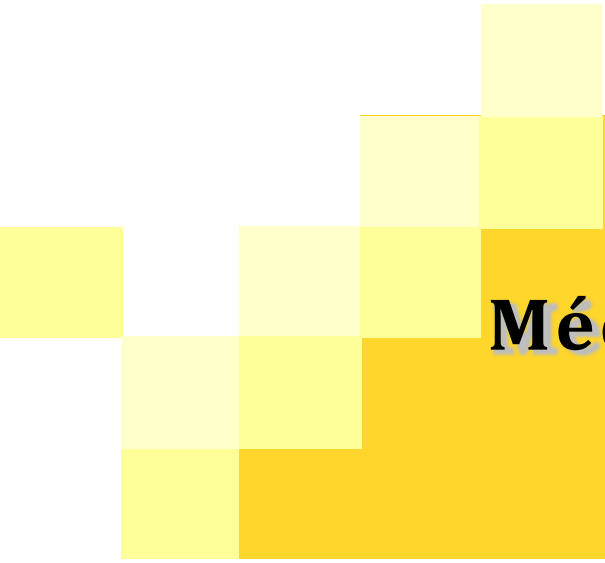




Mécanique de la rupture et fatigue

Accident du Boeing 737 d'Aloha Airlines

28 Avril 1988



- Déchirure de l'avant du fuselage sur une longueur de 6 m.
- 95 personnes à bord : décès d'un membre de l'équipage..

Avion en service depuis 1969 (89090 vols) ➡ 13 vols par jour durant 19 ans

Naufrage du FLARE

16 janvier 1998 au large de Terre Neuve

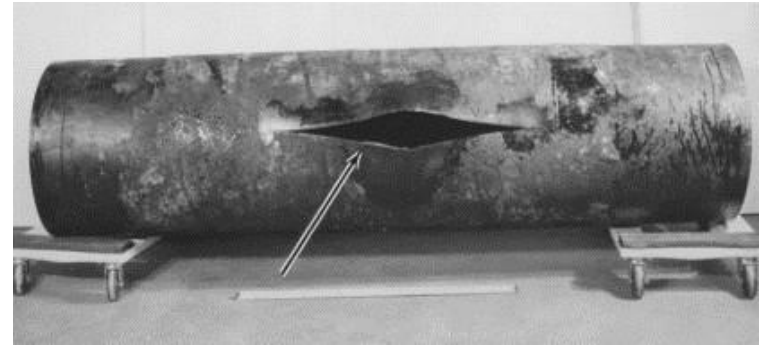


Par gros temps, le «FLARE» s'est brisé en deux. Vingt et un membres de l'équipage ont péri et quatre ont survécu. Le gasoil qui s'est échappé n'a pu être récupéré et s'est dispersé sur une grande superficie, causant de la pollution.

Rupture des bateaux liberty Seconde guerre mondiale



Explosion d'une conduite de Gaz (Belgique)



Une conduite de gaz naturel sous haute pression (80 bars) a explosé. Un tronçon de la conduite de gaz, mesurant 11 mètres et pesant plusieurs tonnes, a été projeté à près de 200 mètres.

Cette explosion a causé la mort de 24 personnes; elle a aussi fait de nombreux mutilés et grands brûlés (132).

Rupture du ressort d'amortisseur



**Rupture brutale du ressort de l'amortisseur avant gauche
Renault Scénic DCI RXT (140 000 km)**

Rupture dans les engrenages



Arrachement de la matière dans un engrenage



Propagation d'une fissure par fatigue à la base d'une dent d'engrenage

Rupture dans les constructions en béton armé



Ruptures dans les structures du génie civil

Donner des réponses aux questions suivantes:

- ☐ Quelle sera la résistance résiduelle en fonction de la longueur de la fissure?
- ☐ Quelle taille de la fissure peut être tolérée à un chargement de service donné?
- ☐ Quel est le nombre de cycle (durée de vie résiduelle) nécessaire pour faire propager une fissure initiale jusqu'à une taille critique?
- ☐ Quelle taille de défaut, préexistant, peut être tolérée lors de la mise en service de la structure?
- ☐ Quelle doit être la fréquence des inspections de la structure?



Programme

- ❑ Chapitre 1 Introduction
- ❑ Chapitre 2 Mécanique linéaire de la rupture (MLR)
- ❑ Chapitre 3 Mécanique non-linéaire de la rupture (MNLR)
- ❑ Chapitre 4 La rupture par fatigue
- ❑ Chapitre 5 Loi de propagation de fissures par fatigue

❑ Chapitre 1 Introduction

- **Aperçu historique**

- Utilisation de la mécanique de la rupture en conception
- Propagation des fissures et concept de tolérance au dommage
- Influence des propriétés des matériaux sur la rupture
- Analyse dimensionnelle en mécanique de la rupture
- Mécanismes de ruptures et de propagation des fissures

❑ Chapitre 2 Mécanique linéaire de la rupture (MLR)

❑ Chapitre 3 Mécanique non-linéaire de la rupture (MNLRL)

❑ Chapitre 4 Propagation des fissures par fatigue

❑ Chapitre 5 Méthodes numériques en mécanique de la ruptures

I.1 Aperçu historique

I.1 Aperçu historique

- Causes des ruptures dans les structures:

1. Négligence dans la conception, dans la construction ou dans l'utilisation de la structure.

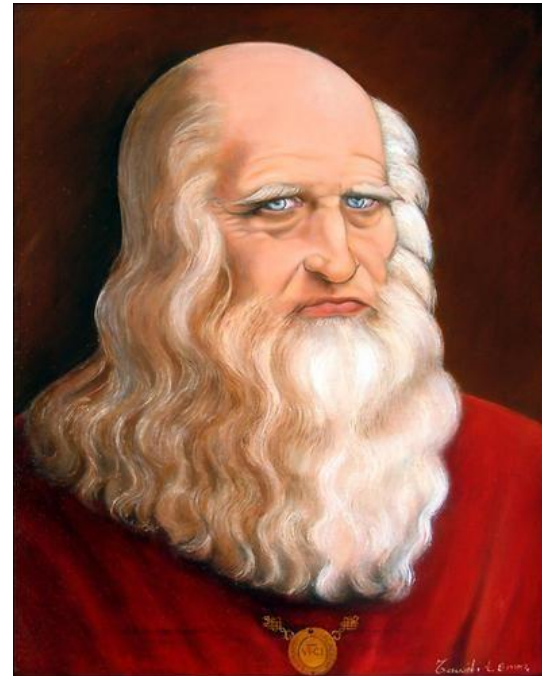
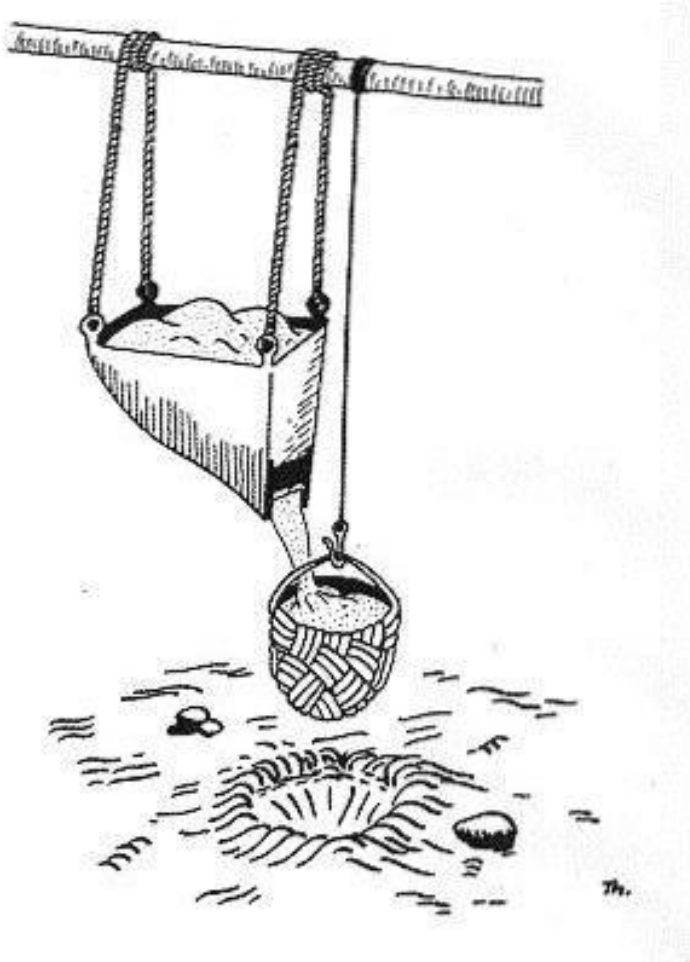
2. Utilisation de nouveaux matériaux ou de nouveaux procédés qui peuvent produire une rupture inattendue.

- Dans le premier cas, le risque de rupture peut être évité dès lors que la structure est bien dimensionnée avec un choix de matériaux adaptés et que les chargements sont correctement évalués.

- Dans le deuxième cas, la prévention de la rupture est plus délicate. Lorsqu'on utilise un nouveau matériau ou un nouveau procédé, il y a souvent un certain nombre de facteurs que le concepteur ne maîtrise pas toujours car la mise en oeuvre de nouvelles techniques, bien qu'elle procure des avantages, conduit inévitablement à des problèmes potentiels.

