

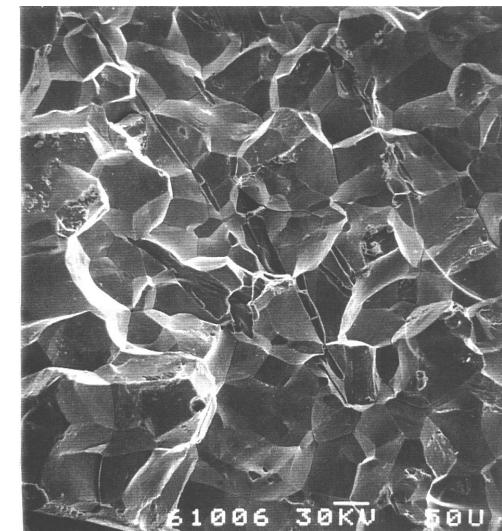
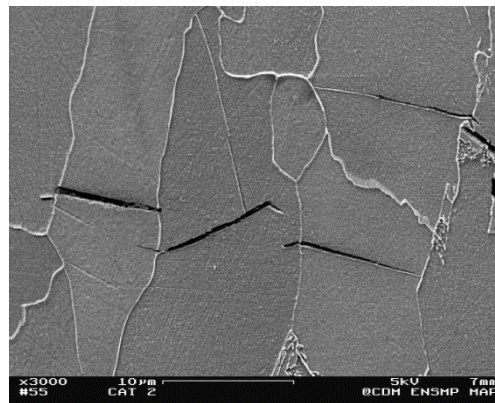
Université Frères Mentouri Constantine1
Institut des Sciences et Techniques Appliquées «ISTA»
3^{ème} Année GIM

Mécanique de la rupture

Fatigue - Expertise

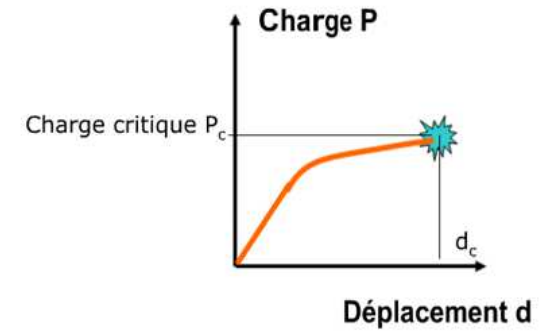
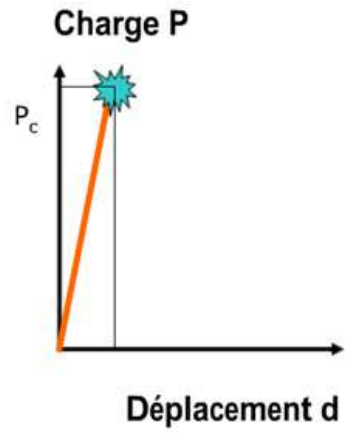


Dr. Lyes BIDI



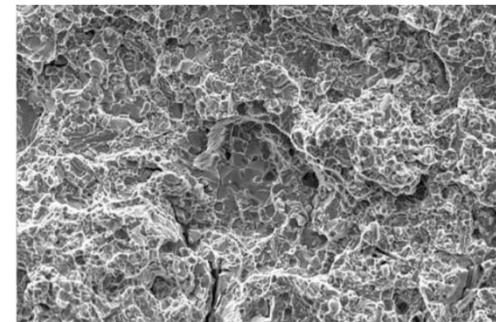
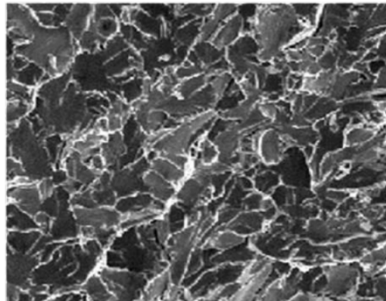
2019-2020


