

mécanique de la rupture

02

DR, BELHOCINE ABDELGHANI
UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA
FACULTÉ DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
EMAIL : ABDELGHANI.BELHOCINE@UNIV-M 'SILA.DZ

janvier 2024

Légende



Entrée du glossaire



Abréviation

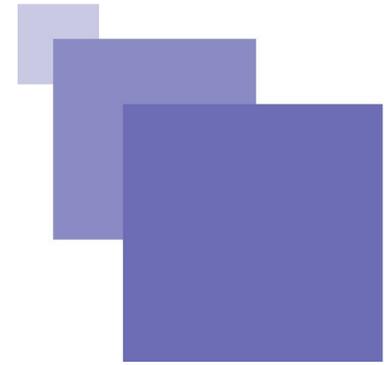


Référence Bibliographique



Référence générale

Table des matières



Objectifs	5
I - chapitre I : généralités sur la mécanique de la rupture	7
A. Introduction.....	7
B. teste de prérequis.....	9
C. Définition.....	10
1. La rupture fragile.....	10
2. La rupture ductile.....	11
3. Modes de rupture.....	13
D. Utilisation de la mécanique de la rupture en conception.....	14
1. Analyse des contraintes au voisinage d'un trou elliptique.....	15
2. Approche énergétique.....	16
E. Influence des propriétés des matériaux sur la rupture.....	17
F. Matériaux sous contrainte.....	18
Conclusion	21
Solution des exercices	23
Glossaire	25
Signification des abréviations	27

Objectifs

Cette unité d'enseignement porte sur l'intégrité des structures fondée sur la mécanique de la rupture et qui a pour but de **prévoir la fiabilité**, la **durée de vie** et la **sécurité de composants** industriels de dimensions, géométries ou matériaux variés. Nous avons pour objectif de présenter et de pratiquer les démarches modernes et efficaces de dimensionnement en présence de fissures selon le mode de fissuration envisagé.

La mécanique linéaire de la rupture permet de répondre à la plupart des problématiques rencontrées et des modélisations plus complexes, et des simulations numériques permettent de prendre en compte de manière plus réaliste la physique du cas traité (plasticité, multiaxialité, couplages multi physiques

- Comprendre les objectifs de l'étude de la rupture des matériaux.
- Connaître les caractéristiques des sollicitations simples.
- Découvrir les apports de la modélisation par éléments finis.

chapitre I : généralités sur la mécanique de la rupture

Introduction	7
teste de prérequis	9
Définition	10
Utilisation de la mécanique de la rupture en conception	14
Influence des propriétés des matériaux sur la rupture	17
Matériaux sous contrainte	18

A. Introduction

Les défauts sont présents pratiquement dans toutes les structures métalliques, ils apparaissent lors de la fabrication essentiellement. A la solidification, les variations de volume, de température et de composition, induisent des séries de défauts, les soudures exacerbent les mêmes phénomènes. L'usinage et les traitements thermiques peuvent être à l'origine de fissurations dans l'état final des pièces.

