

Chapitre I : généralités sur la mécanique de la rupture

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

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 localise essentiellement à l'intérieur des grains (rupture transgranulaire), le long de plans atomiques bien définis (Fig 1).

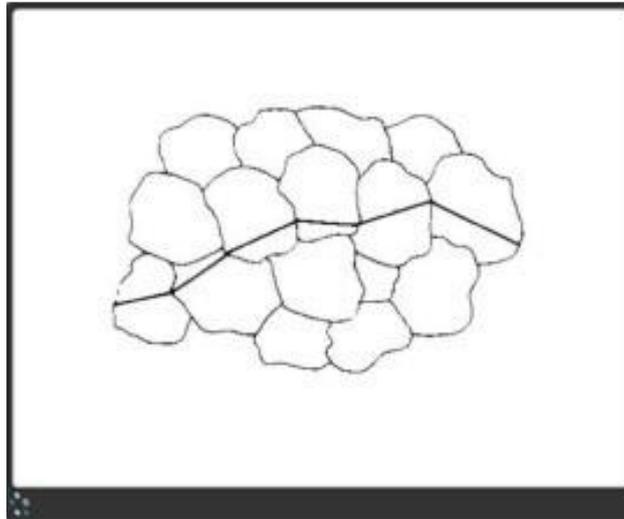


Fig1 : rupture Trans granulaire

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

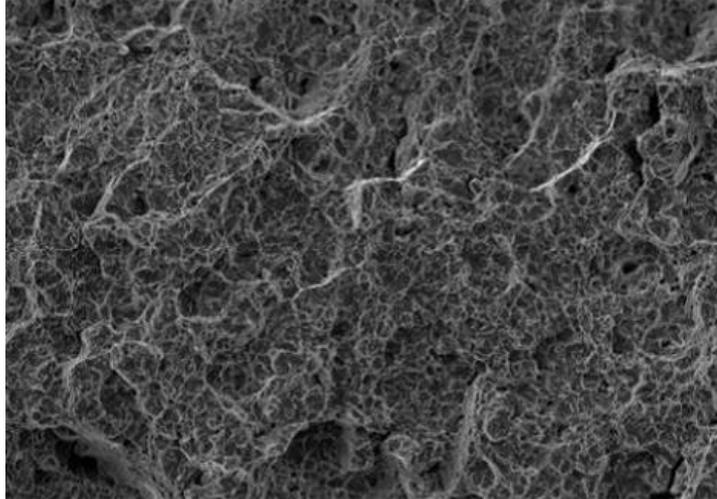


Fig 2 : Faciès de rupture fragile

b) Allure de diagramme charge-déplacement :

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

RUPTURE FRAGILE

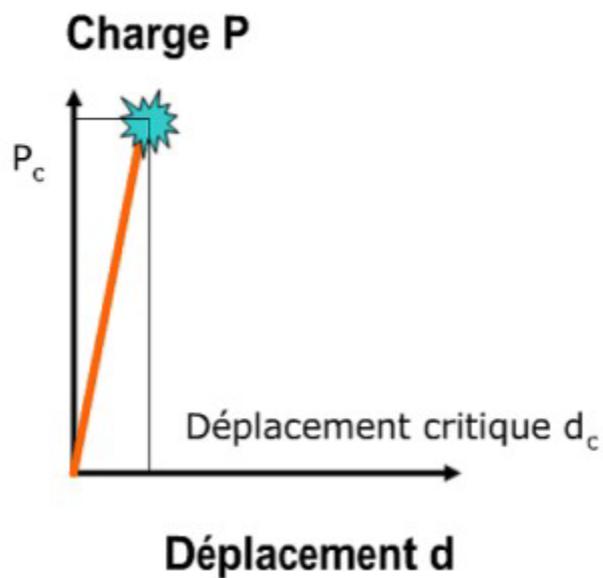


Fig 3 : Allure de diagramme charge-déplacement

2. La rupture ductile :

La rupture ductile liée essentiellement a 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.