INTRODUCTION



TYPES

DE RUPTURE



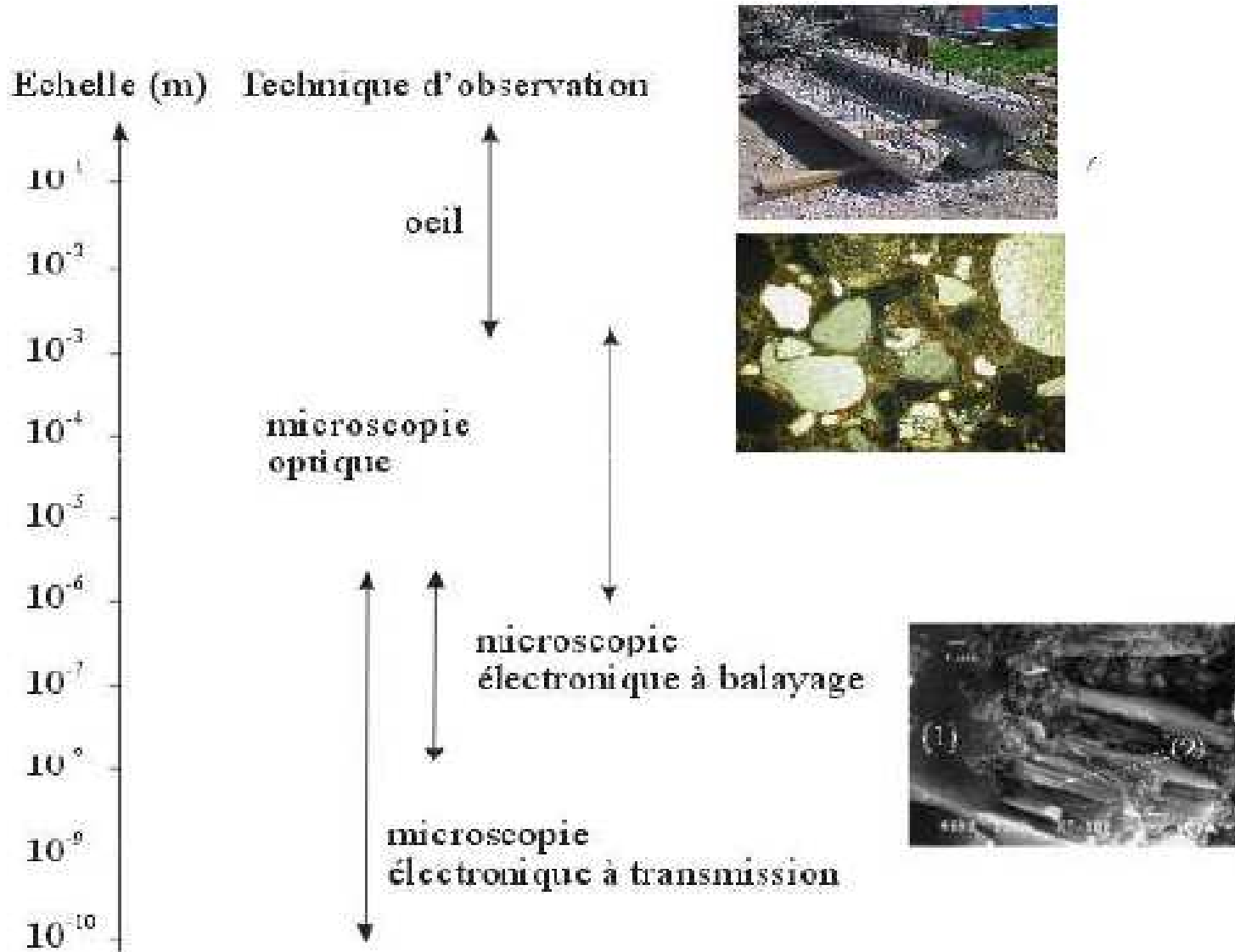


La science des matériaux est l'étude des relations qui existent entre leur structure et leurs propriétés générales

Plusieurs échelles

- Échelle subatomique : noyau et électrons
- Échelle atomique : disposition des atomes ou molécules les uns par rapport aux autres
- Échelle microscopique : groupes d'atomes
- Échelle macroscopique : éléments de structure visibles à l'oeil nu