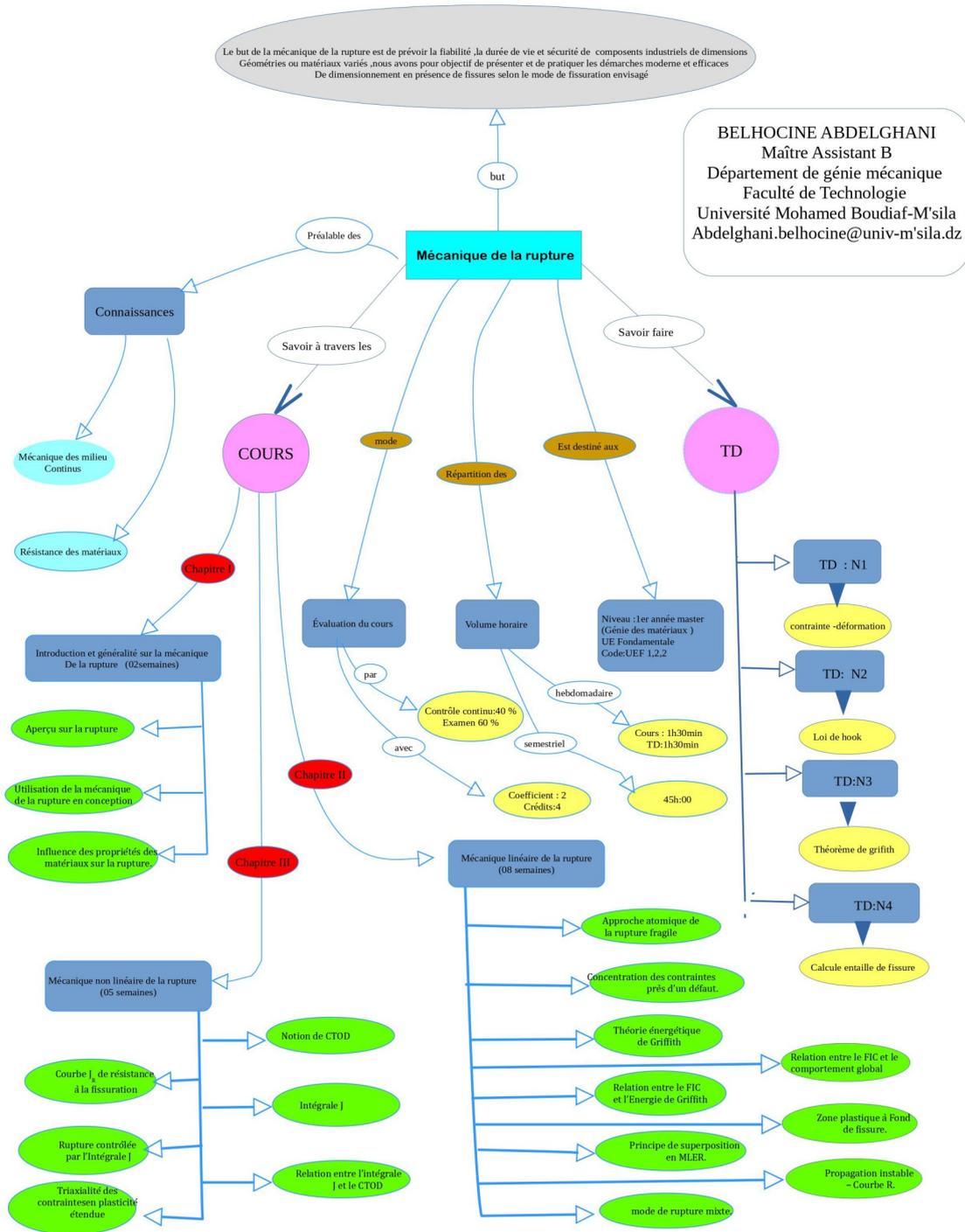
Lorsqu'un matériau est sollicité jusqu'à rupture, les essais montrent que la contrainte de rupture σ_R est une grandeur présentant de fortes fluctuations pouvant même dépasser la décade pour certains matériaux et que le mode de ruine dépend de la nature du matériau. <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Mecanique-de-la-rupture.html>

Ainsi la rupture peut intervenir brutalement sans déformation préalable pour les matériaux dite fragiles, tandis qu'elle n'intervient qu'après une étape de grande déformation permanente pour les matériaux dite ductiles. Nous savons maintenant que les matériaux fragiles **rompent brutalement** au de la d'une certaine tension, tandis que les matériaux ductiles **s'écoulent plastiquement** sous cisaillement avant de rompre.

ce module présent une initiation à la mécanique de la rupture en se basant sur les études faites sur les matériaux ductile et fragile, et sur Théorie de la rupture de Griffith

Comme l'illustre la carte mentale/conceptuelle, ce document présente des notes de cours, ainsi que des séries d'exercices pour consolider les connaissances acquises

dans le module . Cette brochure de cours est destinée principalement aux étudiants de première année master .



carte mentale

Cf. "youtube (youtub)"
youtube

C. Définition

Le mécanisme de rupture est un processus mécanique produisant au sein d'un matériau une discontinuité locale de matière appelée fissure.

La mécanique de la rupture a pour objet l'étude du comportement mécanique d'un matériau en présence de fissures macroscopiques.

On distingue deux types de rupture

Concepts fondamentaux.pdf
Document 1 Concepts fondamentaux

Rupture Notions et généralités.docx
Document 2 Rupture Notions et généralités

1. La rupture fragile

la rupture fragile est caractérisée par l'absence de déformation plastique macroscopique, et donc par la propagation très rapide possible présente des fissures, et Consommation d'énergie très faible. Au point de vue microscopique, la rupture fragile se caractérise par un processus de rupture localisé essentiellement à l'intérieur des grains (rupture transgranulaire⁽¹⁾⁽²⁾), le long de plans atomiques bien définis (Fig 1).

