

Université Mohamed BOUDIAF – M'Sila
Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique



Support de cours

Master en Mécanique

MECANIQUE DE LA RUPTURE

Pr. Younès BENARIOUA

2019 - 2020

Introduction

La mécanique de la rupture a été introduite vers 1920. son objectif est de caractériser le comportement à la fissuration de structures des matériaux à l'aide de certains paramètres comme le champ de contraintes, la taille de la fissure et la résistance à la fissuration du matériau.

Les premières analyses (déplacements, déformations et contraintes) autour d'une fissure ont été entreprises par vers 1940. L'extension de la discipline a été amorcée par la suite.

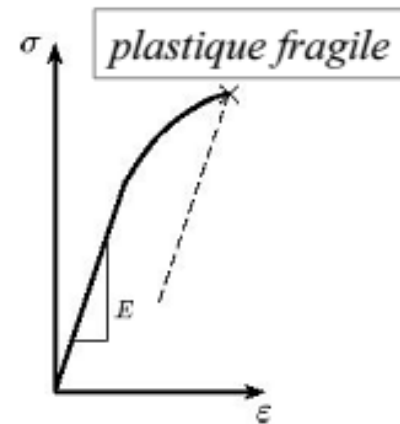
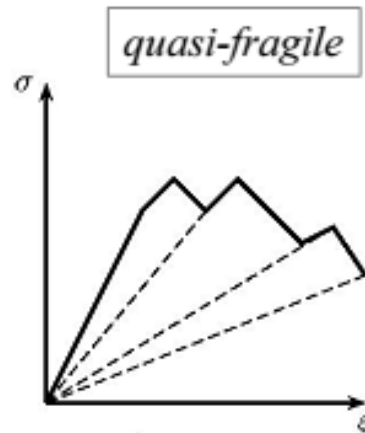
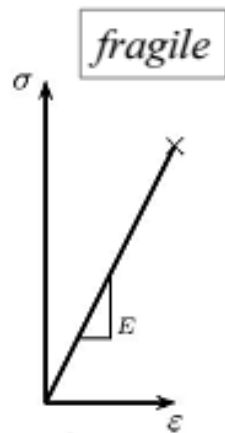
Voici quelques exemples de ruptures catastrophiques qui ont conduit les chercheurs et les ingénieurs à déterminer les causes de ces ruptures.



Toute structure de matériau contient pratiquement des défauts, qu'ils soient introduits lors de l'élaboration du matériau ou lors de la fabrication de la pièce (défauts d'usinage ou de soudage par exemple). Ces défauts doivent être pris en compte car ils conditionnent la fiabilité de la structure et sa durée de vie.

Les différents types de rupture

On observe deux types de rupture principaux suivant les mécanismes mis en jeu: une rupture fragile contrôlée par une contrainte normale, et une rupture ductile, précédée de déformations plastique, contrôlée par les contraintes de cisaillement et une rupture semi fragile ou semi ductile contrôlée par les deux contraintes.



La rupture fragile

La rupture fragile se produit par clivage sans prévenir, le plus souvent sans déformation plastique, et les morceaux peuvent se réassembler parfaitement. Elle est soit inter cristalline, soit intra cristalline.

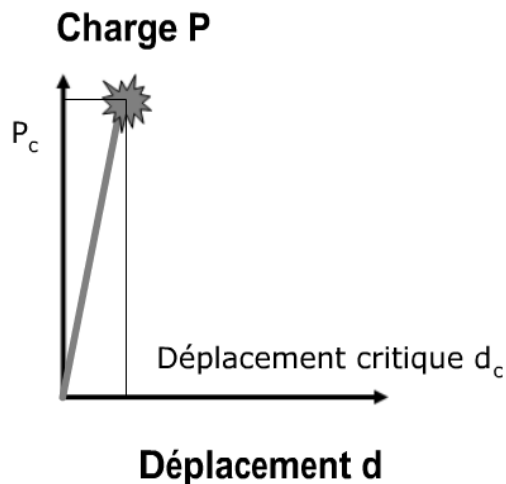
Le clivage est le mécanisme de déformation qui met en jeu la rupture des liaisons atomiques dans le plan dense dans lequel doit se produire la déformation.

Le clivage intervient aussi bien dans les matériaux cristallisés que dans les matériaux partiellement cristallisés ou amorphes comme le verre.

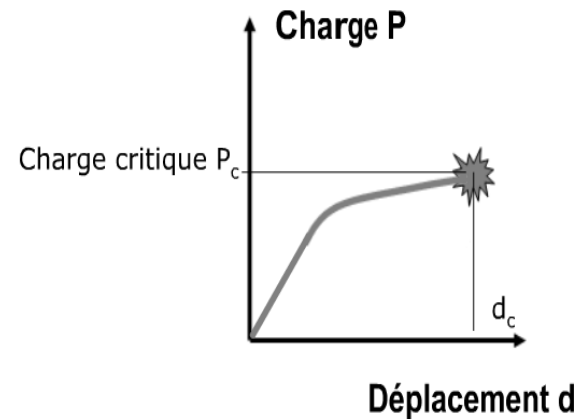
La rupture fragile est contrôlée par la contrainte normale ou contrainte de clivage; elle se produit sans déformation plastique : les ruptures sont transgranulaires (rupture dans un grain cohérent suivant des plans cristallin bien définis). La déformation, l'énergie et les faciès de rupture ceux sont trois paramètres caractérisant la rupture fragile et ductile.