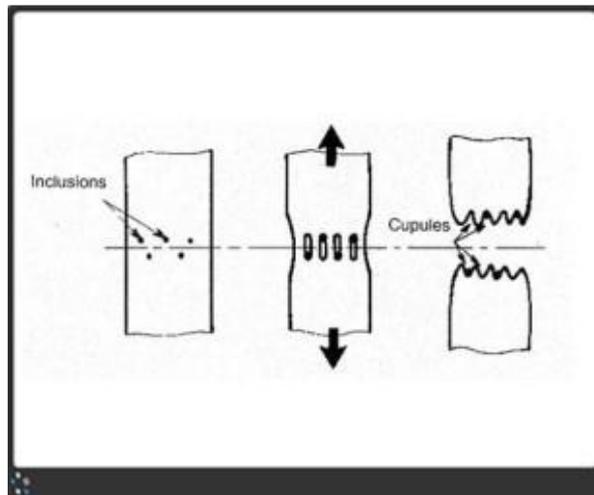


Fig4 : mécanisme de la rupture ductile

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

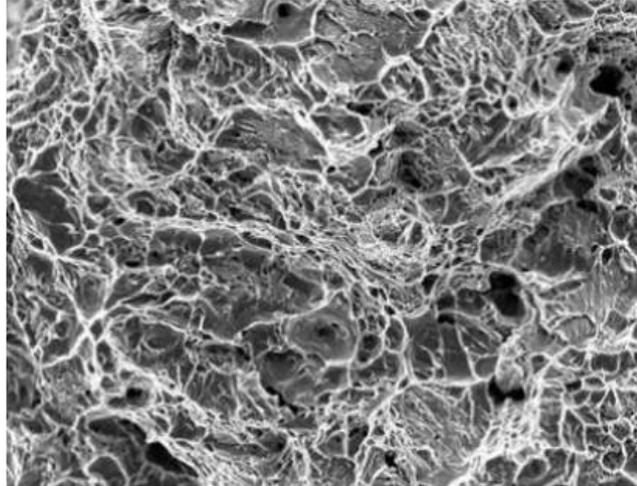


Image 3 Fig5 : Faciès de rupture ductile

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

b) Allure de diagramme charge-déplacement :

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

RUPTURE DUCTILE

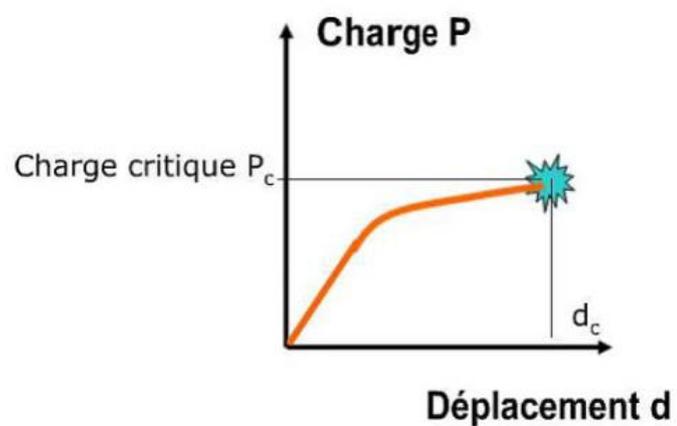


Fig 6 : Allure de diagramme charge-déplacement

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

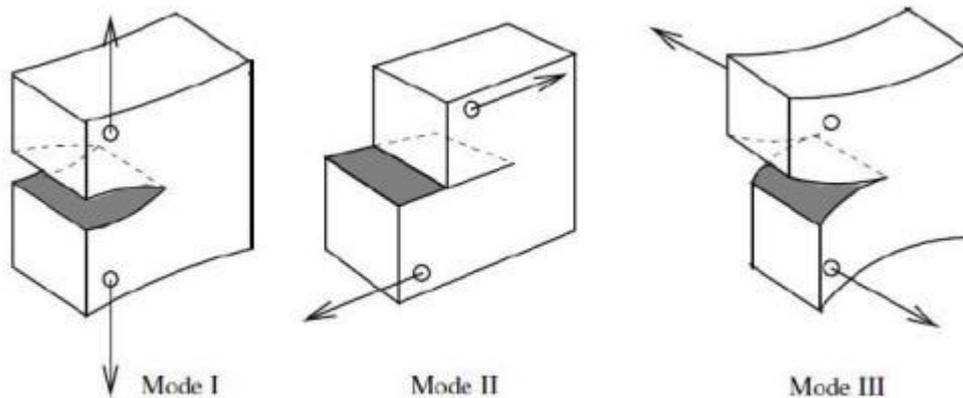


Fig 7 : Modes de rupture

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.

4. 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

Chapitre I : généralités sur la mécanique de la rupture

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.

Avant le développement de la mécanique de la rupture, le dimensionnement des structures utilisait la démarche « Résistance des matériaux » appelée aussi, « approche classique ».(figure8.1) 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.