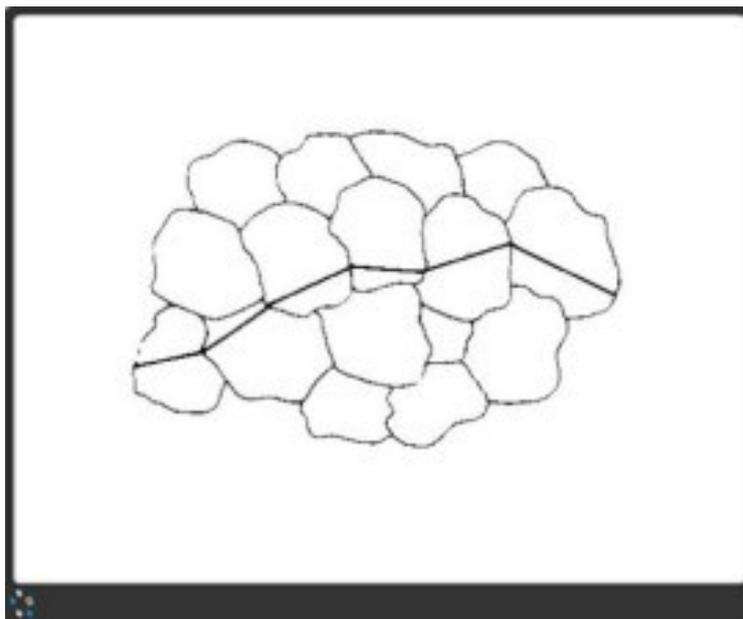


Fig1 : rupture transgranulaire

a) Faciès de rupture fragile

Les faciès caractéristiques de rupture, déterminés généralement à l'aide de microscopie optique de grande agrandissement ou électronique à balayage. Fig2

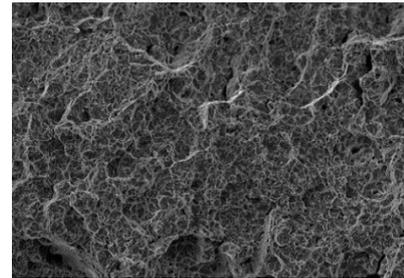


Image 1 Fig 2 : Faciès de rupture fragile

i Allure de diagramme charge-déplacement

la rupture fragile est caractérisée par l'absence de déformation plastique macroscopique, fig 3

RUPTURE FRAGILE

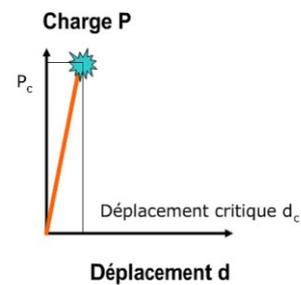


Image 2 Fig 3 : Allure de diagramme charge-déplacement

2. La rupture ductile

la rupture ductile liée essentiellement à la présence d'inclusion. Dans ce mode de rupture, la déformation plastique macroscopique est importante et requiert beaucoup d'énergie pour rompre une pièce.

Le mécanisme microscopique de la rupture ductile consiste en trois étapes (Fig 4)

- décohésion de la matrice métallique autour d'inclusions, de taille typique de quelques μm , et donc création d'une cavité.
- grossissement de cavités par plasticité.
- coalescence des cavités et formation d'un défaut macroscopique.

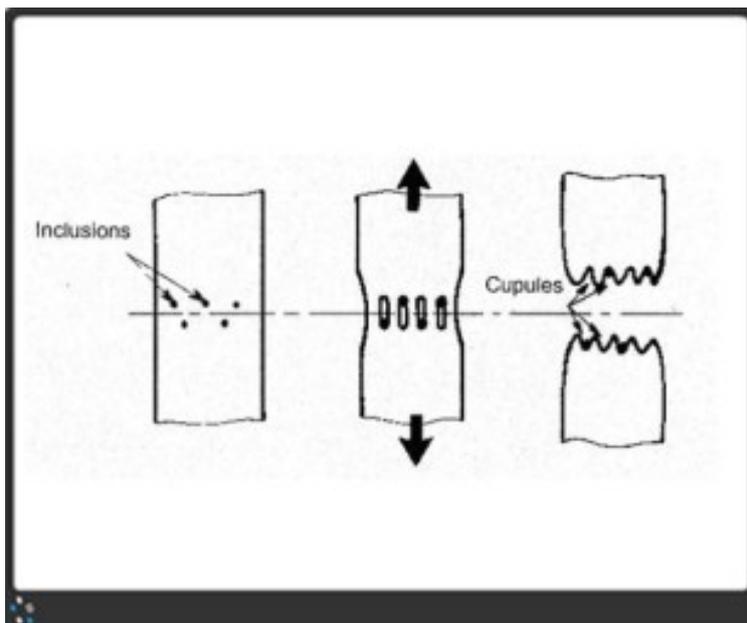


Fig4 : mécanisme de la rupture ductile

a) Faciès de rupture ductile

La rupture ductile est précédée d'une déformation plastique importante : l'aspect est granuleux, on observe souvent des cupules liés à une décohésion autour des inclusions, photo obtenue par MEB .fig5