Déformation

RUPTURE FRAGILE



RUPTURE DUCTILE



Energie ou ténacité

- La ténacité : capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie avant sa rupture. Elle caractérise la résistance du matériau à la propagation brutale de fissures L'aire sous la courbe de traction $F(\Delta L)$ représente l'énergie nécessaire pour rompre l'éprouvette

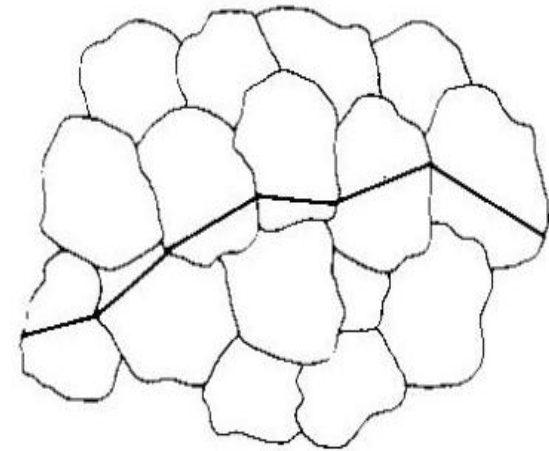
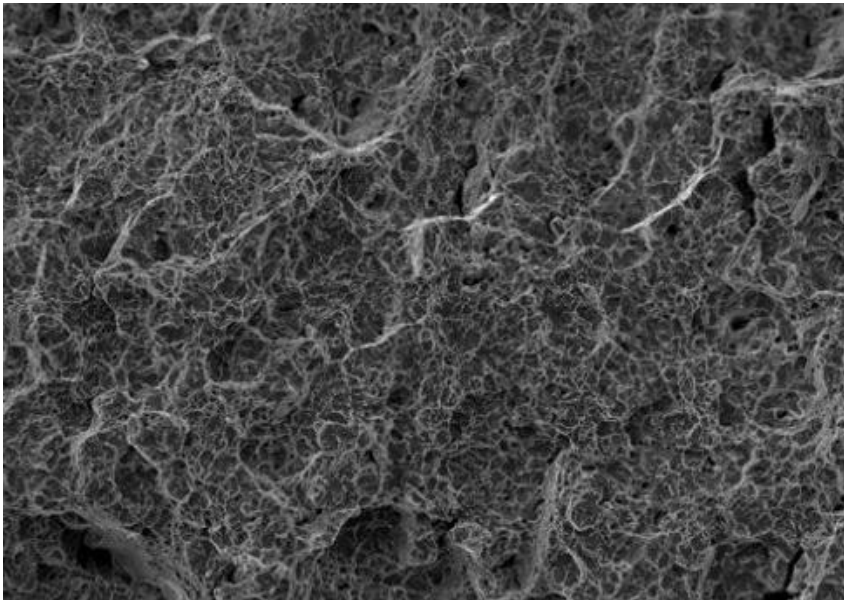


$$w = \int f dl = \int \sigma_0 s_0 \times l_0 d\varepsilon_0 = v_0 \int \sigma_0 d\varepsilon_0$$

Faciès de rupture

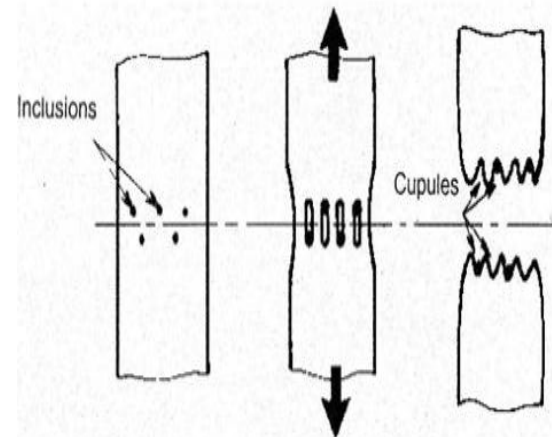
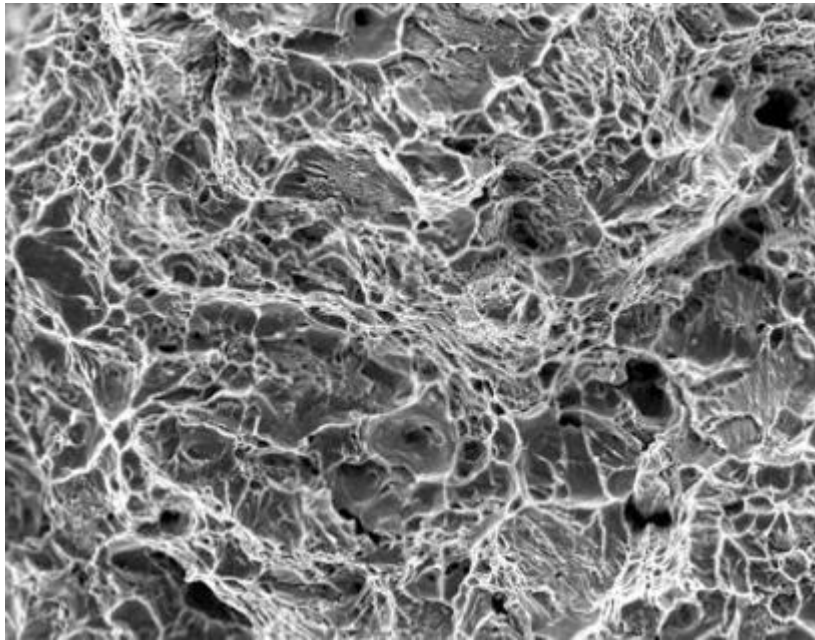
Faciès de rupture fragile