Méthodes d'expertise




Les moyens de caractérisation des ruptures

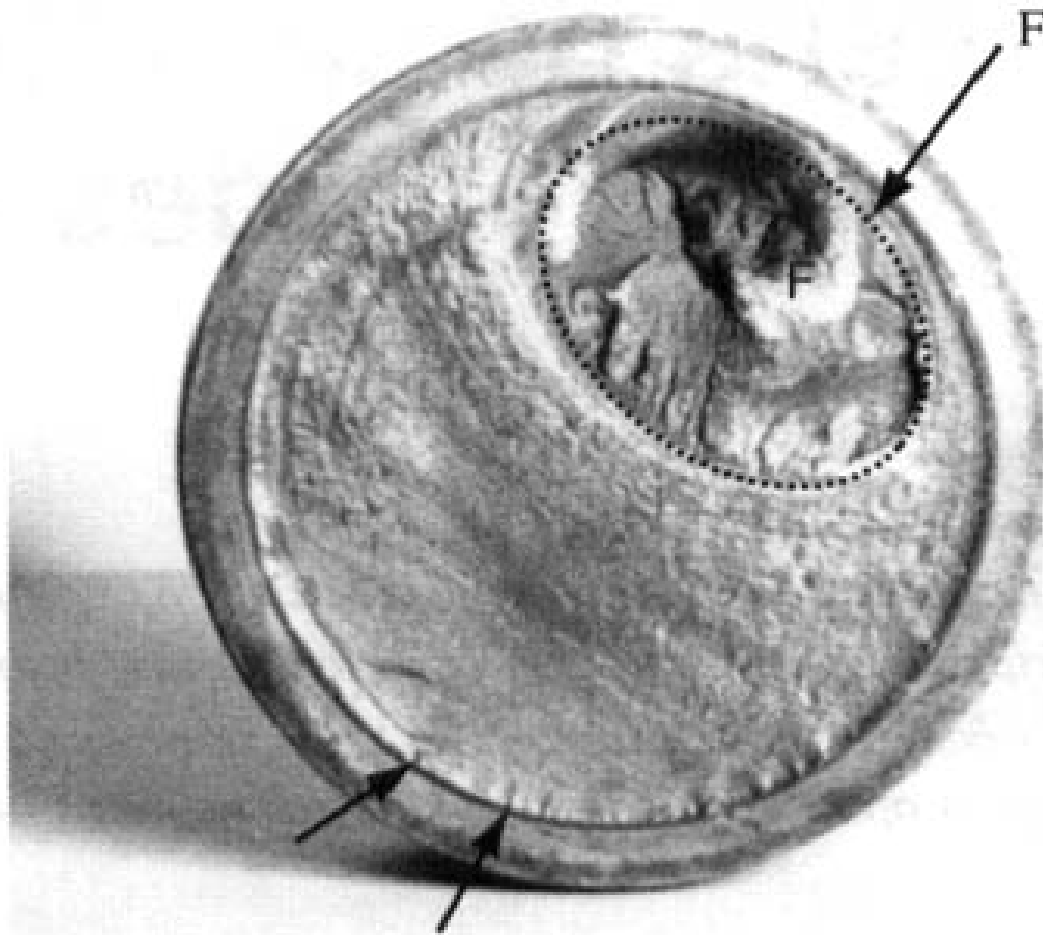
La fractographie est la technique permettant de quantifier, par un examen fin, les surfaces de rupture en vue de comprendre les mécanismes qui en sont à l'origine. Les échelles utilisées vont de L'œil, pour des aspects macroscopiques, aux microscopies optiques ou électroniques et peuvent impliquer des techniques de micro-analyse.