1. Aperçu historique

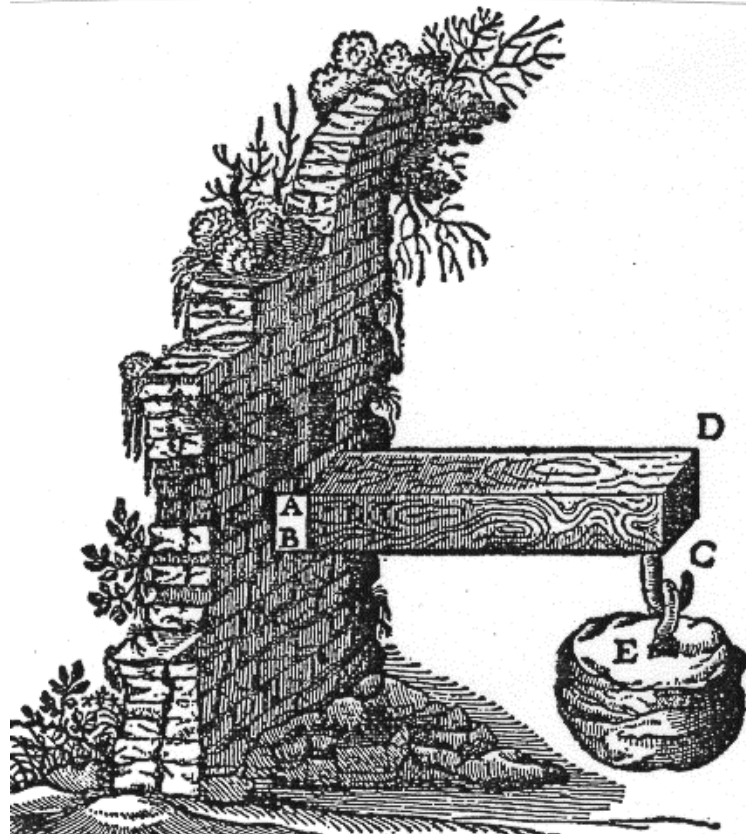
- Premiers essais de ruptures



Leonard de Vinci (1452-1519)

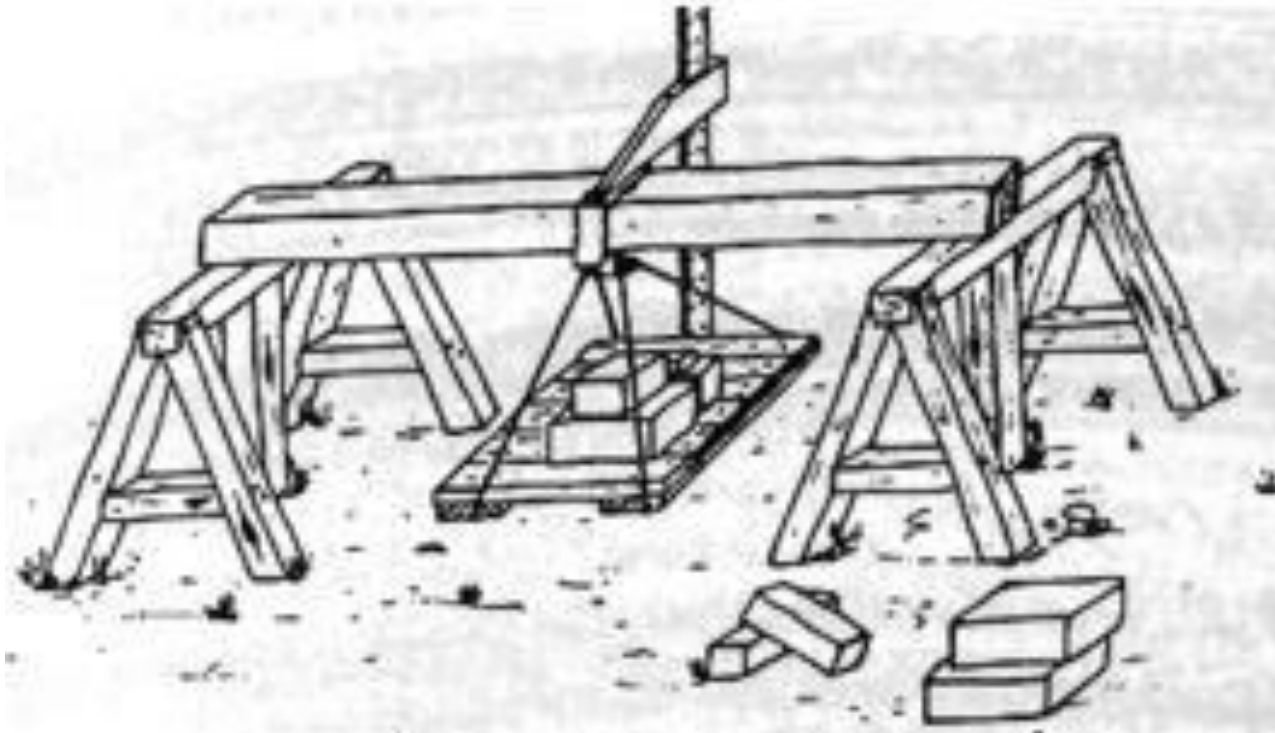
I.1 Aperçu historique

Expérience de Galileo Galilée (1564 – 1641) sur la résistance à la rupture de poutres encastrées.



I.1 Aperçu historique

Schéma de l'expérience menée par Buffon (Georges Louis Leclerc, 1707- 1788) sur la rupture du bois

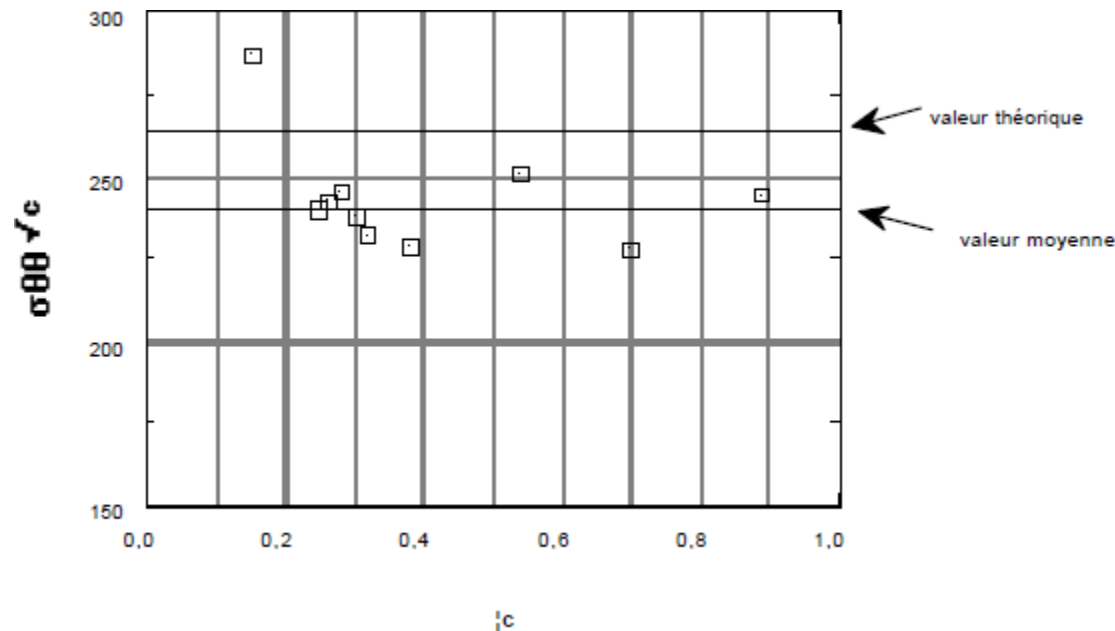


" Et j'ai reconnu par là combien les nœuds ôtent de force au bois, ce qui est beaucoup au-delà de ce qu'on pourrait imaginer ".

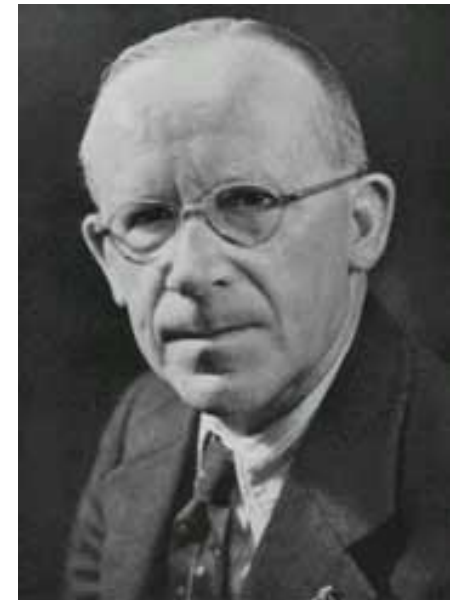
1. Aperçu historique

LES PIONNIERS DE LA MECANIQUE LINEAIRE DE LA RUPTURE

- 1920, Griffith établit une relation directe entre la taille du défaut et la contrainte de rupture



Résultats expérimentaux obtenus par Griffith



A.A. GRIFFITH

$$\sigma_{\theta\theta}^c \sqrt{c} = \sqrt{\frac{2\gamma_s E}{\pi \nu}}$$

1. Aperçu historique

LES PIONNIERS DE LA MECANIQUE LINEAIRE DE LA RUPTURE

- 1948 Irwin définit la force d'extension de fissure G

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



Irwin et Kies

En 1954, Irwin et Kies ont attribué à la grandeur $\sqrt{EG}$ le sigle K, première lettre du nom de Kies, le technicien d'Irwin.

I.1 Aperçu historique

EXPLOSION DE CRITERES DE MECANIQUE ELASTO-PLASTIQUE DE LA RUPTURE

Dans les années 1960-1970, on assista à l'apparition d'un nombre très important de critères de rupture du domaine élastoplastique (environ une trentaine) que l'on peut classer en sept familles qui sont reportées dans le tableau suivant.