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



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, Les deux photos sont obtenues par MEB



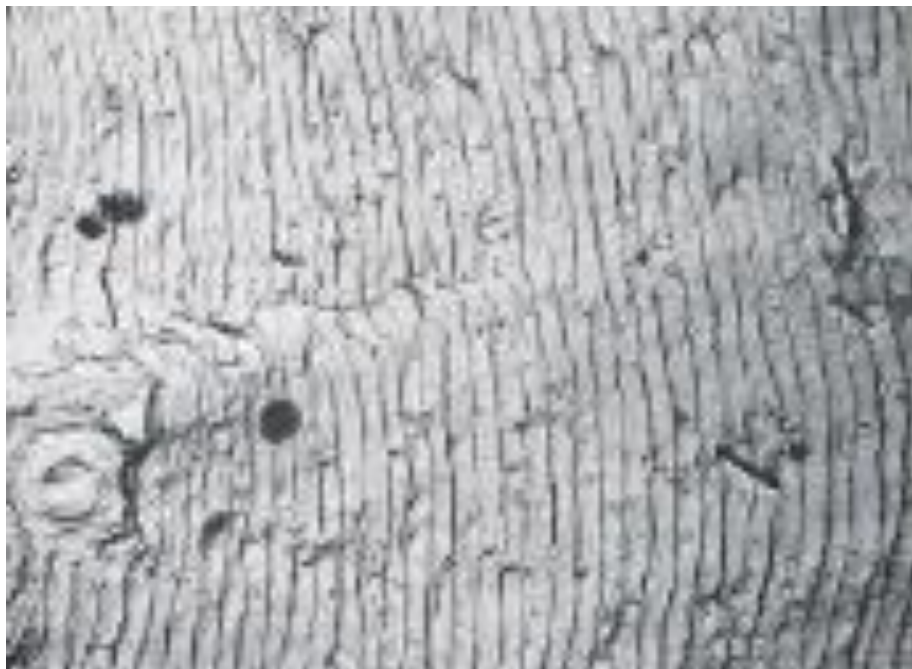
Les points noirs sont des inclusions qui augmentent avec l'augmentation des forces ou contraintes

Faciès de rupture par fatigue

Un faciès de rupture par fatigue généralement plusieurs aspects, et le dépouillement de la surface de rupture demande un connaisseur du domaine. En fait, le faciès d'une pièce endommagée par fatigue présente zones suivantes :

- une zone d'amorçage,
- une zone de propagation de la fissure,
- une zone à grains cristallins apparents,

la surface produite par ce type de rupture présente des microreliefs caractéristiques appelés stries. Quand un faciès de rupture présente des stries, il est certain que l'on a affaire à une fissuration par fatigue.



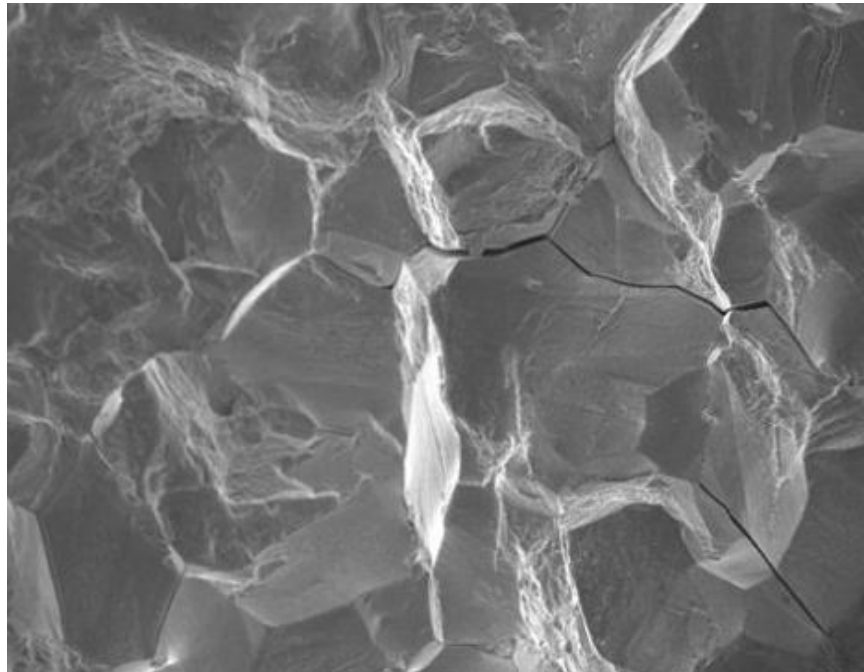
Microfractographie électronique
Rupture par fatigue d'un alliage
d'aluminium 152000 cycles sous
100 Mpa (d'après G, Henry)

Rupture par fatigue d'un arbre fissuré a
été amorcé en surface à la partie droite
de la photo.



Faciès rupture par corrosion

Une rupture fragile intergranulaire dont la séparation de la structure se fait suivant les joints de grains, ce phénomène est observable principalement en présence de corrosion : fragilisation par l'hydrogène par exemple.