La fractographie

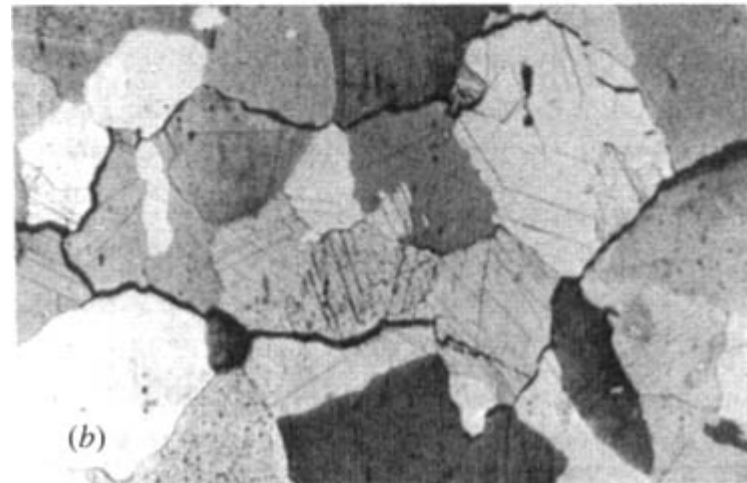
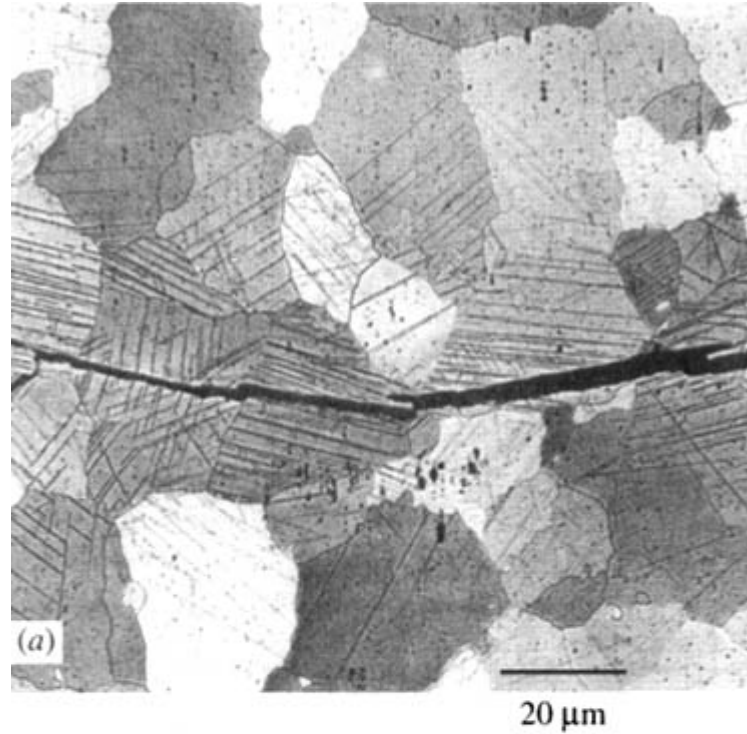
L'objet de la fractographie est de déterminer les caractéristiques des surfaces de rupture en vue de préciser les mécanismes ayant conduit à leur formation. Selon l'échelle à laquelle on se place, les informations tirées de l'observation n'auront pas le même impact dans l'analyse. L'aspect macrographique permet de préciser le ou les sites d'amorçage, l'existence de diverses zones à morphologies variées, correspondant à des modes de rupture distincts ou à la présence éventuelle de diverses lignes d'arrêt, qui localisent le front de fissures à diverses étapes de la propagation, comme cela peut s'observer sur la figure. Au niveau microscopique (à l'échelle du micromètre).



L'utilisation du microscope optique se trouve limitée par sa faible profondeur de champ. Comme les surfaces de ruptures sont généralement irrégulières, il est donc impossible d'observer directement les surfaces sans préparation. On pallie cette limitation en réalisant une coupe plane de métallographie, normale à la surface de rupture. Un renforcement des bords peut être obtenu par un dépôt électrolytique de nickel ou d'un autre matériau dur. On peut ainsi accéder à une vision du chemin de propagation de la surface de rupture et le corrélérer à des caractéristiques métallurgiques du matériau. La figure montre ainsi la différence entre une propagation intergranulaire et transgranulaire dans un acier.