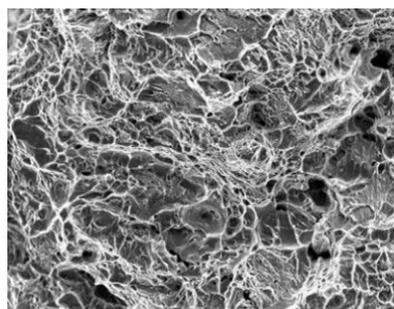


Image 3 Fig5 : Faciès de rupture ductile



Remarque

Les points noirs sont des inclusions qui augmentent avec l'augmentation des forces ou contraintes

i Allure de diagramme charge-déplacement

Dans ce mode de rupture, la déformation plastique macroscopique est importante .fig 6

RUPTURE DUCTILE

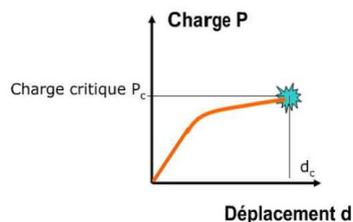


Image 4 Fig 6 : Allure de diagramme charge-déplacement

3. Modes de rupture

La fissuration se manifeste par la séparation irréversible d'un milieu continu en deux parties, appelées **lèvres de la fissure**, ce qui introduit une discontinuité au sens des déplacements. Les mouvements possibles des lèvres de chaque fissure sont des combinaisons de trois modes indépendants .fig 7

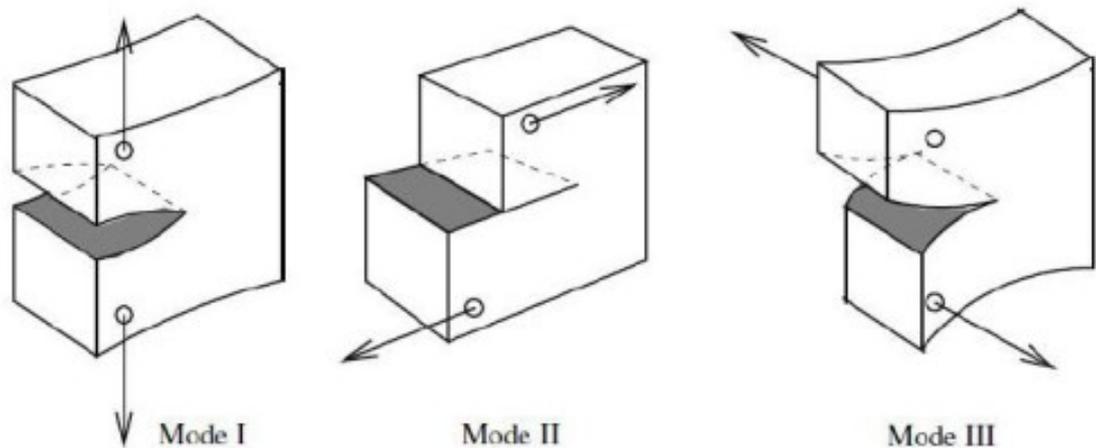


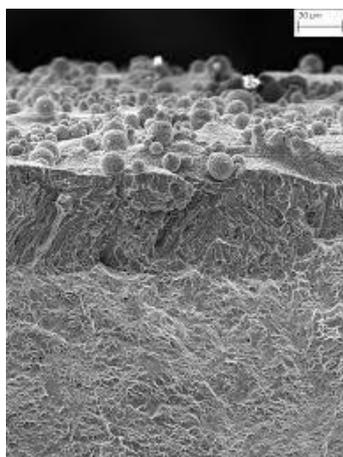
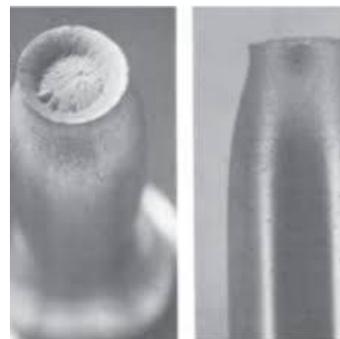
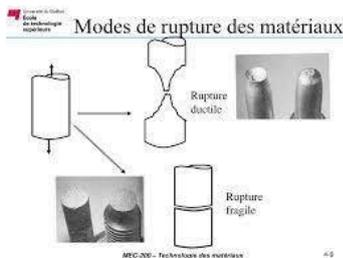
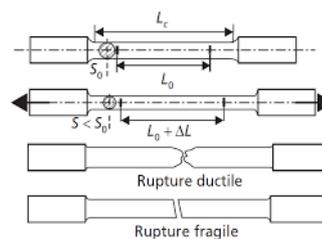
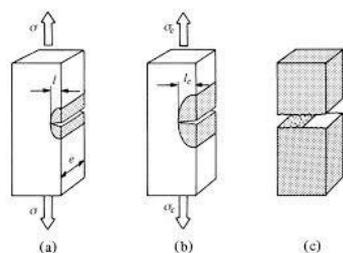
Fig 7 : Modes de rupture