Caractérisation de la rupture fragile

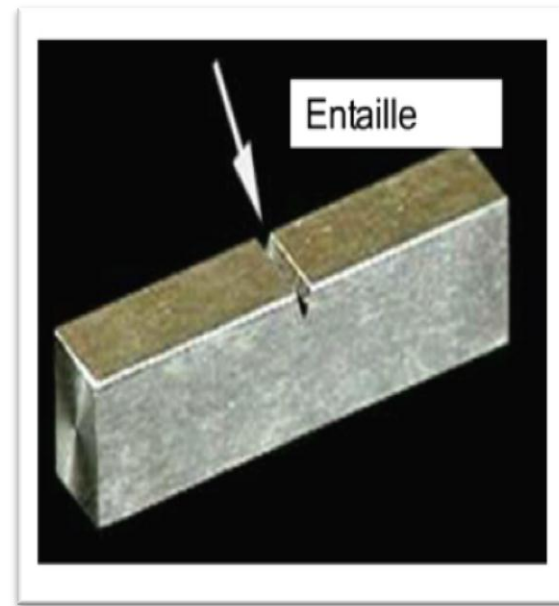
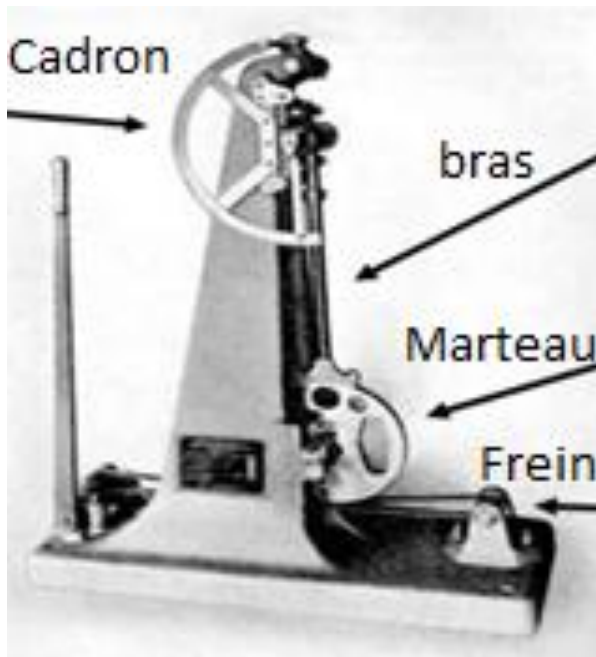
Résilience

Le mode de rupture est très sensible à la vitesse de déformation causée par une charge appliquée. Un autre paramètre est la température, mis en évidence par la rupture de ponts ou bateaux. Quand la température baisse nombres de matériaux deviennent fragile. La température de changement de comportement à la rupture est appelée température de transition.

Essai Charpy

L'essai Charpy permet de caractériser très rapidement le type de rupture fragile ou ductile en déterminant l'énergie nécessaire pour la rupture. C'est un essai de choc à vitesse de déformation élevée.

L'essai est réalisé sur un mouton pendule (figure). L'énergie consommée par l'impact est évaluée à partir de l'angle initial de lâcher du pendule et de l'angle maximal de remontée. Les éprouvettes entaillées (figure) sont des barreaux prismatiques entaillés de un centimètre carré de section droite.



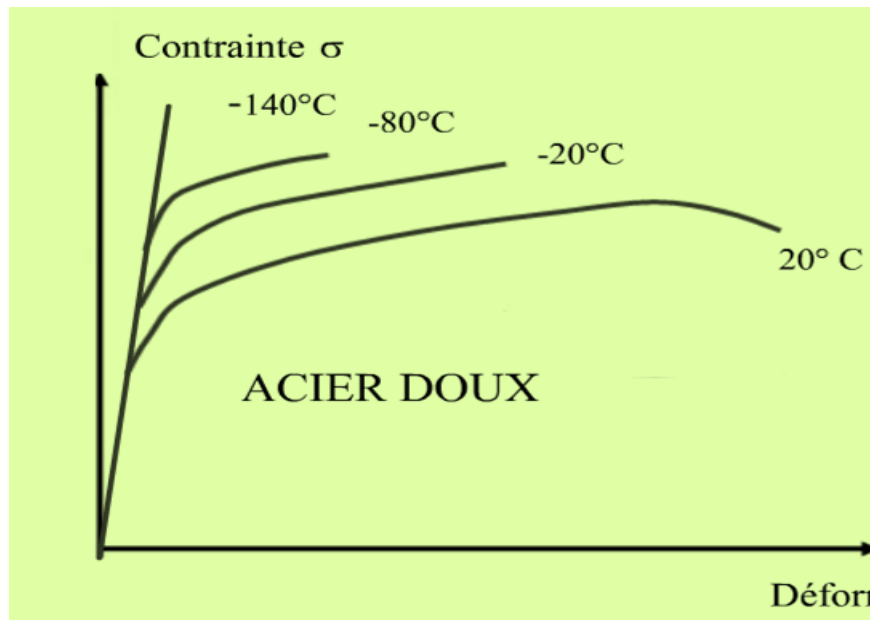
Evolution des caractéristiques mécaniques avec la température