Chapitre 1 INTRODUCTION

I.1 Aperçu historique

Type de critère	Local/ Global	Paramètre du critère	Auteurs	Année
Contrainte	Global	Facteur d'intensité de contraintes critique	Irwin et Kies	1954
	Local	Contrainte critique de clivage + distance caractéristique X_c	Richie, Knott et Rice	1973
Déformation	Global	Facteur de ductilité à l'entaille	Randall et Merkle	1972
	Local	Ecartement critique de fissure	Wells	1963
Energie	Global	Intégrale J	Rice Cherepanov	1968
	Local	Densité d'énergie de déformation critique	Guillemot	1965
Interpolation	Global	Méthode des deux paramètres	Dowling et Townley	1974

❑ Chapitre 1 Introduction

- Aperçu historique
- **Utilisation de la mécanique de la rupture en conception**
- Propagation des fissures et concept de tolérance au dommage
- Influence des propriétés des matériaux sur la rupture
- Analyse dimensionnelle en mécanique de la rupture
- Mécanismes de ruptures et de propagation des fissures

❑ Chapitre 2 Mécanique linéaire de la rupture (MLR)

❑ Chapitre 3 Mécanique non-linéaire de la rupture (MNLR)

❑ Chapitre 4 Propagation des fissures par fatigue

❑ Chapitre 5 Méthodes numériques en mécanique de la ruptures

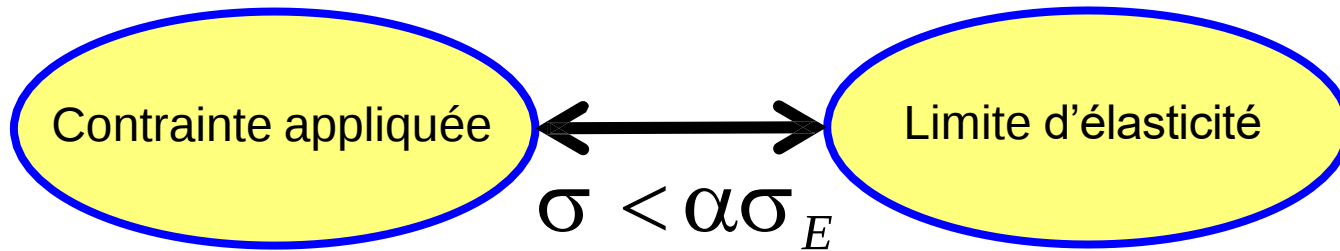
I.2 Utilisation de la mécanique de la rupture en conception

Avant le développement de la mécanique de la rupture, le dimensionnement des structures utilisait la démarche « Résistance des matériaux » appelée aussi, « approche classique » (Figure a). Il fallait veiller à ce que la contrainte maximale, ne dépasse pas la limite élastique σ_y du matériau affectée d'un coefficient de sécurité, ($\sigma < \alpha \sigma_y$, $\alpha < 1$), afin d'éviter une rupture brutale. Cette approche, à deux variables σ et σ_y , ne tient pas compte de l'éventuelle présence des défauts (microfissures), et qui peuvent engendrer d'importantes concentrations des contraintes

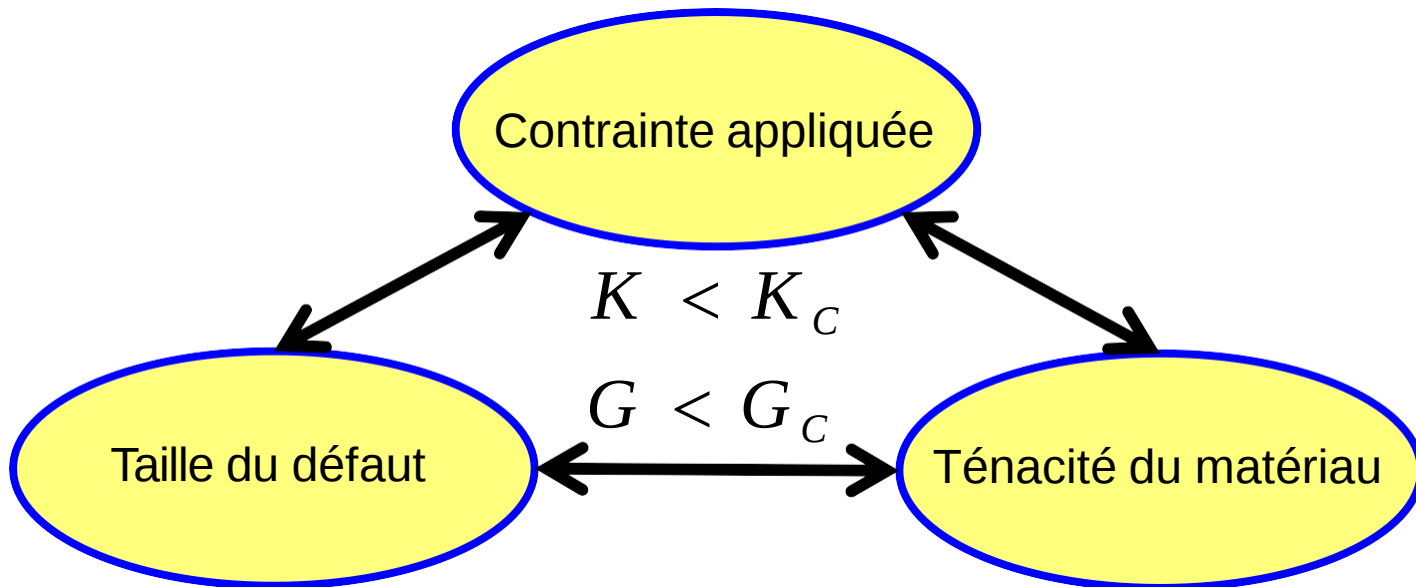


L'approche basée sur la mécanique linéaire de la rupture (MLR) est à trois variables : la contrainte appliquée, la ténacité K_{IC} qui remplace la limite d'élasticité et la taille du défaut (Figure b). Il y a cependant deux approches alternatives de la mécanique de la rupture : l'une utilisant le concept d'intensité des contraintes critique (ténacité du matériau) et l'autre un critère d'énergie. Ces deux approches sont équivalentes sous certaines conditions. Avant d'aborder les détails des calculs, une brève présentation des deux approches est donnée ainsi que les hypothèses qui justifient chacune d'elles.

I.2 Utilisation de la mécanique de la rupture en conception



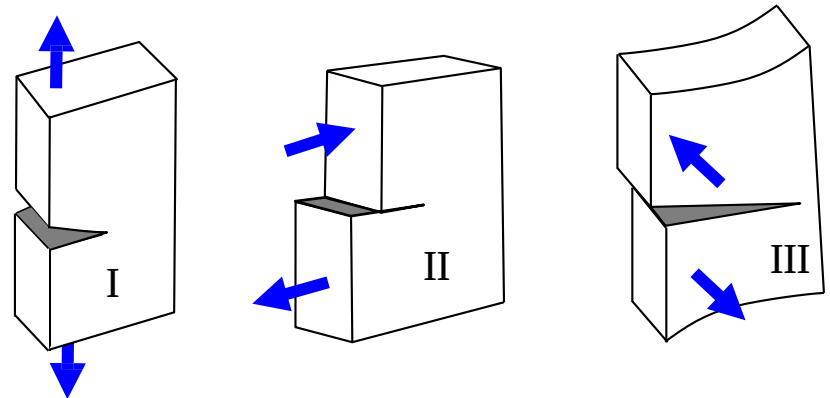
a/ Approche classique (RDM)



b/ Approche utilisant la mécanique de la rupture

I.2.1 Modes de rupture et contraintes au voisinage d'une fissure

La mécanique de la rupture est une philosophie de conception visant à développer un critère de ruine prenant en compte les fissures existantes au sein d'un matériau. Elle a donc pour objet l'étude des fissures macroscopiques. Pour cela, il importe de pouvoir comparer un facteur de charge à un paramètre caractéristique du matériau. Il faut donc définir un facteur caractérisant la sévérité de la situation d'une pièce fissurée soumise à un chargement. Ce facteur s'obtient en considérant les répartitions des contraintes et des déformations au voisinage du front de fissure.



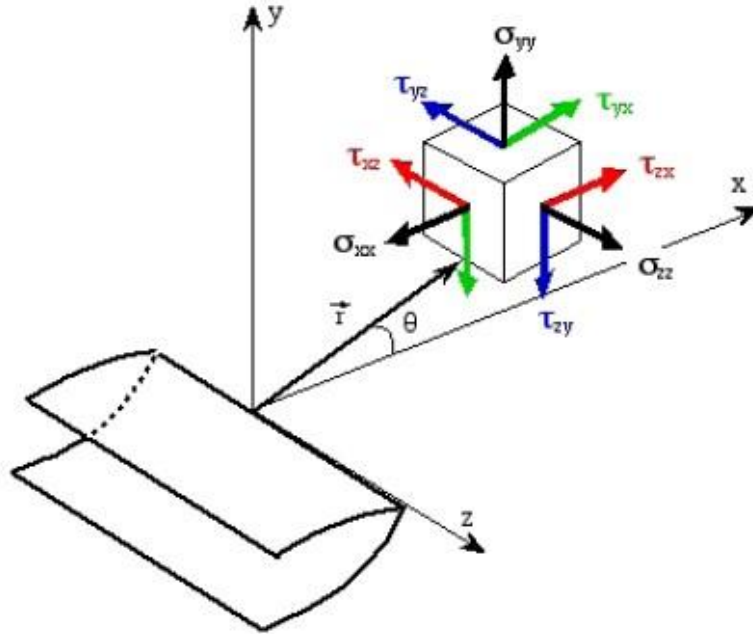
Les trois modes de rupture:

Mode I ou mode « Ouverture »

Mode II ou mode « Glissement plan »

Mode III ou mode « Glissement anti-plan »

Chapitre 1 INTRODUCTION



Le champs des contraintes élastiques à une distance r de la pointe de la fissure s'écrit:

