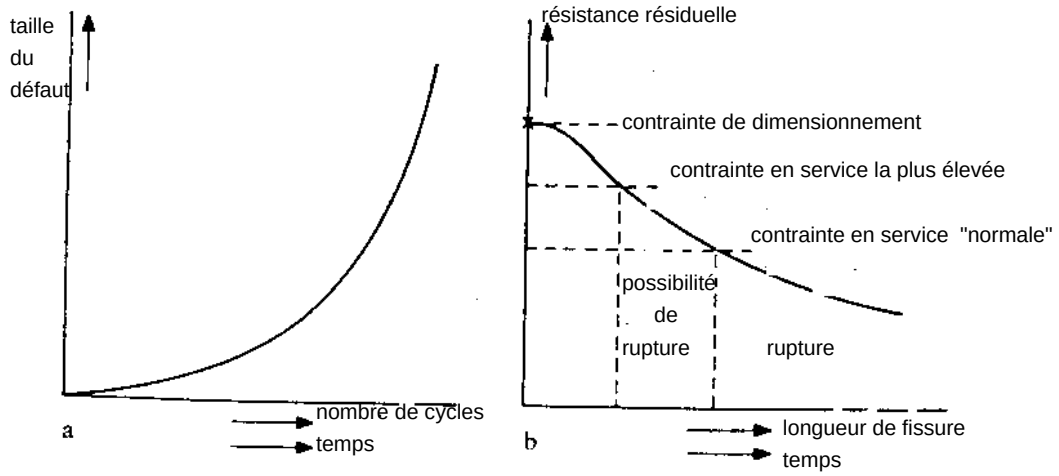
L'AMORCE DE LA RUPTURE EST LOCALISEE SUR DES ERAFLURES SUPERFICIELLES

Le morceau de conduite qui a explosé porte les traces de griffes provenant d'un engin de terrassement (pelleteuse, bulldozer).

II.- COMPORTEMENT D'UNE STRUCTURE CONTENANT DES FISSURES

- A cause de l'existence de **fissures** ou de **défauts**, les pièces ont une **durée de vie limitée**.
- Un des objets de la mécanique de la rupture est de calculer la durée de vie des pièces en fonction du nombre de cycles de contraintes endurés.
- Une fissure engendre une concentration de contrainte à la pointe du défaut, qui entraîne une baisse de la résistance mécanique de la pièce. Il y a alors risque de rupture, et la pièce voit sa durée de vie limitée.

Existence d'une durée de vie résiduelle

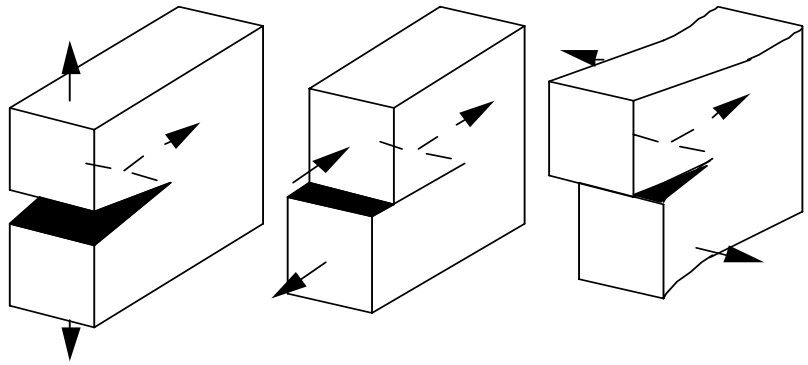


Objectifs du cours

- Le cours étudiera d'abord la théorie de la M.L.E.R. (Mécanique Linéaire Elastique de la Rupture). Cette théorie permet de répondre aux questions :
  - Quelle est la résistance résiduelle en fonction de la taille des défauts ?
  - Quelle est la taille critique du défaut, compte tenu des conditions de chargement ?
  - Quel temps faut-il à une fissure pour passer de la taille initiale à la taille critique ?
  - Comment déterminer les intervalles d'inspection ?