- Résilience
- Ténacité

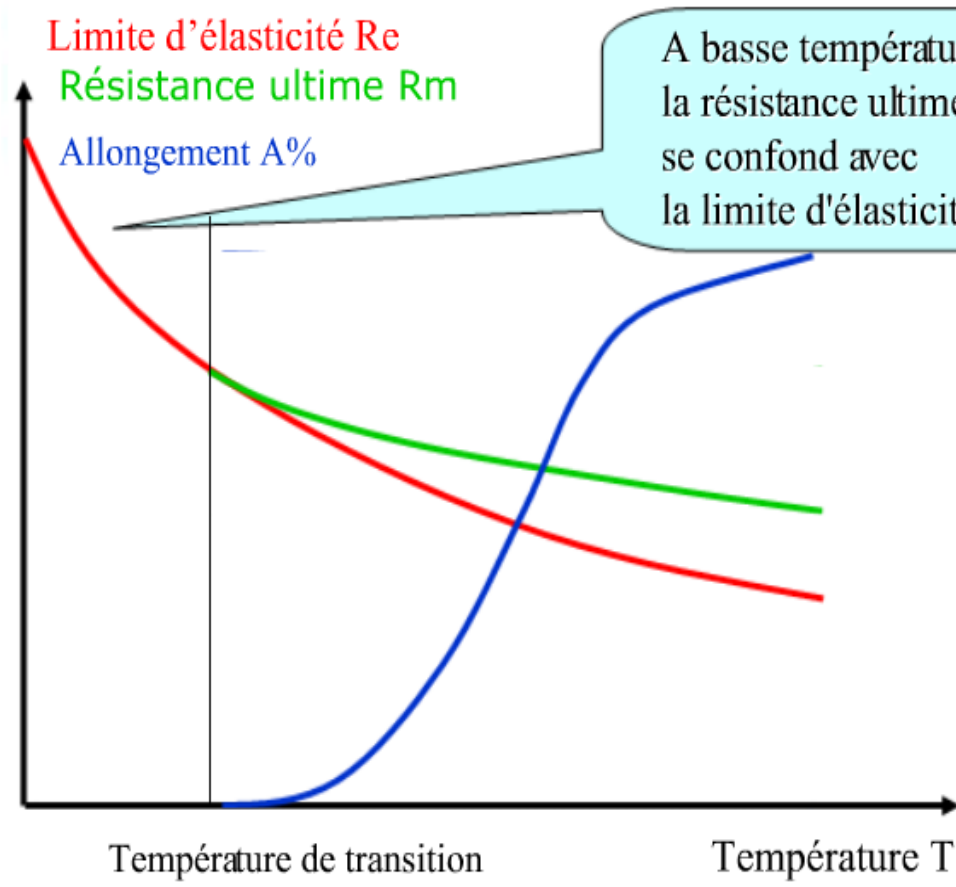
La résilience est le quotient de l'énergie de rupture U_r divisée par la section à rompre A .

Elle s'exprime en DaJ/cm² selon :

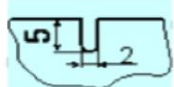
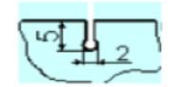
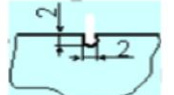
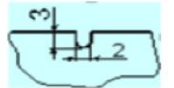
$$K_{CV} = \frac{U_r}{A}$$



**A haute température ,
la rupture est ductile,
A basse température,
elle est fragile.**



Les différents types d'éprouvettes

	Charpy U
	Charpy trou de serrure
	Mesnager
	DVM

Dimensions de l'entaille en mm

Facteur d'intensité de contraintes

Introduction

Le paramètre essentiel à la mécanique de la rupture le facteur d'intensité de contrainte. La mécanique de la rupture étudie l'interaction entre la fissure et la zone avoisinante. Généralement et point de vue mécanique, trois zones peuvent être distingué et qui sont :

- ***La zone d'élaboration (1)*** qui se trouve à la pointe de la fissure et dans le sillage laissé par la fissure au cours de sa propagation. L'étude de cette zone est très compliquée à cause des contraintes importantes qui ont fortement endommagé le matériau.

- ***La zone singulière (2)*** dans laquelle les déformations et les contraintes sont continues et sera indépendante de la géométrie du matériau. Les composantes ϵ et σ sont infinies au voisinage du front de fissure qui a une courbure nulle $c \rightarrow d$ ($r=0$). Dans le cas où la pointe de fissure détermine la forme de la zone plastifiée présente autour d'elle un rayon r_c le matériau ayant une limite d'élasticité. La valeur de r_c détermine le mode type de rupture. On peut dire que la rupture est fragile pour r_c petit et qu'elle est ductile pour r_c grand.

- **La zone extérieure (3)**, est lie d'un côté à la zone singulière et d'autre côté à la charge appliquée conditionnant aux limites des champs de déplacements. Les déformations et contraintes appliqués n'ont pas vraiment un effet sur cette zone car elles se focalisent dans la seconde zone et se transposent vers la zone d'élaboration

Détermination du facteur d'intensité de contrainte

Deux phénomènes interviennent simultanément lors de formation des microfissures ainsi l'apparition de la fissure par effet de leurs coaliscences,

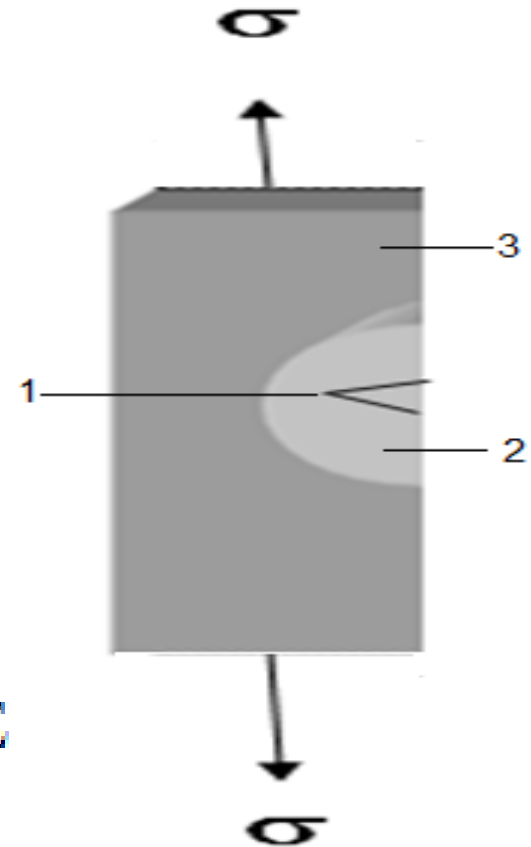
- Concentration de contraintes autour de la fissure caractérisant par une zone blanche de volume V cylindrique ayant une énergie élastique stockée de U_e .