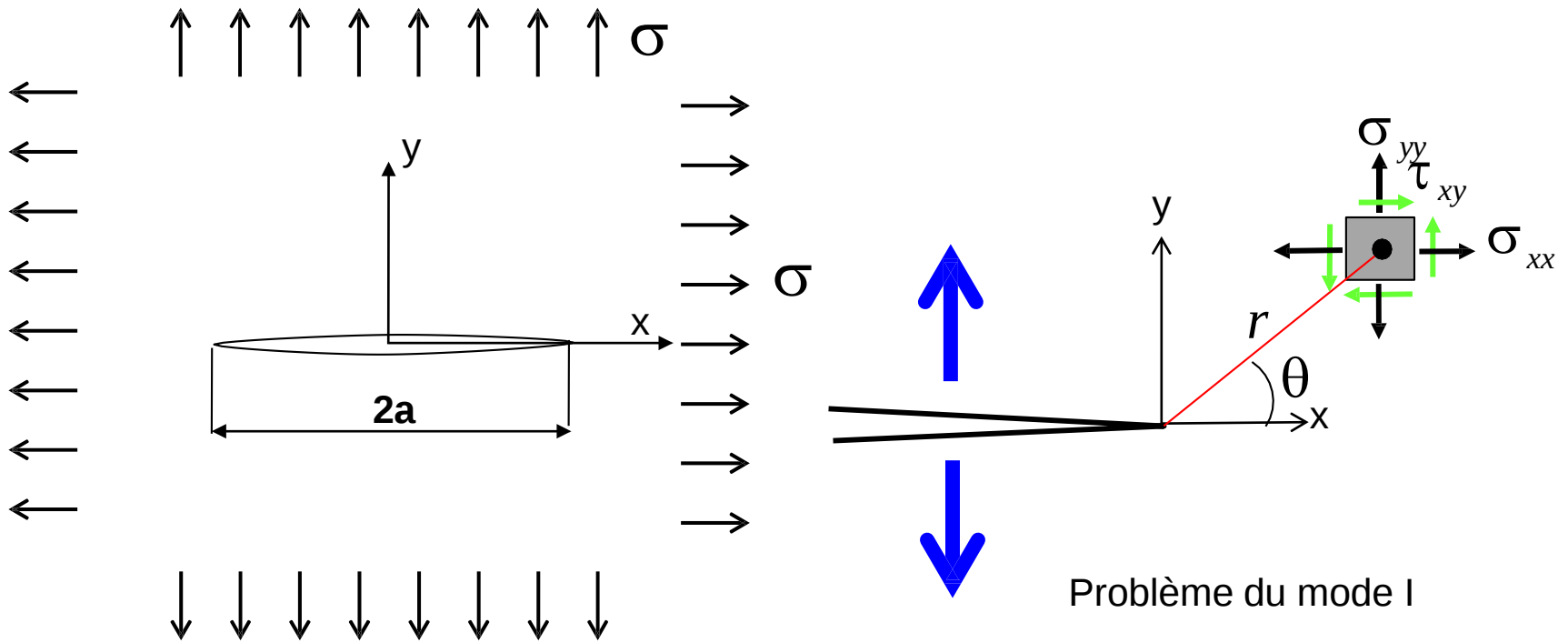
$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad *$$

K: Facteur d'intensité des contraintes FIC (SIF)

Paris. P.C, Sih. G.C. Stress analysis of cracks. ASME STP 381 (1965) PP 30-81

Chapitre 1 INTRODUCTION

Pour une fissure de longueur $2a$ dans une plaque de dimensions infinies:



Problème du mode I

Fissure en mode I sous chargement biaxial

Chapitre 1 INTRODUCTION

Mode I: Ouverture

$$\text{Les contraintes} \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{array} \right.$$

En contrainte plane: $\sigma_{zz} = 0$

En déformation plane: $\sigma_{zz} = \nu (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$

$$\text{Les déplacements} \left\{ \begin{array}{l} u_x = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[\kappa - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \\ u_y = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left[\kappa + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \end{array} \right.$$

En contrainte plane: $\kappa = \frac{3 - \nu}{1 - \nu}$

En déformation plane: $u_z = 0$ et $\kappa = 3 - 4\nu$

I.2.2 Concept d'intensité des contraintes

Pour une fissure de longueur $2a$ dans une plaque de dimensions infinies en mode I:

$$K_I = \sigma_{\infty} \sqrt{\pi a}$$

Dans l'approche basée sur le concept de FIC, la rupture se produit lorsque le FIC atteint la valeur critique K_{IC} , qui correspond à la **ténacité** du matériau, dont le comportement est élastique linéaire (le principe de similitude est supposé vérifié).

$$K_I \geq K_{IC} \Rightarrow \textit{Rupture}$$

A SUIVRE ...

3. Critère énergétique de la rupture (A.A Griffith)

L'approche énergétique est basée sur le postulat suivant :

L'extension d'une fissure qui conduit à la rupture se produit lorsque l'énergie fournie est suffisante pour vaincre la résistance du matériau.

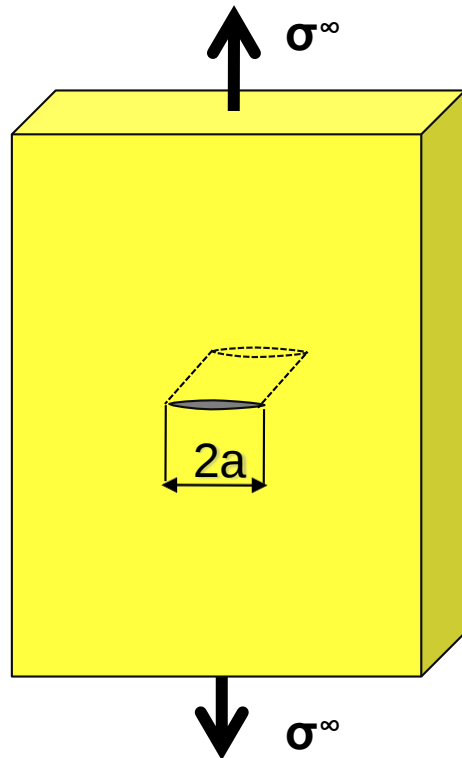
Cette résistance se compose de:

- l'énergie de création de surface
- de l'énergie de plastification de l'extrémité de la fissure
- éventuellement d'autres types d'énergies dissipatives

Griffith fut le premier à proposer un critère d'énergie pour la rupture des matériaux fragiles, qui fut ensuite étendu aux matériaux ductiles par d'autres auteurs : Irwin et Orowan.

L'énergie de Griffith notée G (*qu'on appelle aussi: taux de restitution d'énergie*) est définie par la variation d'énergie par unité de surface fissurée, associée à la propagation d'une fissure dans un matériau linéaire élastique. La rupture se produit lorsque G atteint une valeur critique G_C . G_C est une mesure de la ténacité du matériau.

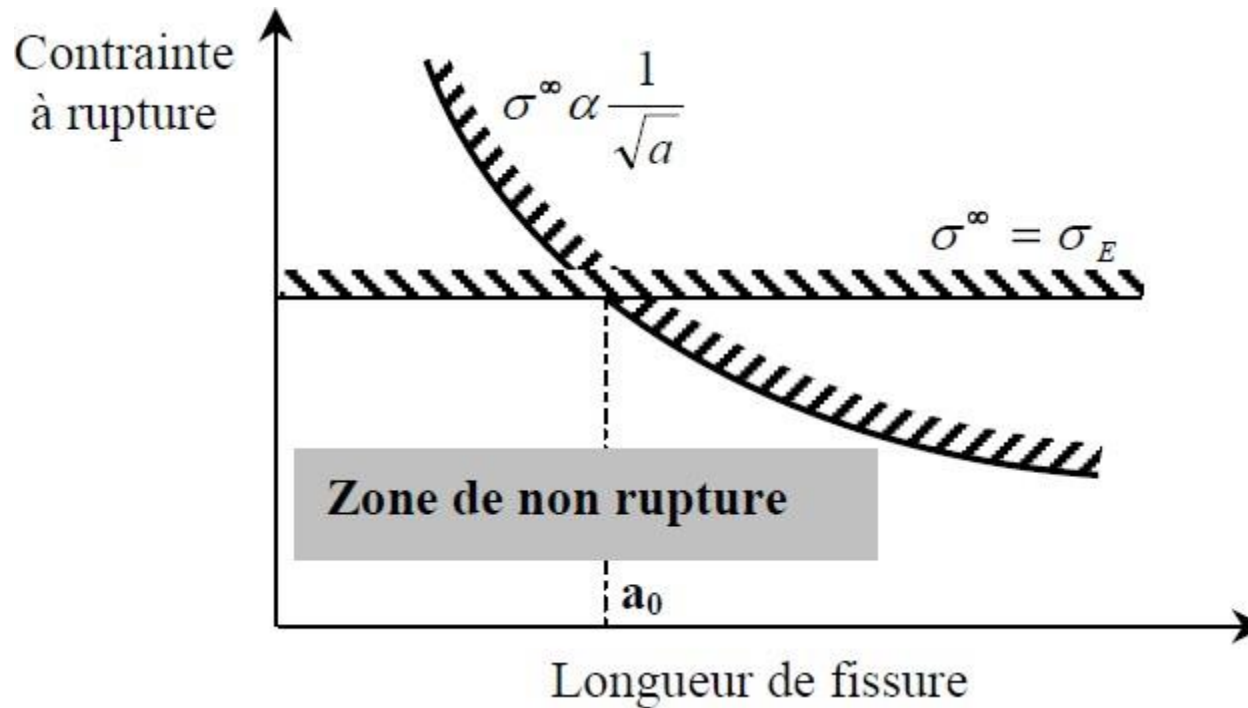
Pour une fissure de longueur $2a$ dans une plaque de dimensions infinies (ce qui équivaut à dire que la longueur de fissure est très petite par rapport aux dimensions de la plaque dans le plan de chargement), constituée d'un matériau de module d'Young E et soumise à une contrainte de traction σ^∞ , l'énergie de Griffith G par unité de surface fissurée est donnée par :



$$G = \frac{\pi \left(\sigma^\infty \right)^2 a}{E} \quad (1.1)$$

Fissure traversante de longueur $2a$
dans une plaque infinie

Chapitre 1 INTRODUCTION



Comparaison entre l'approche classique et la MLR

❑ Chapitre 1 Introduction

- Aperçu historique
- Utilisation de la mécanique de la rupture en conception
- **Propagation des fissures et concept de tolérance au dommage**
- Influence des propriétés des matériaux sur la rupture
- Analyse dimensionnelle en mécanique de la rupture
- Mécanismes de ruptures et de propagation des fissures

❑ Chapitre 2 Mécanique linéaire de la rupture (MLR)

❑ Chapitre 3 Mécanique non-linéaire de la rupture (MNLR)

❑ Chapitre 4 Propagation des fissures par fatigue

❑ Chapitre 5 Méthodes numériques en mécanique de la ruptures

I.3 Propagation des fissures et concept de tolérance au dommage

La MLR permet le calcul de la durée de vie d'une structure soumise à des sollicitations cycliques (phénomène de fatigue) ou sujette à des effets de corrosion sous tension. La vitesse de propagation des fissures est alors caractérisée par un paramètre tel que le **FIC**, et la taille critique de défaut à ne pas dépasser est directement liée à la ténacité du matériau. Dans le cas par exemple de la fissuration par fatigue des alliages métalliques, la vitesse de propagation de la fissure **da/dN** est *généralement représentée par la relation empirique de Paris* :

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m$$

où **ΔK** est l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes et **C** et **m** sont des constantes du matériau.