Cf. "conception de la rupture (web)"
conception de la rupture

Mode I : ouverture ou **clivage**, les surfaces de la fissure se déplacent perpendiculairement au plan de fissure ;

Mode II : cisaillement plan, **glissement de translation** : les surfaces de la fissure se déplacent dans le plan de fissure et dans une direction perpendiculaire au front de fissure ;

Mode III : cisaillement anti-plan, **glissement de rotation** : les surfaces de la fissure se déplacent dans le plan de fissure et dans une direction parallèle au front de la fissure.



processus de la rupture

D. Utilisation de la mécanique de la rupture en conception

On distingue deux catégories de rupture des structures :

- Soit une négligence dans la conception, dans la construction ou dans l'utilisation de la structure.
- Soit l'utilisation d'un nouveau matériau ou d'un nouveau procédé, qui peut provoquer 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 œuvre de nouvelles techniques, bien qu'elle procure des avantages, conduit inévitablement à des problèmes potentiels.

Avant le développement de la mécanique de la rupture, le dimensionnement des structures utilisait la démarche « **Résistance des matériaux** » appelée aussi, « **approche classique** ». (figure 8.1) L'approche basée sur la mécanique linéaire de la rupture est en revanche à trois variables : la contrainte appliquée σ , la ténacité KC (qui remplace la limite d'élasticité) et une nouvelle variable attachée cette fois-ci à la taille du défaut. (figure 8.2) Pour cette même approche, deux études alternatives sont possibles : l'une utilise un critère d'énergie et l'autre le concept d'intensité des contraintes critique. Ces deux études sont, sous certaines conditions, équivalentes. Dans les deux prochaines sections, nous présentons brièvement ces deux études alternatives pour ensuite, en préciser les hypothèses et en exposer les calculs.



Fig 8.1: Approche classique (RDM)

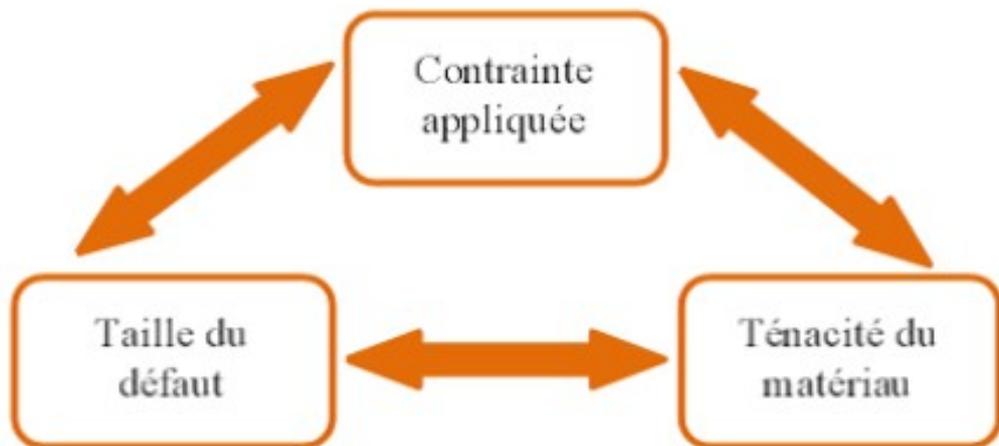


Fig 8.2 : Approche utilisant la mécanique linéaire de la rupture

1. Analyse des contraintes au voisinage d'un trou elliptique

C'était la première approche D'INGLIS en 1913.☺ Il a montré que la contrainte au fond du trou elliptique d'une plaque chargée en traction σ est beaucoup plus élevée que la contrainte dans un champ lointain (figure 9).