- Création de deux nouvelles surfaces de rupture dans cette zone caractérisées par deux lignes en formant une fessue ayant une énergie de surface de 2γ

L'énergie élastique volumique U_e qui est donnée par l'aire du domaine plastique de la courbe de traction prend la relation.

$$U_e = \int \sigma d\varepsilon$$

$$U_e = 0.5 E (\varepsilon)^2 = \frac{1}{2} \delta_e \varepsilon_e = \sigma_e^2 / 2E$$



La création de nouvelles surfaces correspondent au fissures constituent donc un frein de propagation de la fissure.

L'énergie superficielle de la fissure qui est proportionnelle à sa surface augmente lineairement avec **a** . On peut donc écrire que l'énergie de surface **Us** de la fissure représentée à la figure après et est égale à celle nécessaire pour créer deux faces d'énergie de surface γ .

$$\mathbf{U_s = 2 \gamma a b}$$

Où γ est l'énergie libre de surface par unité de surface et **b** est l'épaisseur de la plaque.

La zone de relaxation de contrainte peut être présentée par un demi cercle cylindrique de section elliptique ayant des demi axes respectivement égaux à $2a$ et a .

La section de la zone singulière (2) de est alors égale à πa^2 . la création d'une fissure de longueur a entraîne la relaxation de contrainte σ dans un volume $V = \pi a^2 b$ et l'énergie libérée dans cette zone est:

$$U_e = - U.V = - (\sigma^2 \pi a^2 b) / 2E$$

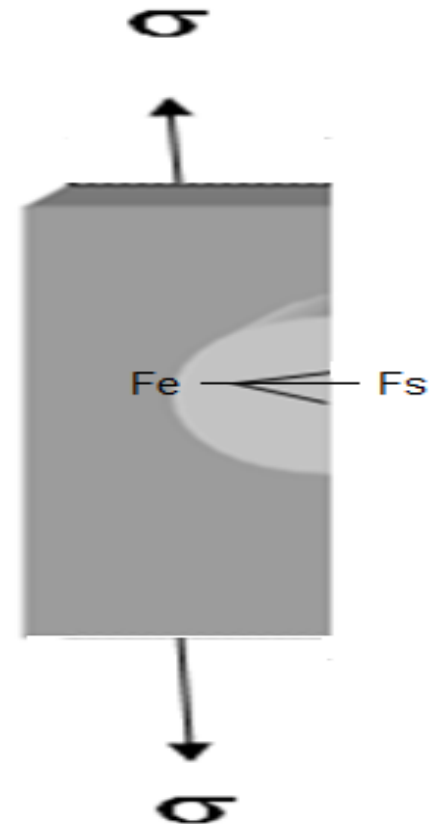
Cette énergie est exothermique, elle prend de signe – ou bien libération de l'énergie.

Par sommation des deux expressions relatives aux énergies U_e et U_s on obtient la valeur l'énergie de fissuration Π qui est varie avec la longueur de la fissure a . Les forces intervenant à la pointe de La fissure explique les phénomènes de propagation de cette fissure.

La fissure se propage sous l'action de la force F qui est appliquée à la pointe et qui est située dans le plan de fissure perpendiculaire à l'axe de σ , la force F_e et F_s deviennent:

$$F_e = - dU_e / da = (\sigma^2 \pi a b) / E$$

$$F_s = - dU_s / da = - 2 \gamma b$$

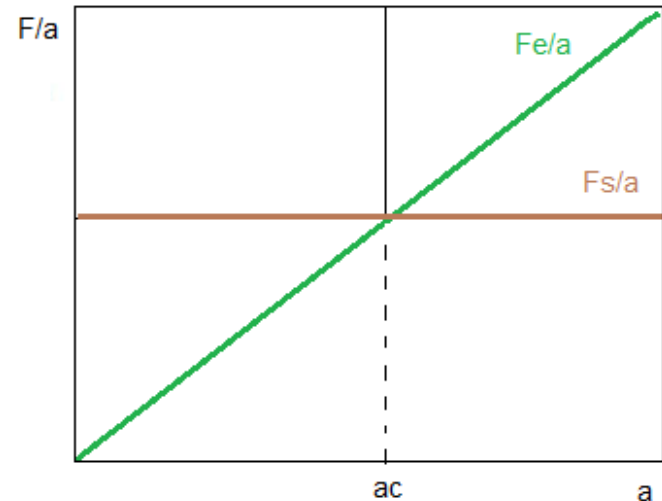


La valeur critique de la longueur de la fissure a correspond au cas où ces deux forces sont identiques en valeurs absolue. La sommation des deux forces égale à zéro car la dérivée de l'énergie résultante est nulle. On détermine à partir de ceux-ci la valeur critique de la longueur de la fissure a .