Chapitre 1 INTRODUCTION

La durée de vie de la structure est égale à la durée de vie, exprimée en nombre de cycle, jusqu'à amorçage de la fissure, suivie de la durée de vie pour faire propager la fissure jusqu'à une taille critique

$$N_r = N_a + N_p$$



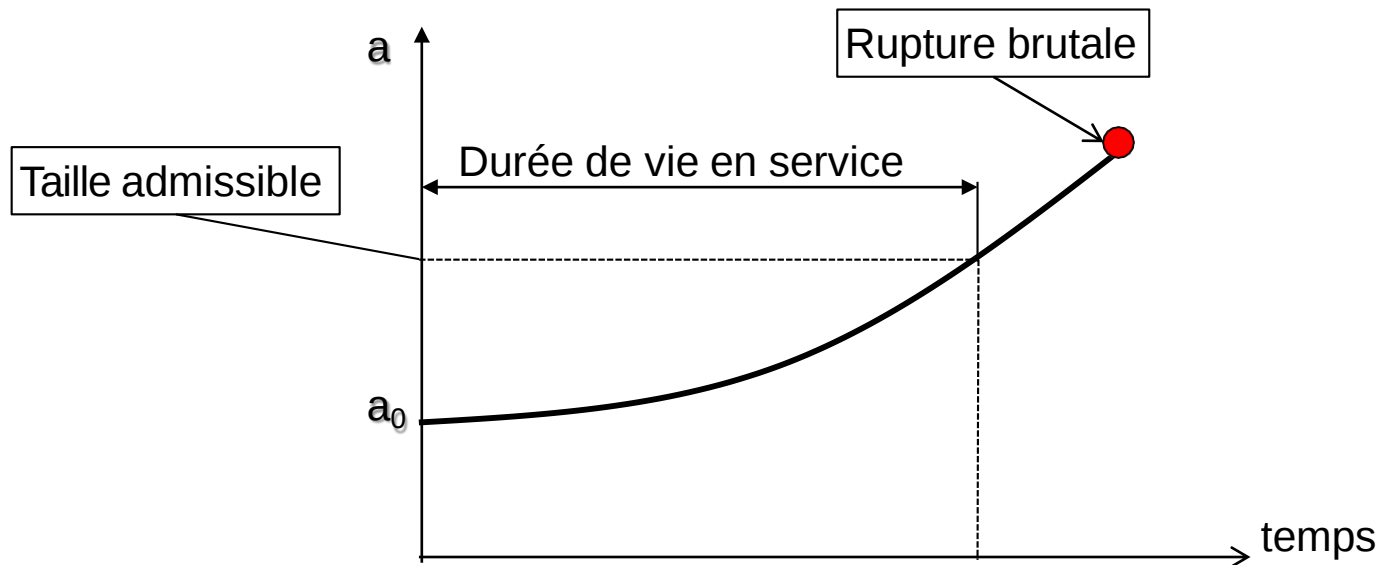
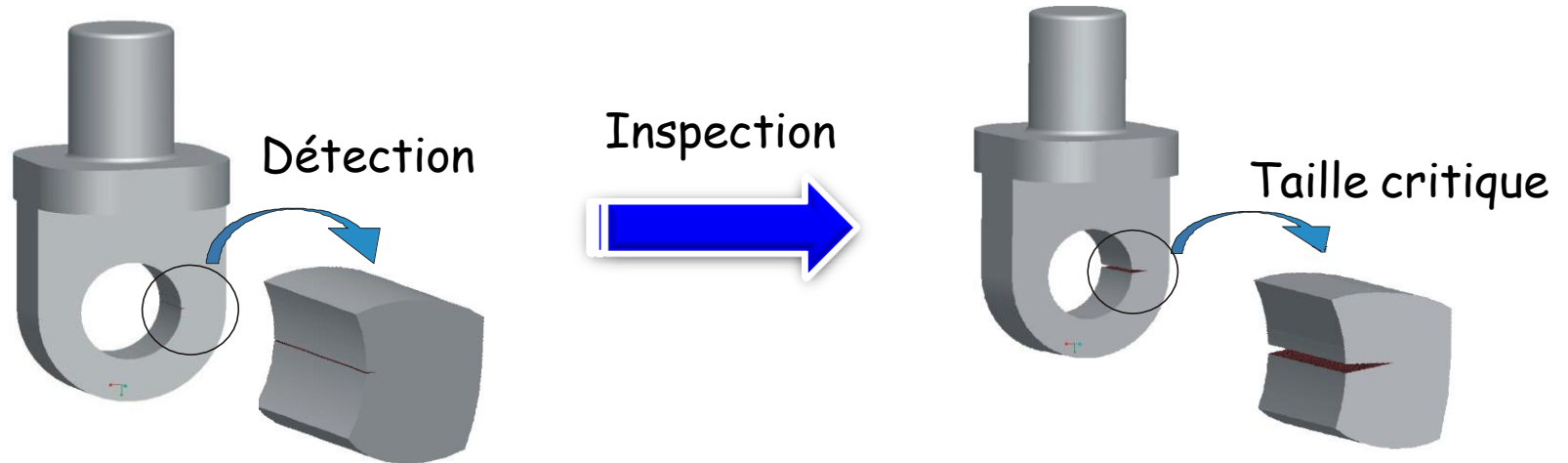
1. Concept Safe Life
(Vie sûre) $N_p=0$



2. Concept Fail Safe
(Sureté intégrée)

Chapitre 1 INTRODUCTION

Concept de tolérance au dommage



❑ Chapitre 1 Introduction

- Aperçu historique
- Utilisation de la mécanique de la rupture en conception
- Propagation des fissures et concept de tolérance au dommage
- **Influence des propriétés des matériaux sur la rupture**
- Analyse dimensionnelle en mécanique de la rupture
- Mécanismes de ruptures et de propagation des fissures

❑ Chapitre 2 Mécanique linéaire de la rupture (MLR)

❑ Chapitre 3 Mécanique non-linéaire de la rupture (MNLRL)

❑ Chapitre 4 Propagation des fissures par fatigue

❑ Chapitre 5 Méthodes numériques en mécanique de la ruptures

4. Influence des propriétés des matériaux sur la rupture

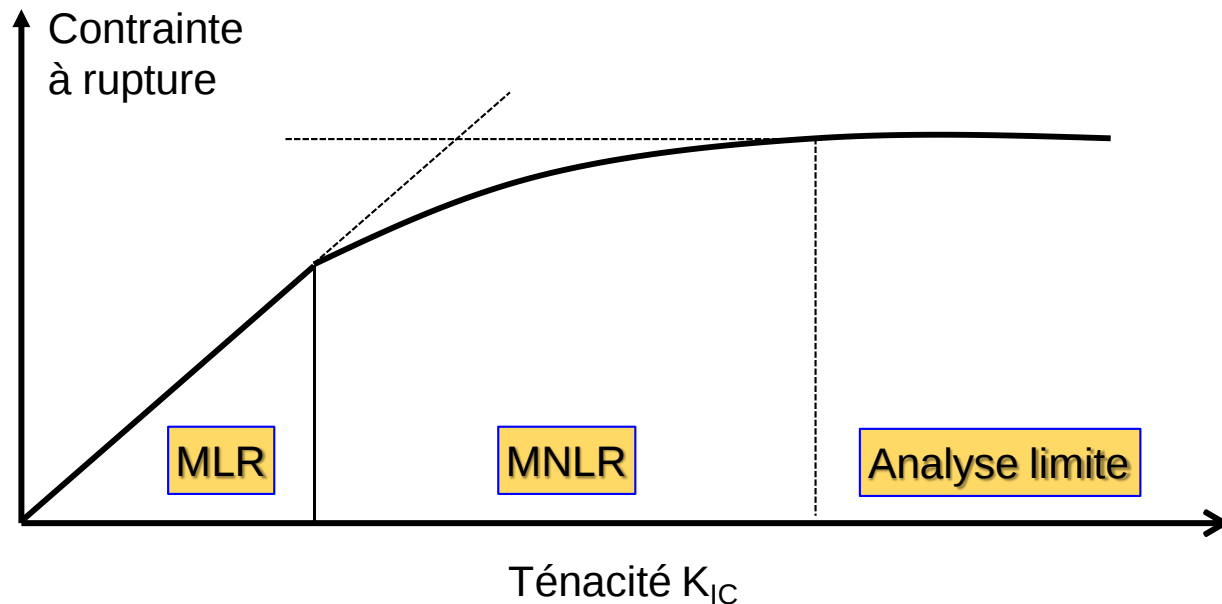
Selon le comportement physique d'un matériau, on utilise les concepts adaptés de la mécanique de la rupture.

- ❑ La mécanique linéaire de la rupture (MLR) pour les matériaux dont le comportement est essentiellement linéaire élastique. Les alliages d'aluminium à précipitation durcissante, les aciers à haute limite élastique, les céramiques... font partie de cette catégorie.
- ❑ La mécanique non linéaire de la rupture (MNLR) ou mécanique élastoplastique de la rupture (MEPR) , pour les matériaux ductiles tels que les aciers à faible ou moyenne résistance, les inox ou aciers austénitiques, les alliages de cuivre... .
- ❑ La mécanique viscoélastique de la rupture (MVER) pour essentiellement les polymères sollicités à des températures au dessous de la température de transition vitreuse.
- ❑ La mécanique viscoplastique de la rupture (MVPR) pour les polymères au dessus de la température de transition, pour les métaux et les céramiques sollicités à haute température.