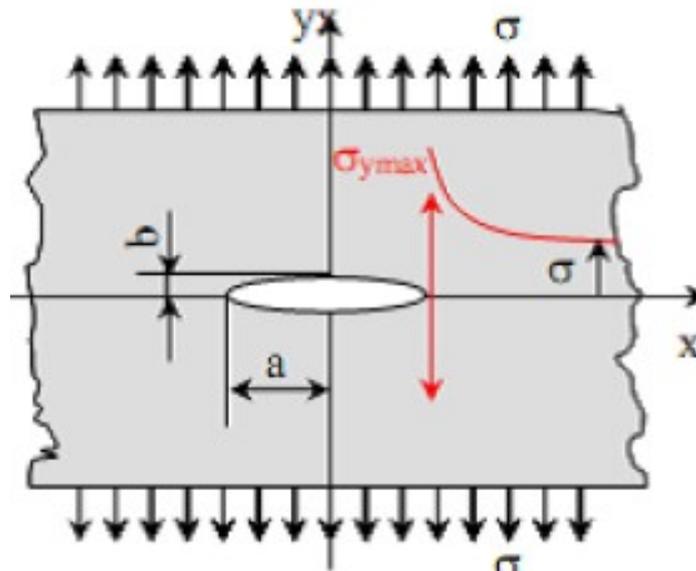


Fig 9 : Analyse des contraintes au voisinage d'un trou elliptique

2. Approche énergétique

Pour un solide élastique possédant une fissure S , la propagation de celle-ci entraîne une modification de son aire. Griffith exprime la conservation de l'énergie totale du système.

- 1. dW_{elast} : variation de l'énergie élastique
- 2. dW_{ext} : variation de l'énergie potentielle des forces extérieures ou travail de ces forces (données) changé de signe
- 3. dW_s : énergie dissipée dans la séparation, $W_s = 2\gamma dS$, γ étant énergie de surface (J/m^2) caractéristique du matériau, dS l'accroissement d'aire de la fissure, étant dû aux deux faces de la fissure
- 4. dW_{cin} : variation d'énergie cinétique.

La fissure se propagera de façon instable si $dW_{cin} > 0$, c'est-à-dire :

$$\partial / \partial s = (W_{elast} + W_{ext}) + 2\gamma < 0 \quad (I.1)$$

$$\text{Avec } W_{elast} = 1/2 \sigma \epsilon s a_0 \quad (I.2)$$

Par définition, le taux de restitution d'énergie G est :

$$G = \partial / \partial s = (W_{elast} + W_{ext}) \quad (I.3)$$

Le critère de propagation de Griffith se traduit par :

$$G > 2\gamma$$

L'initiation de la propagation à partir de la configuration S est possible lorsque :

$$G_c = 2\gamma$$

Dès que G est supérieur à 2γ , une partie de l'énergie disponible sert précisément à rompre les liaisons : c'est l'énergie de séparation. L'excès d'énergie ($G - 2\gamma$) transformé en énergie cinétique, qui pourrait à son tour, s'il n'y avait pas d'autre apport d'énergie extérieure, se dissiper dans la séparation de surface nouvelle. Ce processus peut mener à la propagation instable. Si les sollicitations extérieures sont telles que l'égalité

$$G = 2\gamma$$

Soit vérifiée à tout moment, alors il n'y a pas d'accroissement d'énergie cinétique : la rupture est contrôlée et la croissance de la fissure est stable

Pour qu'il y ait rupture ($\sigma = R_{th}$)

$w_{elast} \geq w_s$

$\frac{1}{2} \sigma \varepsilon s a_0 \geq 2\gamma_s s$ avec a_0 : paramètre de maille

La résistance théorique à la traction : $R_{th} = 2\sqrt{E \gamma_s / a_0} \approx E/10$ (I.4)

E. Influence des propriétés des matériaux sur la rupture

En mécanique de la rupture, le choix du concept varie selon le comportement physique du matériau. La classification usuelle de ces concepts est la suivante :

- La mécanique linéaire de la rupture **MLR**★ pour les matériaux dont le comportement est essentiellement linéaire élastique, tels les alliages d'aluminium à précipitation durcissant, les aciers à haute limite élastique, les céramiques...
- La 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 dynamique de la rupture **MDR**★, linéaire ou non linéaire, pour les métaux sollicités à grandes vitesses de déformation dans ces conditions, le comportement peut aussi être viscoplastique.
- La mécanique viscoélastique de la rupture ★**MVER**, essentiellement pour 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 ou encore les métaux et les céramiques sollicités à haute température.



Remarque

1/ Si le temps n'agit pas en MLR et en MEPR, il intervient explicitement en MDR, MVER et MVPR.

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

Considérons à présent, une plaque fissurée chargée jusqu'à rupture. La figure 10 schématise la variation de la contrainte à rupture en fonction de la ténacité du matériau.

- Pour les matériaux à faible ténacité où la contrainte à rupture varie linéairement avec le K_{IC} , la rupture fragile est le principal mécanisme qui gouverne la ruine de la structure. C'est la MLR qui décrit donc le mieux ce genre de comportement.
- Pour les matériaux à très haute ténacité, la MLR n'est plus valable puisque les propriétés d'écoulement du matériau gouvernent le mécanisme de rupture. Une simple analyse de chargement limite permet alors de dimensionner les structures.
- Pour les matériaux à ténacité intermédiaire, la MNLR est souvent appliquée.