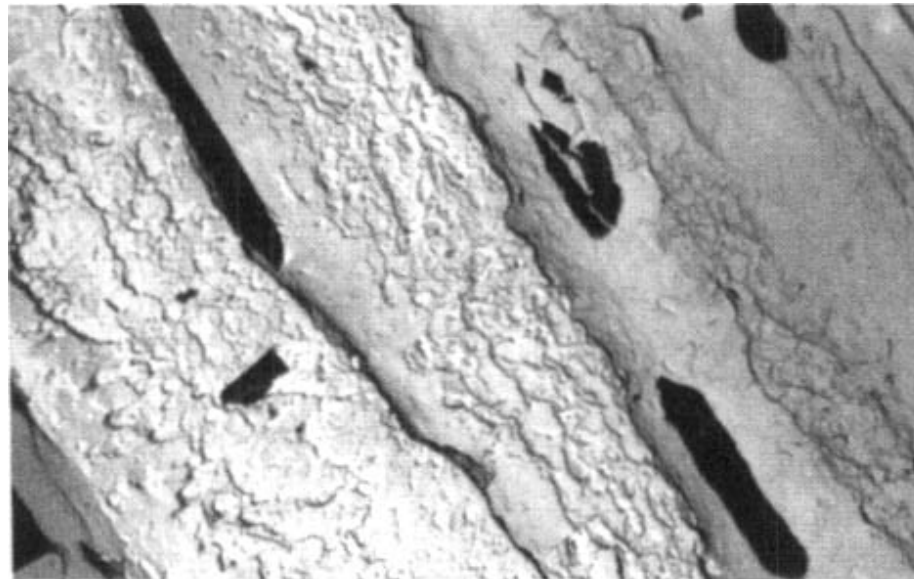


Aspect macroscopique de la rupture d'une pale d'éolienne en alliage léger. On détermine facilement les sites d'amorçage et la progression du front de fissuration, avant rupture brutale sur la zone repérée "F".



Observation par métallographie optique de ruptures transgranulaire (clivage) et intergranulaire (décohésion) dans un acier doux a gros grains.

A fort grossissement, l'utilisation du microscope électronique à transmission se heurte à la quasi-impossibilité de réaliser des lames minces dans le plan de la surface de rupture. Une empreinte de la surface peut être obtenue sur un film de carbone, soit directement de façon destructive, soit à l'aide d'une empreinte intermédiaire en acétate ou en nickel (double réplique). Après décapage et ombrage au chrome ou au platine, on observe en transmission la feuille de carbone.



Observation d'une rupture induite par des précipités allongés, partiellement extraits lors de la réalisation de la réplique au carbone.

Le microscope électronique a balayage

Le développement technologique des microscopes électroniques a balayage (MEB) est tel que cet outil est devenu maintenant le support privilégié des études microscopiques des surfaces de fracture. Cet appareil apporte les informations et avantages suivants :

- Pratiquement aucune préparation de l'échantillon, si ce n'est le prélèvement pour un volume total de l'ordre de quelques centimètres cubes. Pour les matériaux isolants, une vaporisation fine (quelques nm) d'or ou de carbone permettra l'écoulement des charges déposées par le faisceau électronique ;
- Une observation non destructive permettant une reprise ultérieure de l'examen ;
- une résolution géométrique de la surface de quelque 10-100 nm, associée à une profondeur de champ de l'ordre de la taille de la plage examinée ;
- La possibilité d'une analyse chimique locale de la zone d'impact du faisceau électronique, par spectrométrie du faisceau X émis par cette zone