Chapitre 1 INTRODUCTION

La MLR et la MEPR sont indépendantes du temps. Le temps intervient explicitement dans le comportement pour la MVER et la MVPR.

La MEPR, la MVER et la MVPR sont souvent regroupées dans le domaine élargi de la mécanique non linéaire de la rupture (MLNR).



Comportement en fonction de la ténacité

❑ Chapitre 1 Introduction

- Aperçu historique
- Utilisation de la mécanique de la rupture en conception
- Propagation des fissures et concept de tolérance au dommage
- Influence des propriétés des matériaux sur la rupture
- **Analyse dimensionnelle en mécanique de la rupture**
- Mécanismes de ruptures et de propagation des fissures

❑ Chapitre 2 Mécanique linéaire de la rupture (MLR)

❑ Chapitre 3 Mécanique non-linéaire de la rupture (MNLR)

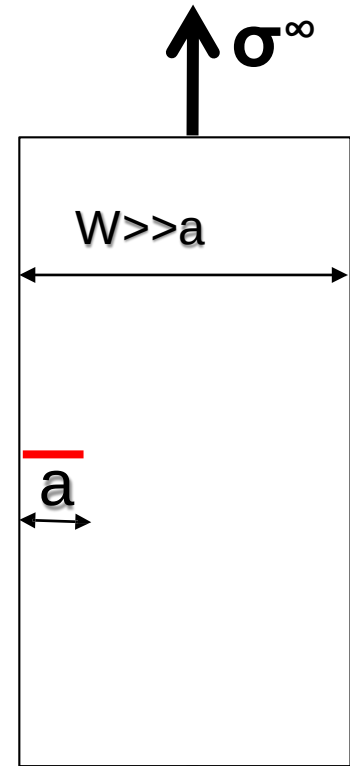
❑ Chapitre 4 Propagation des fissures par fatigue

❑ Chapitre 5 Méthodes numériques en mécanique de la ruptures

I.5 Analyse dimensionnelle en mécanique de la rupture

□ La figure (a) représente une fissure de bord de très petite dimension par rapport à celles de la plaque qui peut être alors considérée comme un milieu infini si on se place à l'échelle de la fissure ; la plaque est constituée d'un matériau dont le comportement est linéaire élastique.

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_{\infty}} = F_1 \left(\frac{E}{\sigma_{\infty}}, \frac{r}{a}, \nu, \theta \right)$$

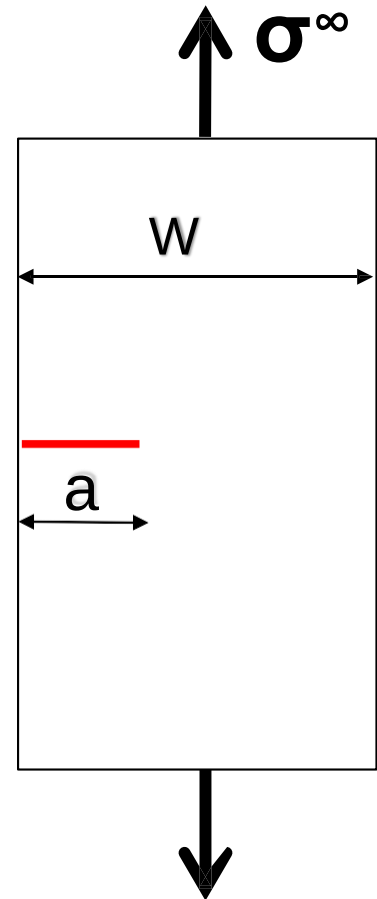


(a)

I.5 Analyse dimensionnelle en mécanique de la rupture

□ La taille de la fissure de la figure (b) n'est plus négligeable et donc la largeur W de l'éprouvette est une variable additionnelle par rapport au cas précédent.

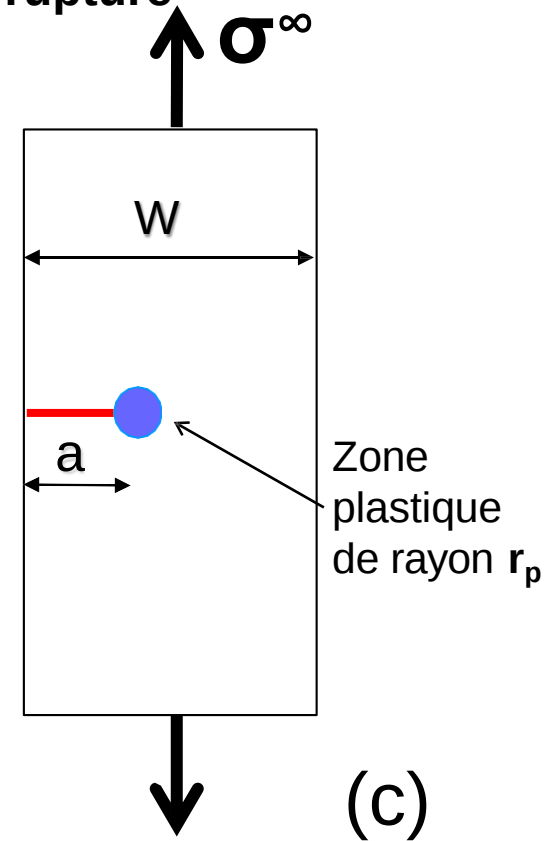
$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_{\infty}} = F_2 \left(\frac{E}{\sigma_{\infty}}, \frac{r}{a}, \frac{W}{a}, \nu, \theta \right)$$



(b)

I.5 Analyse dimensionnelle en mécanique de la rupture

□ Le cas de la figure (c) constitue la même configuration de chargement que le cas (b) mais le matériau est élastoplastique (élastique plastique parfait) et donc deux autres variables vont s'ajouter : la limite d'élasticité du matériau et la taille de la zone plastifiée qui se forme à l'extrémité de la fissure.



$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_\infty} = F_3 \left(\frac{E}{\sigma_\infty}, \frac{\sigma_E}{\sigma_\infty}, \frac{r}{a}, \frac{W}{a}, \frac{r_p}{a}, \nu, \theta \right)$$

❑ Chapitre 1 Introduction

- Aperçu historique
- Utilisation de la mécanique de la rupture en conception
- Propagation des fissures et concept de tolérance au dommage
- Influence des propriétés des matériaux sur la rupture
- Analyse dimensionnelle en mécanique de la rupture
- **Mécanismes de ruptures et de propagation des fissures**

❑ Chapitre 2 Mécanique linéaire de la rupture (MLR)

❑ Chapitre 3 Mécanique non-linéaire de la rupture (MNLR)

❑ Chapitre 4 Propagation des fissures par fatigue

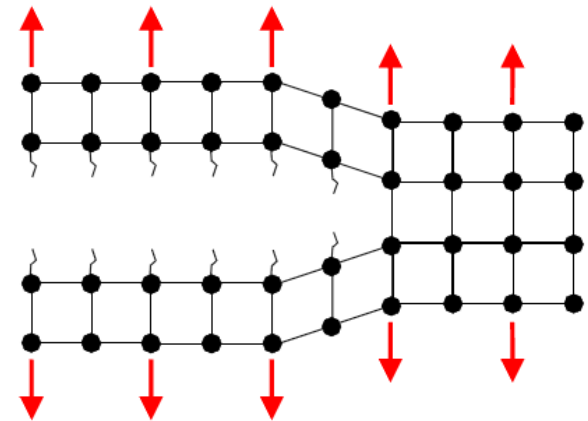
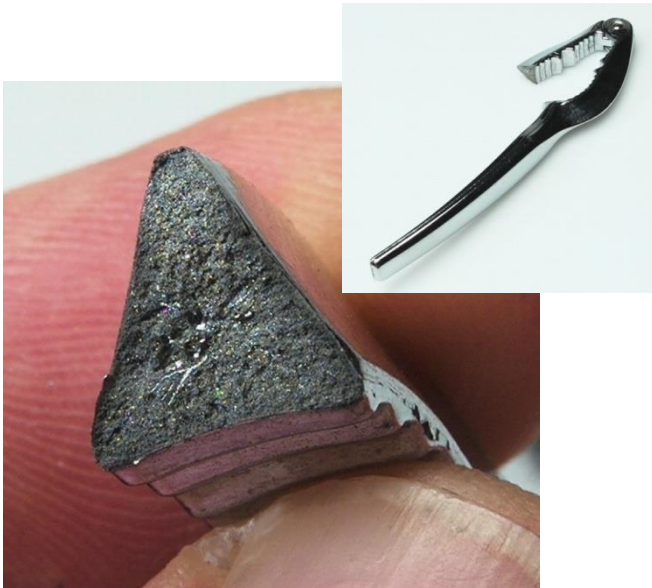
❑ Chapitre 5 Méthodes numériques en mécanique de la ruptures

Chapitre 1 INTRODUCTION

I.6 Mécanismes de rupture et de propagation des fissures

1.6.1 Rupture fragile

La rupture fragile se produit sans déformation appréciable, et par une propagation rapide de la fissure. La surface de rupture est plane, et est perpendiculaire à l'effort de traction.