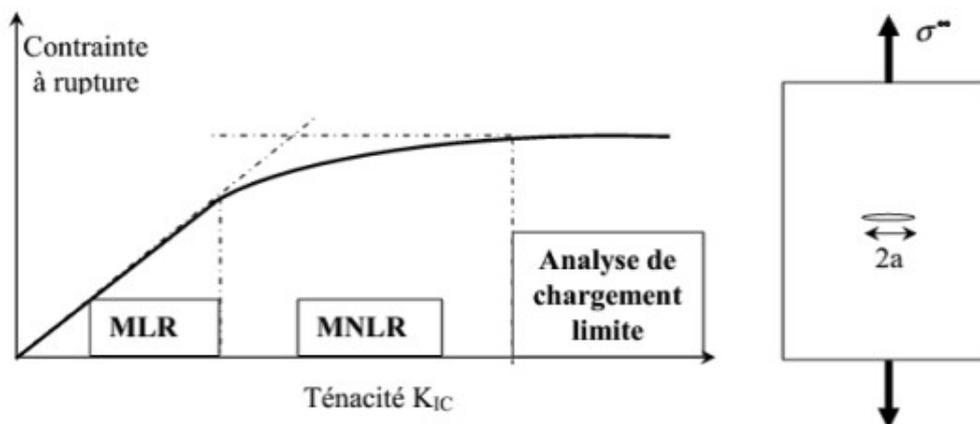


Fig 10 : Comportement en fonction de la ténacité

F. Matériaux sous contrainte

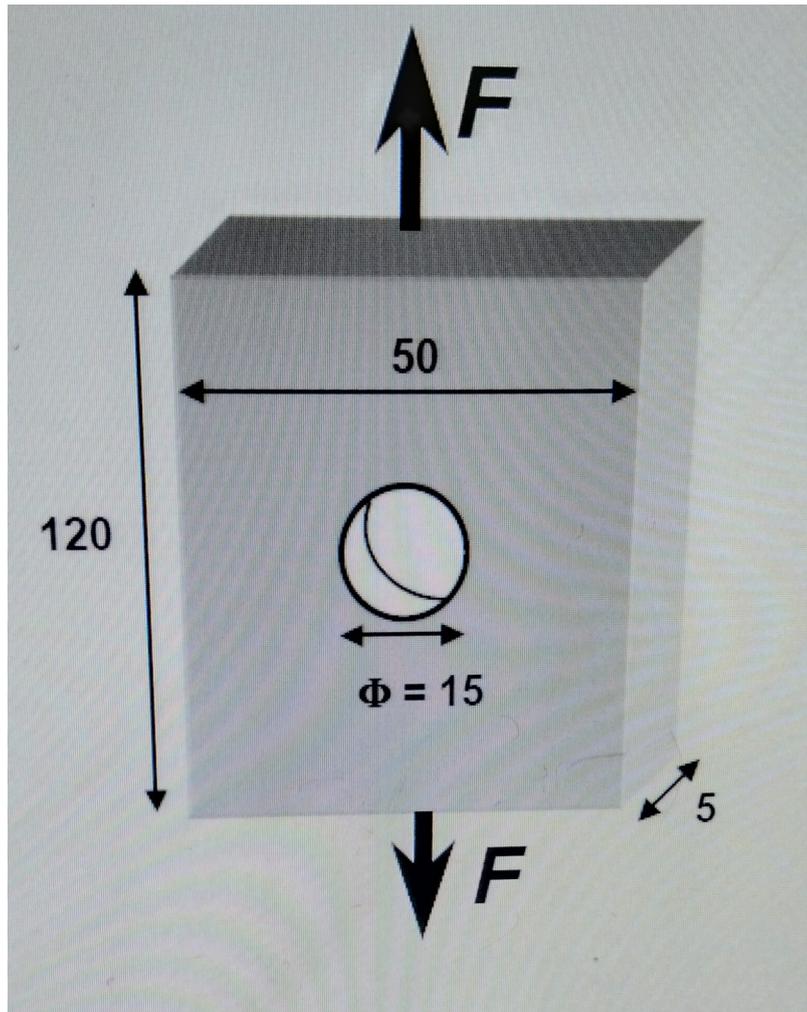
exercice appliqué

On veut fabriquer des plaquettes selon la figure ci-dessous. Ces plaquettes sont soumises à des efforts de traction. Pour les faire, on dispose de deux matériaux, une céramique (de l'alumine Al_2O_3) et un alliage d'aluminium. Les propriétés mécaniques de ces deux matériaux sont les suivantes:

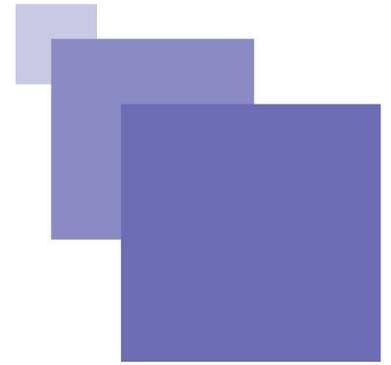
	Al_2O_3	ALUMINIUM
$R_{e0.2}$ (MPa)	-	40
R_m (MPa)	250	110
A (%)	0	30

tableau

- Lequel de ces matériaux peut se déformer plastiquement et à quelle force (kN) appliquée apparaît cette déformation?
- Quelle sera, pour chaque matériau, la force (en kN) causant la rupture de la plaquette?