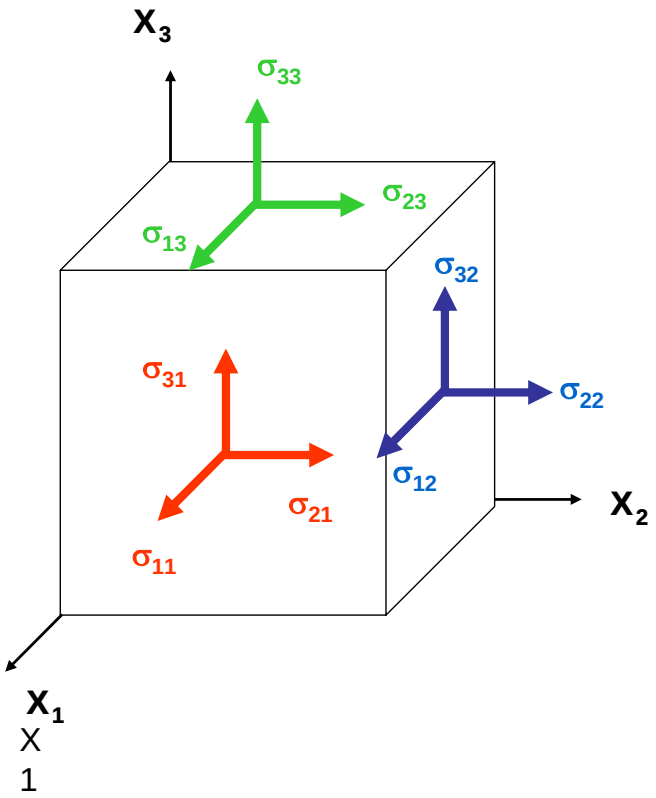
Les trois modes élémentaires de rupture

- Mode I (mode d'ouverture) : chargement perpendiculaire au plan de la fissure
- Mode II : chargement dans le plan de la fissure : mode de cisaillement plan
- Mode III : chargement de cisaillement, toujours dans le plan de la fissure : mode de cisaillement anti-plan



mode I mode II mode III

Champ de contrainte élastique : rappel

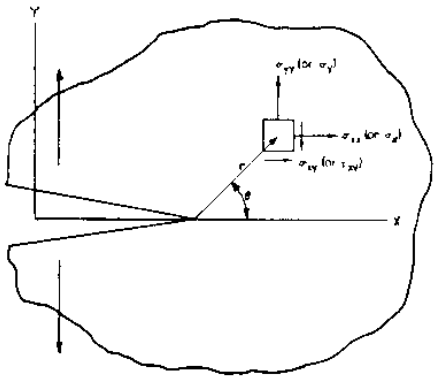


σ_{ij} (j=1,2,3) :

composantes de l'effort sur la facette ⊥ à l'axe x_j

Champ de contrainte élastique en mode I

- Cas d'une fissure traversante de longueur a dans un solide de forme quelconque, sollicité par une charge arbitraire.



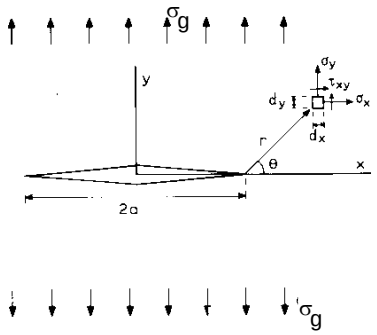
Paramètre gouvernant la distribution

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cdot f_{ij}(\theta)$$

Fonction angulaire

Singularité de contraintes en1/√r

Cas d'une plaque infinie soumise à une traction uniforme et contenant une fissure centrale de longueur 2 a.



- Dans ce cas :

$$K_I = \sigma_g \sqrt{\pi a}$$

unité : $MPa.\sqrt{m}$

En règle générale, K_I est de la forme : $K_I = \beta.\sigma_g \sqrt{\pi a}$

où β est un facteur de forme qui dépend de la géométrie.