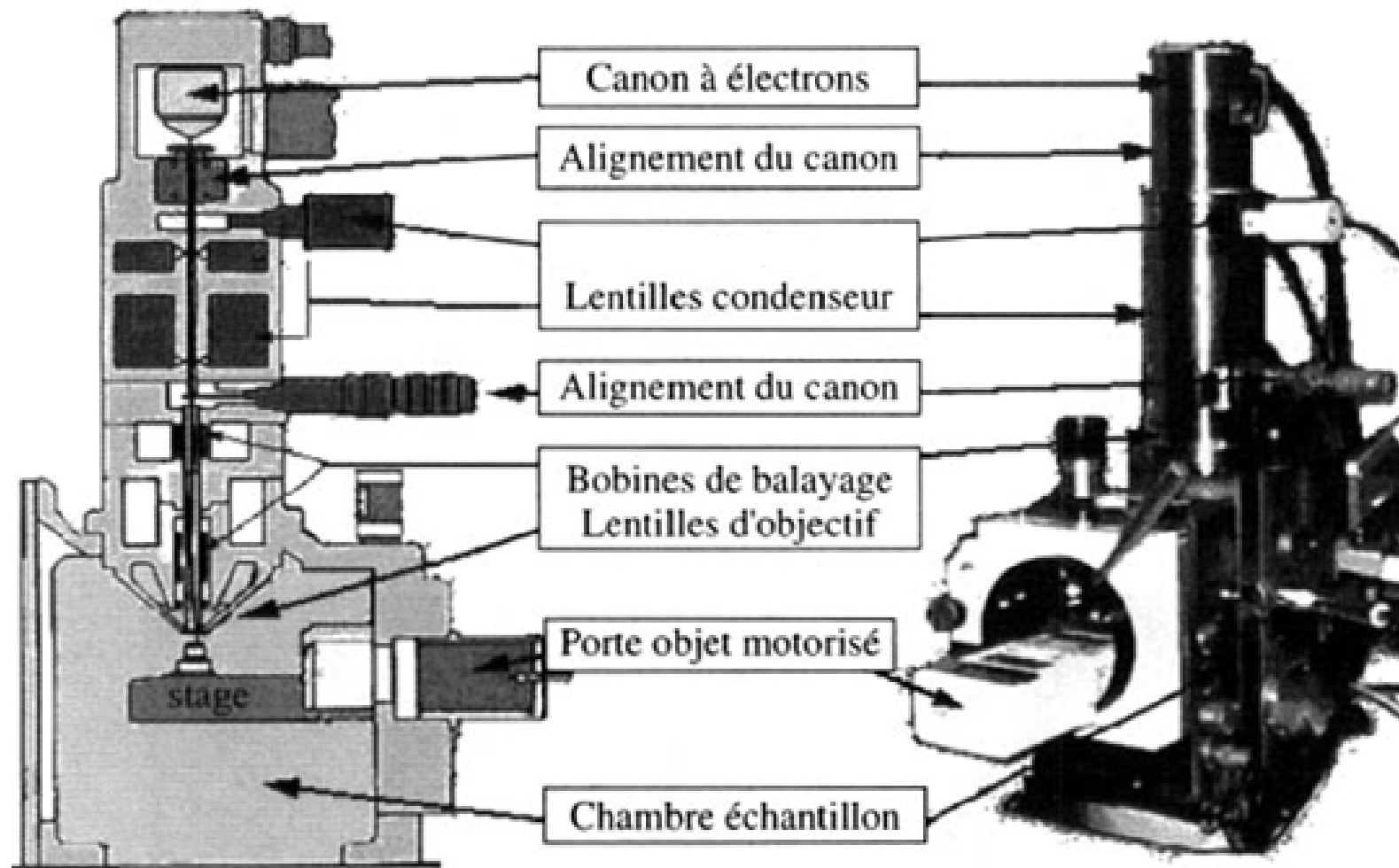



Schéma de principe du microscope a balayage.



L'appareil lui-même, schématisé en figure, est constitué d'une colonne électronique ou un faisceau accélère par un canon (15-25 kV) est conduit sur la surface de l'échantillon qu'il vient frapper localement ; la surface à examiner est explorée par balayage de ce faisceau. Les électrons arrivent sur cette cible, y sont ralentis, et absorbés ou réémis vers l'extérieur. L'interaction du faisceau incident avec les atomes de l'échantillon conduisent à la libération d'électrons qui, arrivant à la surface, servent à la formation de l'image observable.