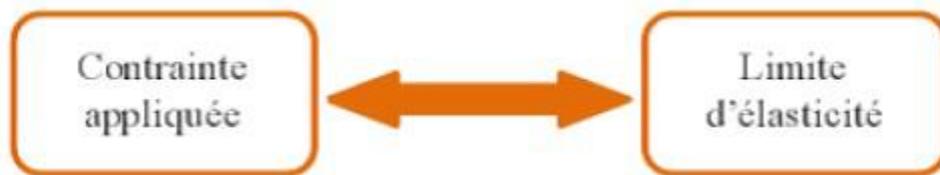


Fig8.1: Approche classique (RDM)

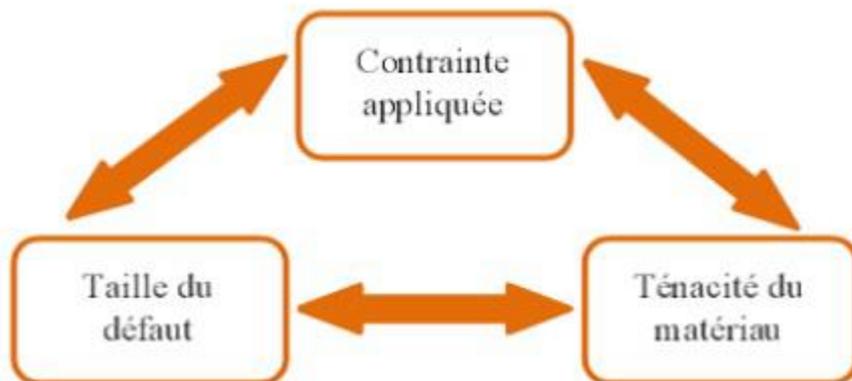


Fig 8.2 : Approche utilisant la mécanique linéaire de la rupture

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).

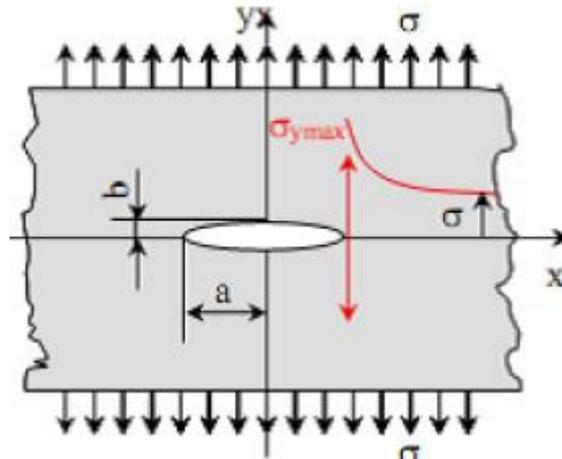


Fig 9 : Analyse des contraintes au voisinage d'un trou elliptique

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 propager a façon instable si $dW_{cin} > 0$, c'est-à-dire :

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

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

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

Chapitre I : généralités sur la mécanique de la rupture

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

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

$$G = 2\gamma \square$$

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 ($\sigma = R_{th}$)

$$w_{\text{elast}} \geq w_s$$

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

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

5. 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** \square , linéaire ou non linéaire, pour les métaux sollicités à grandes vitesses de déformation dans ces conditions, le comportement peut aussi être viscoplastique.

Chapitre I : généralités sur la mécanique de la rupture

- ✓ 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.

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.

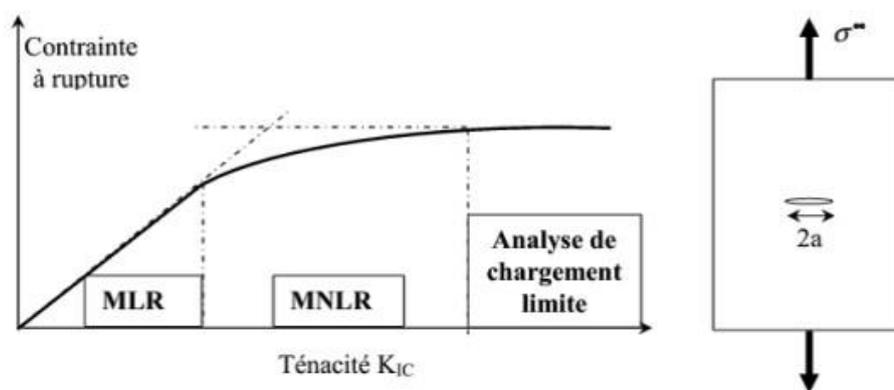


Fig 10 : Comportement en fonction de la ténacité

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