Rupture par clivage

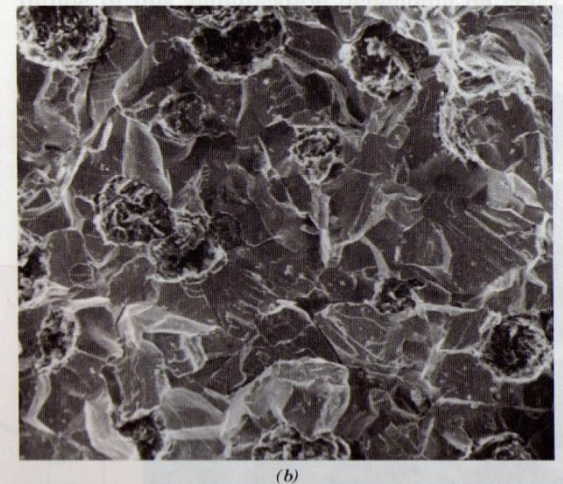
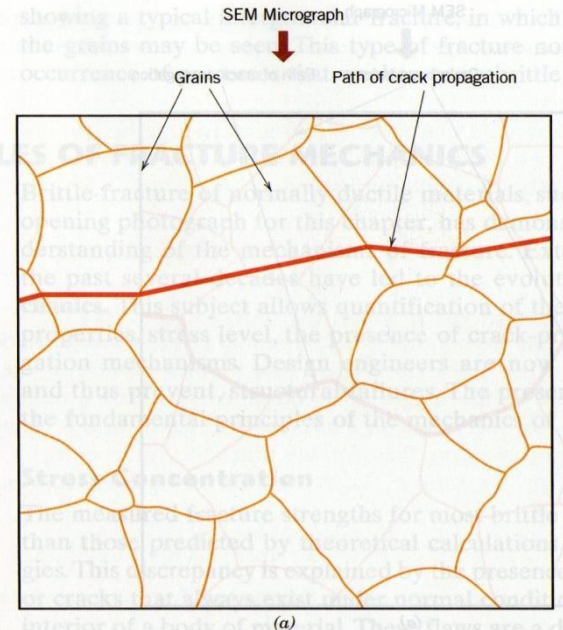
I.6 Mécanismes de rupture et de propagation des fissures

1.6.1 Rupture fragile

Rupture fragile **transgranulaire** dans un matériau cristallin.

Représentation schématisée d'une rupture fragile transgranulaire

Image MEB montrant une propagation de fissure à travers les grains pour une rupture transgranulaire



I.6 Mécanismes de rupture et de propagation des fissures

1.6.1 Rupture fragile

Rupture fragile **intergranulaire** dans un alliage.

Représentation schématisée d'une rupture fragile intergranulaire

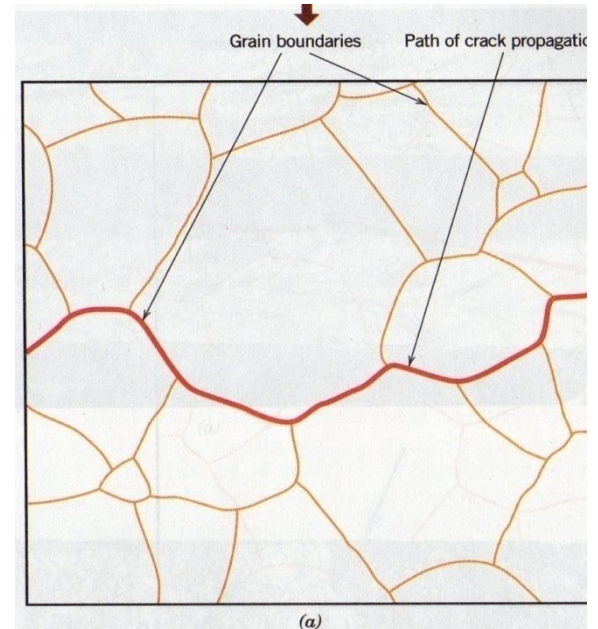
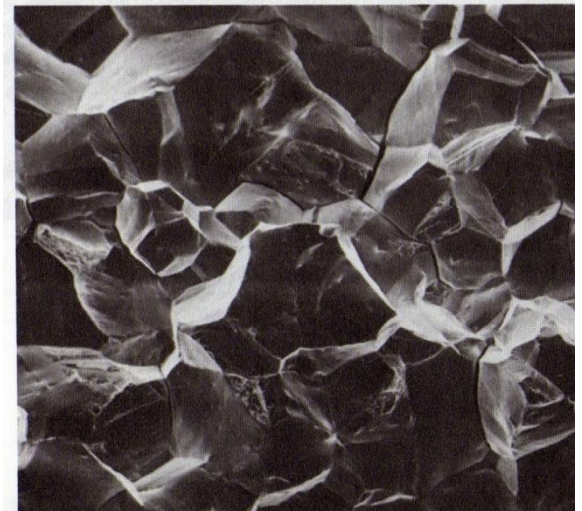


Image MEB montrant une propagation de fissure le long des frontières des grains

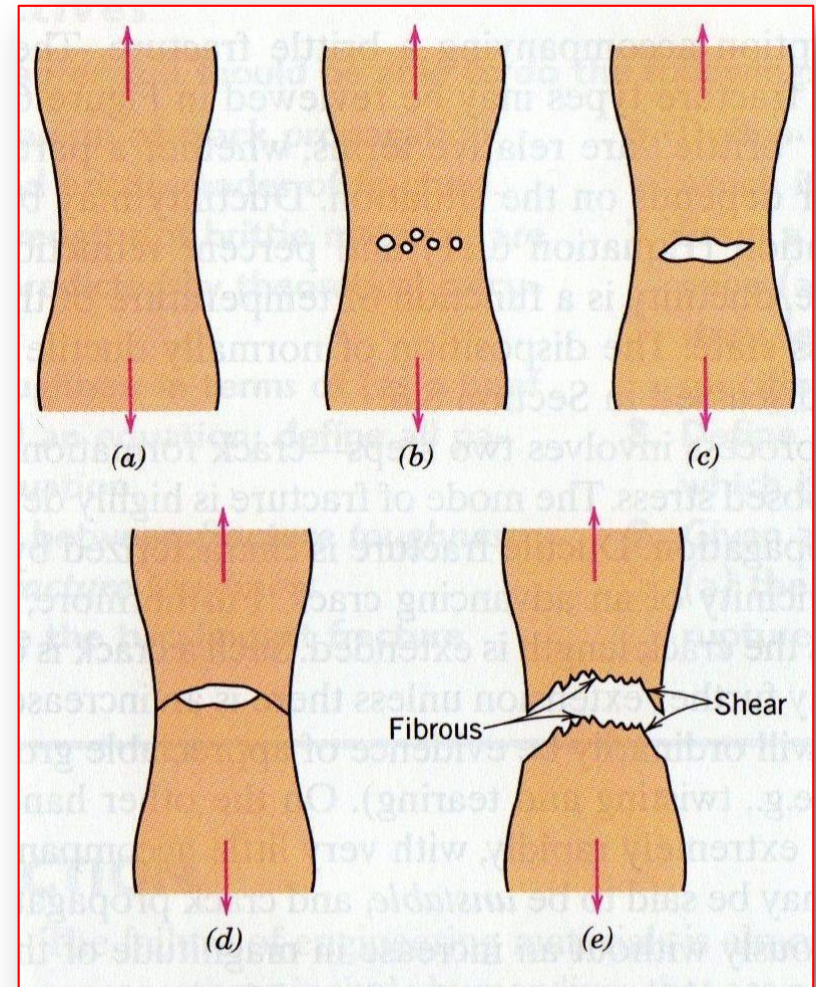


Chapitre 1 INTRODUCTION

I.6 Mécanismes de rupture et de propagation des fissures

1.6.2 Rupture ductile

- a) Étrangement initial
- b) Formation de microcavités
- c) Formation d'une fissure par coalescence des cavités
- d) Propagation de la fissure
- e) Rupture



I.6 Mécanismes de rupture et de propagation des fissures

1.6.2 Rupture ductile

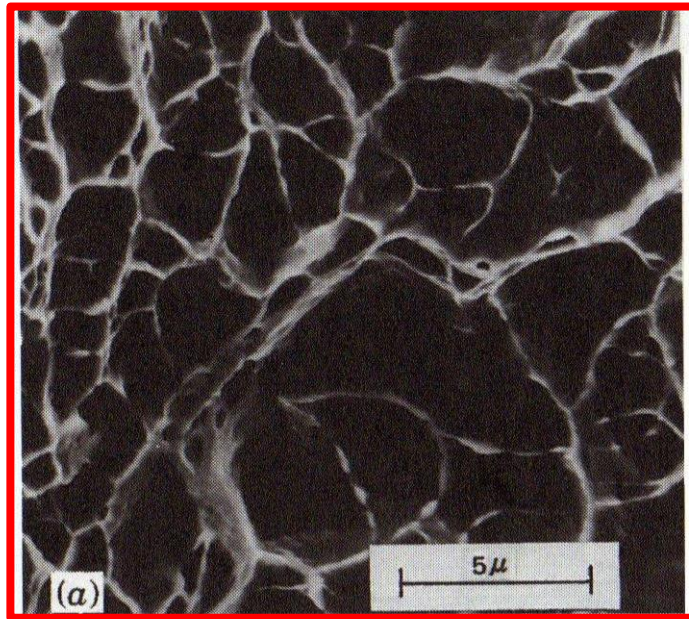


Image MEB (3300X) montrant des bosses sphériques caractéristique d'une rupture ductile par traction uni-axiale.