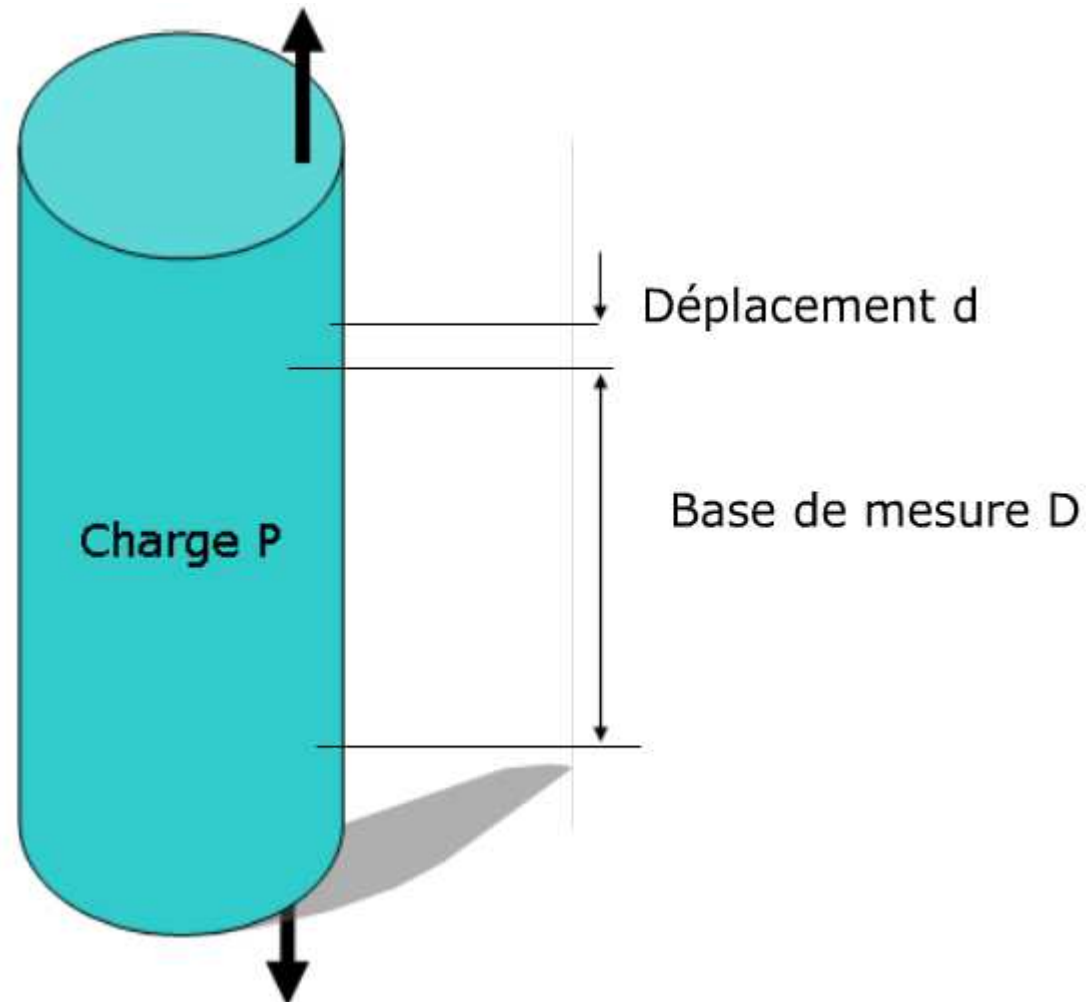
**IL EXISTE DEUX TYPES
PRINCIPAUX DE RUPTURE :**

- LA RUPTURE FRAGILE**
- LA RUPTURE DUCTILE**

COMMENT DIFFERENTIER LES RUPTURES FRAGILES ET DUCTILES?