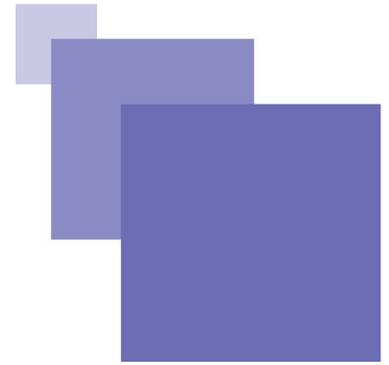


Conclusion



Le module Mécanique de la rupture dévoilera les fondamentaux de base de la mécanique, depuis la compréhension de la théorie de l'apparition de la déformation du matériau, jusqu'à la fin de la rupture. La présence d'une fissure dans une structure sous une charge, nécessite de connaître de manière précise son degré de nocivité. Lorsque cette fissure se propage, sous chargement, il est important d'évaluer rapidement l'évolution de ce degré de nocivité et plus concrètement la durée de vie résiduelle de la structure fissurée

Solution des exercices



> Solution n°1 (exercice p. 9)

- conception des systèmes ou des mécanismes mécanique
- calculer les forces et les contraintes appliqué sur un système

> Solution n°2 (exercice p. 9)

- un allongement
- un raccourcissement

> Solution n°3 (exercice p. 9)

- phénomène de fluage
- phénomène de flambage

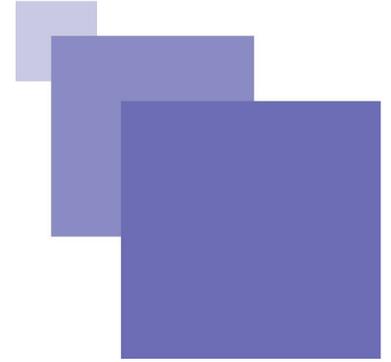
> Solution n°4 (exercice p. 9)

Lorsque l'on applique une **contrainte** σ sur une pièce, celle-ci commence par se **déformer** de manière réversible (déformation élastique), c'est-à-dire que ses dimensions changent mais que la pièce reprend sa **forme** initiale lorsque la sollicitation **s'arrête**.

Pour les matériaux dits ductiles, c'est-à-dire qui ont la capacité de se déformer sans se **rompre**, on déforme de manière définitive la pièce lorsque l'on augmente la sollicitation (déformation plastique). Lorsque l'on arrête la sollicitation, la pièce reste **déformée**.

La longévité et le bon fonctionnement des mécanismes imposent que les pièces restent dans le domaine élastique.

Glossaire



Cours Mécanique de la rupture-BENARIOUA

Cours Mécanique de la rupture-BENARIOUA

2y

puisque il y'a deux surfaces

[griffith] Alan Arnold Griffith (13 juin 1893 – 13 octobre 1963) est un ingénieur anglais passé à la postérité pour son interprétation magistrale de la rupture fragile et de la fatigue des métaux en termes de contraintes élastiques (1920). Par la suite, il fut le premier à mettre sur pied une théorie satisfaisante du turbopropulseur.

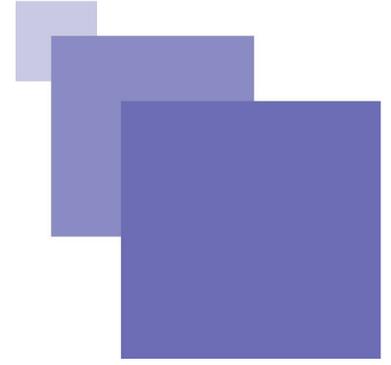
- **D'INGLIS en 1913**. Charles Edward Inglis ; né le 31 juillet 1875 - mort le 19 avril 1952) est un ingénieur des travaux publics britannique

- **KCI** ténacité en mode I

transgranulaire

la fracture se propage à l'intérieur des grain

Signification des abréviations



- MDR La mécanique dynamique de la rupture MDR
- MLR La mécanique linéaire de la rupture
- MVER La mécanique viscoélastique de la rupture MVER