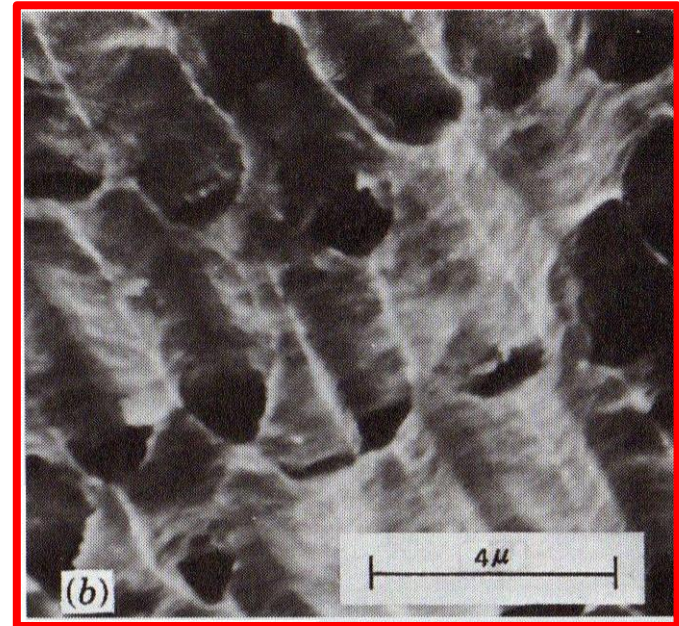
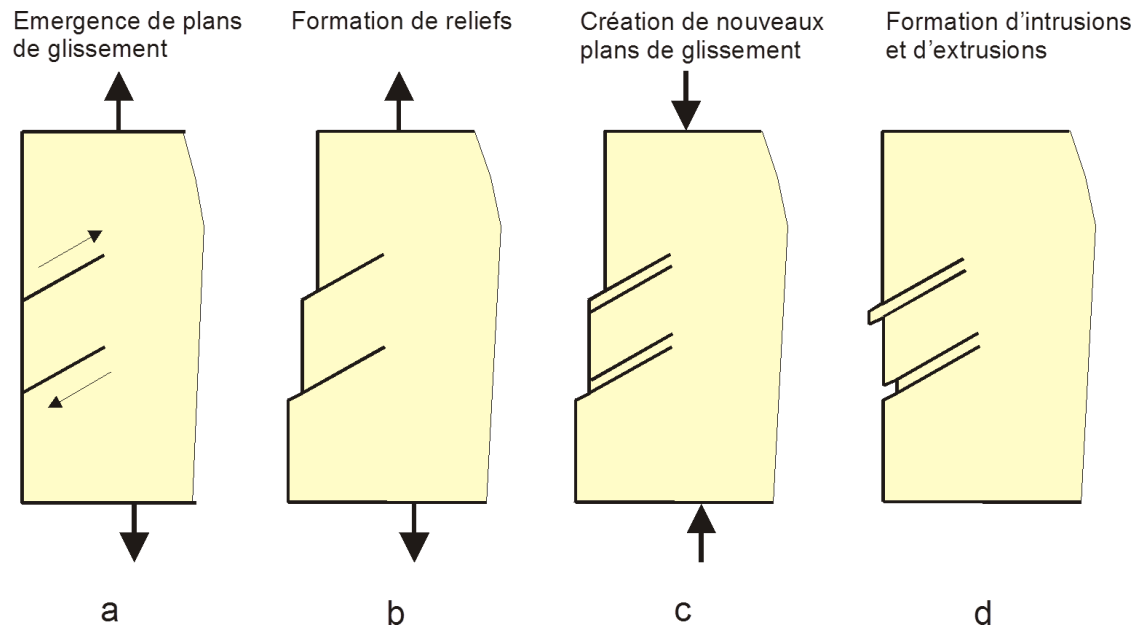


Image MEB (5000X) montrant des bosses paraboliques caractéristique d'une rupture ductile par cisaillement.

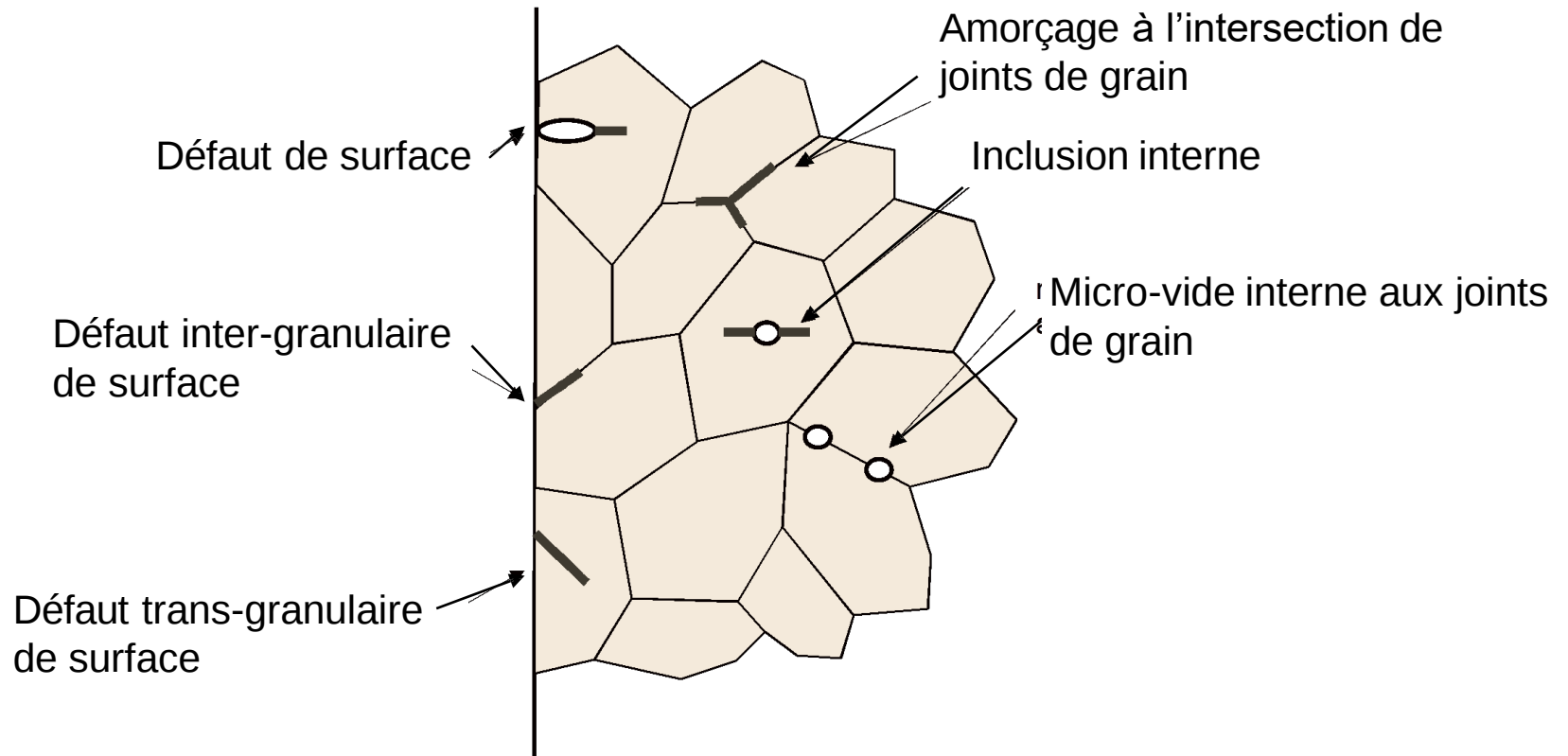
I.6 Mécanismes de rupture et de propagation des fissures

1.6.3 Rupture par fatigue (modèle de WOOD)



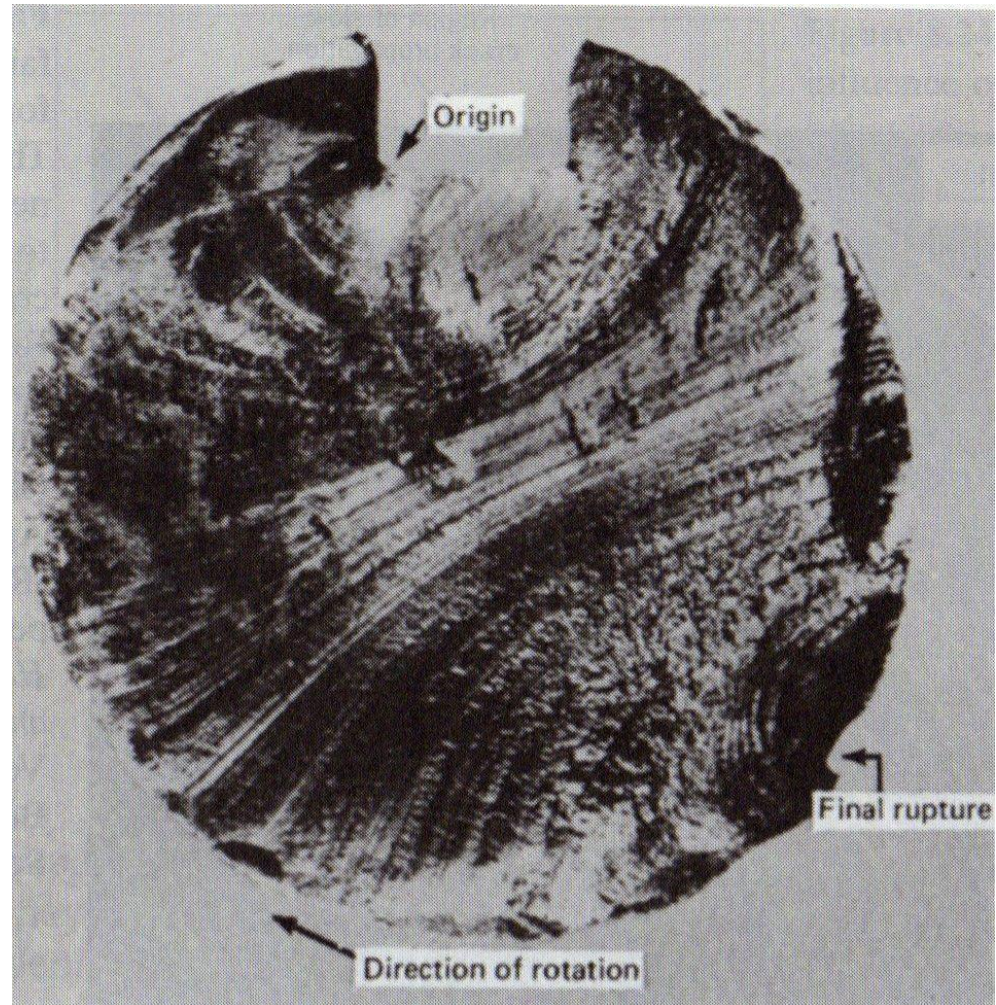
Dans les polycristaux, la fissure apparait généralement au sein des bandes persistantes de glissement, sites préférentiels d'amorçage.

Chapitre 1 INTRODUCTION



Différents sites d'amorçage de fissures

Surface de rupture, par fatigue rotative, d'un arbre en acier



Surface de rupture par fatigue:
une propagation lente de la
fissure (zone lisse en haut)
suivie d'une rupture fragile
(surface de texture mate et
fibreuse)



Fin du chapitre I