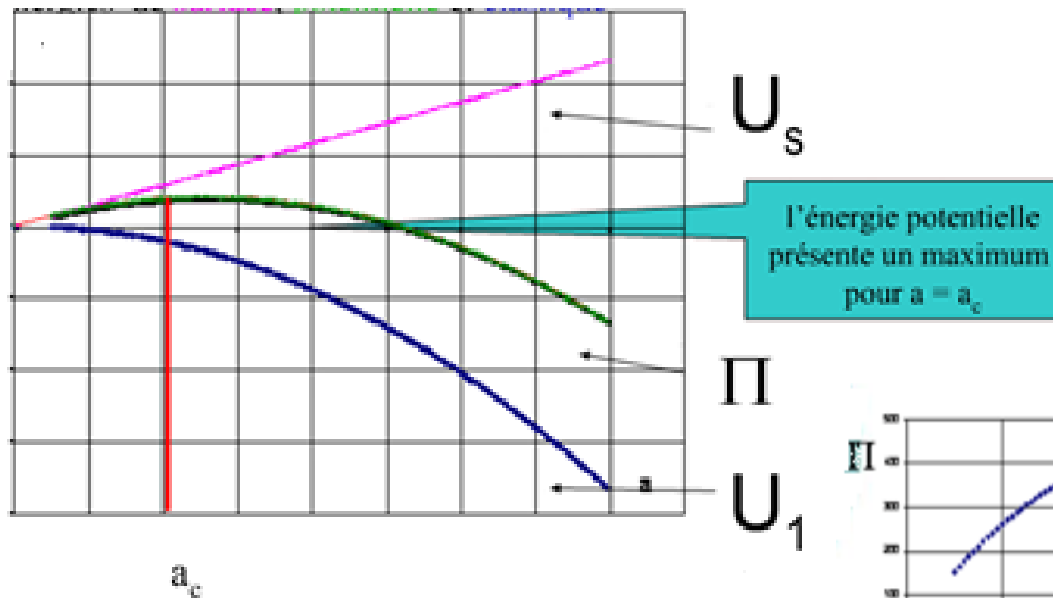
$$F_e + F_s = 0$$

$$-dU_e / da + dU_s / da = 0$$

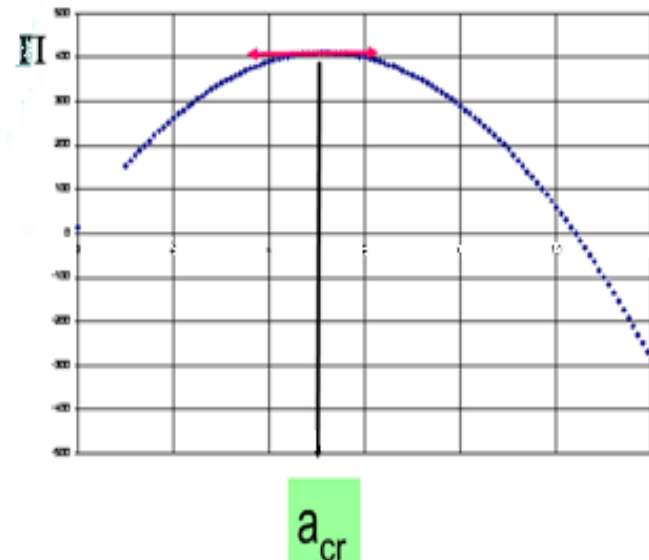
$$(\sigma^2 \pi a b) / E + -2 \gamma b = 0$$



La longueur critique de la fissure prend la valeur ci-dessous, cette valeur est indiquée graphiquement dans la figure ci-dessous.



$$a_c = 2 \gamma E / \sigma^2 \pi$$



On peut déterminer la contrainte critique à partir de la taille du défaut critique a_c .

$$\sigma_c = (2 \gamma E / \pi a)^{1/2}$$

Ce concept de la contrainte critique a été introduit par Griffith (1920). Toute contrainte appliquée dépassant la contrainte critique entraîne une propagation rapide des fissures et provoque la rupture.

La théorie de Griffith est limitée au cas de matériau fragile. L'objectif est de trouver une formulation générale permettant le calcul de la contrainte critique quelque soit le type du matériau. Le raisonnement de Griffith pourra être généralisé si on considère que la diminution de l'énergie mécanique par relaxation de contrainte doit atteindre une certaine valeur critique pour que la rupture intervienne.

Désignons par G l'énergie libérée par relaxation des contraintes par unité de surface formée, l'expression de cette énergie est:

$$G = \sigma^2 \pi a / E$$

Pour qu'une fissure de longueur a puisse progresser, il faut que la contrainte appliquée dépasse la valeur critique σ_c .

$$\sigma_c = (EG_c / a)^{1/2}$$

Par comparaison des deux expressions de σ_c on aura $G = 2\gamma$ qui correspond aux deux surfaces sillées par la rupture dont chacune est caractérisée par énergie surfacique γ .

G représente toutes énergies dissipées (spécifiques) durant la propagation de fissure et considéré comme paramètre qui détermine la ténacité d'un matériau.

La dernière expression pourra être divisé en deux termes dont le premier terme est caractéristique du matériau alors que le second terme l'état de contrainte appliquée.

$$(EG_c)^{1/2} = \sigma_c(\pi a)^{1/2}$$

Cette relation définit un paramètre important de la mécanique de rupture qui est le facteur d'intensité de contrainte K et devient K_c en état critique.

$$K_c = \sigma_c(\pi a)^{1/2}$$

Pratiquement, plusieurs facteurs de correction peuvent intervenir lors de la rupture des matériaux parmi lesquels le facteur géométrique α défini les dimension de l'éprouvette rompue et l'expression de K_c devient:

$$K_c = \alpha \sigma_c(\pi a)^{1/2}$$

On peut déterminer la contrainte critique à partir de la taille du défaut critique a_c .

$$\sigma_c = (2 \gamma E / \pi a)^{1/2}$$

Ce concept de la contrainte critique a été introduit par Griffith (1920). Toute contrainte appliquée dépassant la contrainte critique entraîne une propagation rapide des fissures et provoque la rupture.