Solution complète

La solution complète du cas de la plaque infinie est :

$$\sigma_x = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos\frac{\theta}{2}\left[1 - \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right]$$

$$\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos\frac{\theta}{2}\left[1 + \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right]$$

$$\tau_{xy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2}$$

Cette solution n'est valable que pour les points proches de la pointe de fissure, car tous les termes de contrainte ne sont pas pris en compte. La solution complète est :

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi.r}} f_{ij}(\theta) + 2^{ème}\,terme + 3^{ème} + \ldots$$

Définition de la ténacité

- Le facteur d'intensité de contrainte (F.I.C) peut être considéré comme un paramètre caractéristique

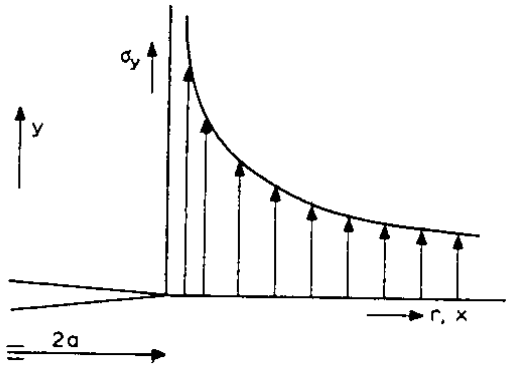
- **la ténacité** est la valeur critique du F.I.C. qui conduit à une rupture brutale.

- C'est une caractéristique du matériau dans un état donné que l 'on note K_{1C}

- Remarque : Il existe des normes qui fixent les conditions d'essais pour déterminer sa valeur.

Notion de zone plastifiée : exemple de la plaque fissurée

Evolution de la contrainte normale σ_{yy} pour $\theta = 0$.



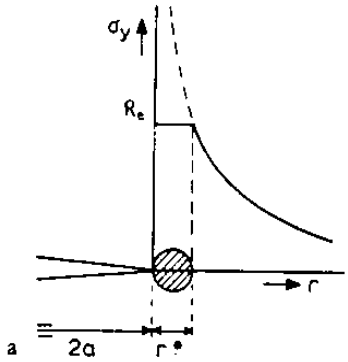
- Quand r tend vers 0, la contrainte normale tend vers l'infini, ce qui est impossible dans un état élastique.

- Donc à la pointe de la fissure, l'état de contrainte sera fini, dû à un comportement plastique du métal sous sollicitations.

Estimation de la dimension de la zone plastifiée

- Une estimation de la zone plastifiée peut être obtenue en calculant la distance r* pour laquelle la contrainte est égale à (ou devient plus grande que) la limite d'élasticité.

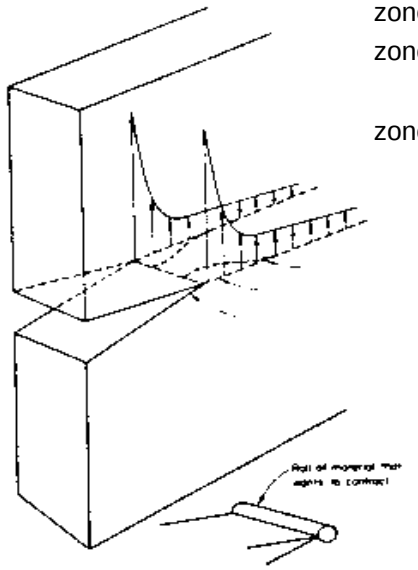
$$\sigma_Y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi.r*}} = R_e \leftrightarrow r* = \frac{K_I^2}{2\pi R_e^2}$$



La taille de la zone plastifiée dépend du F.I.C. et de la limite d'élasticité du matériau.

<u>Remarque</u> : on verra par la suite que la taille de la zone plastique réelle est supérieure à r*.

Influence de la plasticité



zone : contraction latérale faible
zone : la plaque "voudrait" se contracter latéralement
zone : aucune contraction latérale

Influence de la plasticité

- A la pointe de la fissure, dans la zone plastifiée, les contraintes sont localement très hautes ; il existe une déformation transverse suivant l'axe z.
  - **Dans le cas d'une plaque épaisse**, existence de matière juste devant la pointe de fissure et dans la zone élastique qui va empêcher la déformation suivant z
    - La déformation ε_{zz} est nulle : état plan de déformation
    - Existence d'une contrainte $\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$
  - **Dans le cas d'une plaque mince ou en surface d'une plaque**, la déformation suivant z peut se produire
    - La déformation ε_{zz} n'est pas nulle
    - La contrainte σ_{zz} est nulle ; état plan de contrainte

Merci de votre attention…

Claude ROBIN
claude.robin@mines-douai.fr