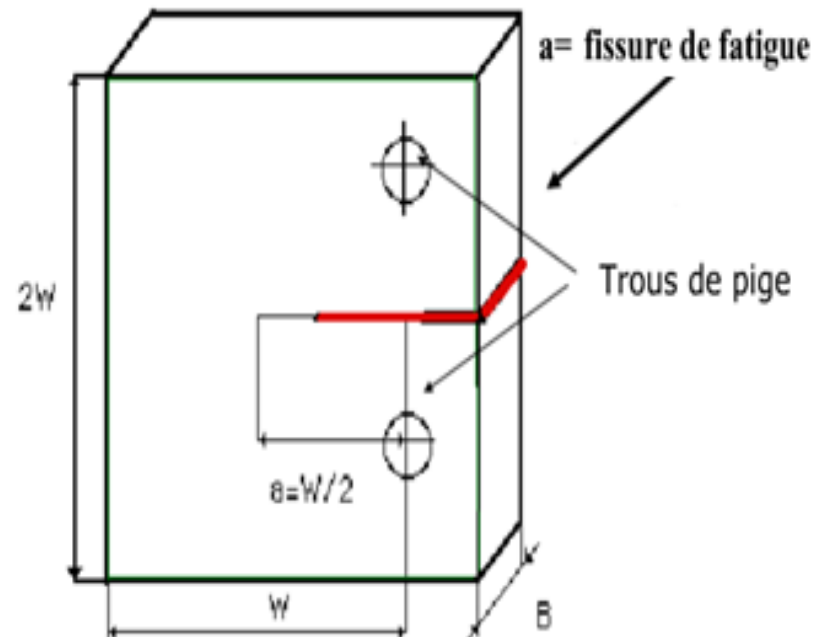
La théorie de Griffith est limitée au cas de matériau fragile. L'objectif est de trouver une formulation générale permettant le calcul de la contrainte critique quelque soit le type du matériau. Le raisonnement de Griffith pourra être généralisé si on considère que la diminution de l'énergie mécanique par relaxation de contrainte doit atteindre une certaine valeur critique pour que la rupture intervienne.

Nous allons choisir parmi plusieurs types d'éprouvettes deux éprouvettes sur lesquelles le facteur d'intensité de contrainte a été mesuré, le facteur géométrique de l'éprouvette est dépend de ses dimensions.

Eprouvette de traction

$$K_{Ic} = \frac{P_c}{B\sqrt{W}} \cdot F_p(a/W)$$

P_c = charge critique,
 $F_p(a/W)$ = correction de géométrie,
 B = épaisseur,
 W = largeur.



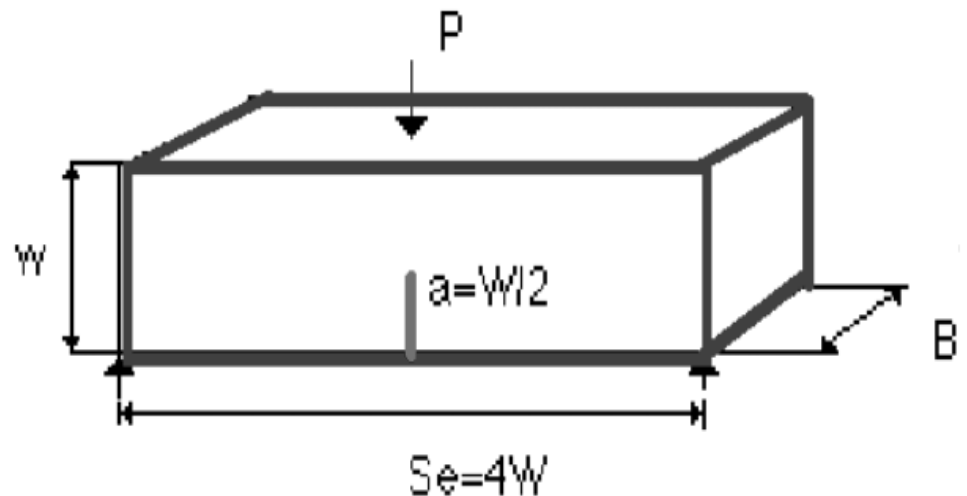
$$F_p(a/W) = 29,6.(a/W)^{1/2} - 185,5.(a/W)^{3/2} + 655,7.(a/W)^{5/2} - 1017.(a/W)^{7/2} + 639.(a/W)^{9/2}$$

La fonction de correction de géométrie est présentée sous forme polynomiale.

Eprouvette de flexion en trois points

$$K_{Ic} = \frac{P_c \cdot S_e}{B \sqrt{W}} \cdot F_p(a/W)$$

P_c = charge critique,
 $F_p(a/W)$ = correction de géométrie,
 B = épaisseur,
 W = largeur,
 S_e = distance entre les points d'appuis.



$$F p(a/W) = 2,9.(a/W)^{1/2} - 4,6.(a/W)^{3/2} + 21,8.(a/W)^{5/2} \\ - 37,6.(a/W)^{7/2} + 38,7.(a/W)^{9/2}$$