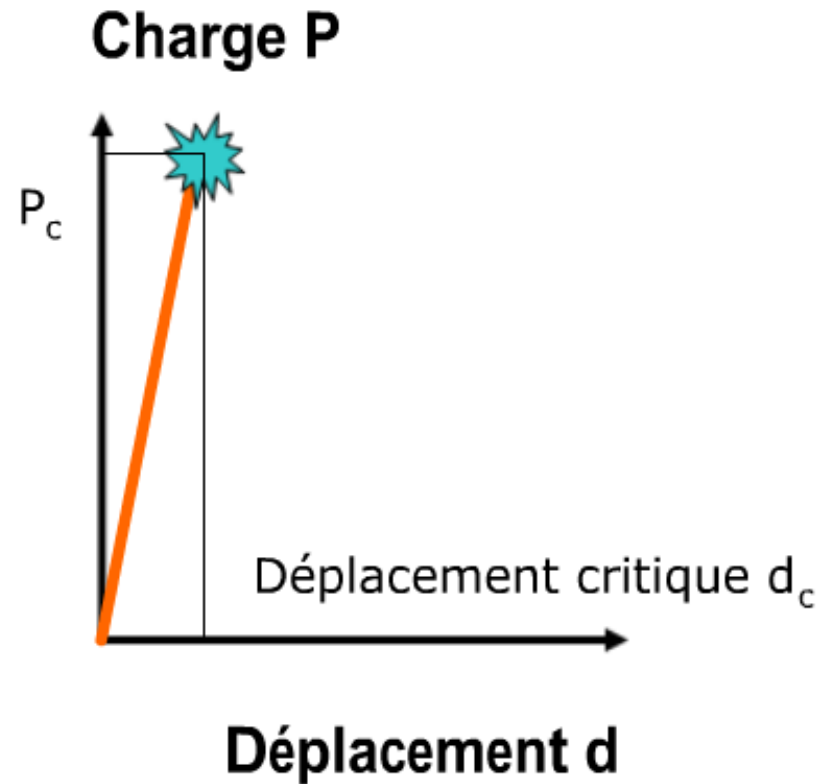
- En comparant les déformations à rupture,
 - En comparant l'énergie de rupture,
 - En comparant les faciès de rupture.

COMPARAISON DES DIAGRAMMES CHARGE-DEPLACEMENT



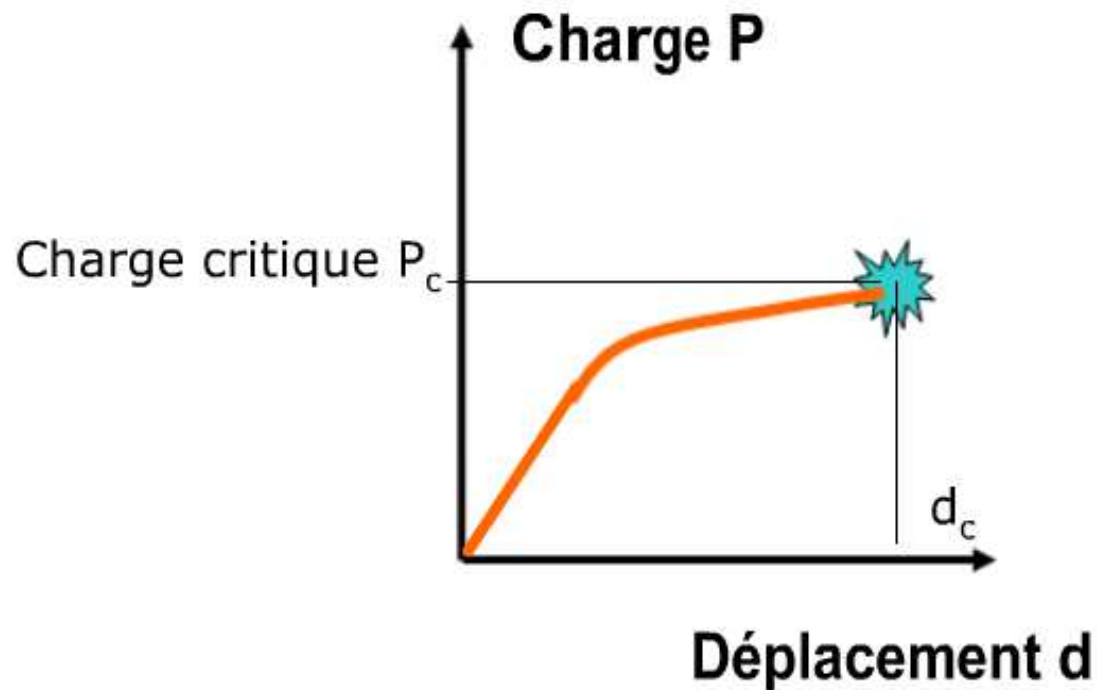
ALLURE DES DIAGRAMMES CHARGE-DEPLACEMENT SELON LE TYPE DE RUPTURE

RUPTURE FRAGILE



ALLURE DES DIAGRAMMES CHARGE-DEPLACEMENT SELON LE TYPE DE RUPTURE

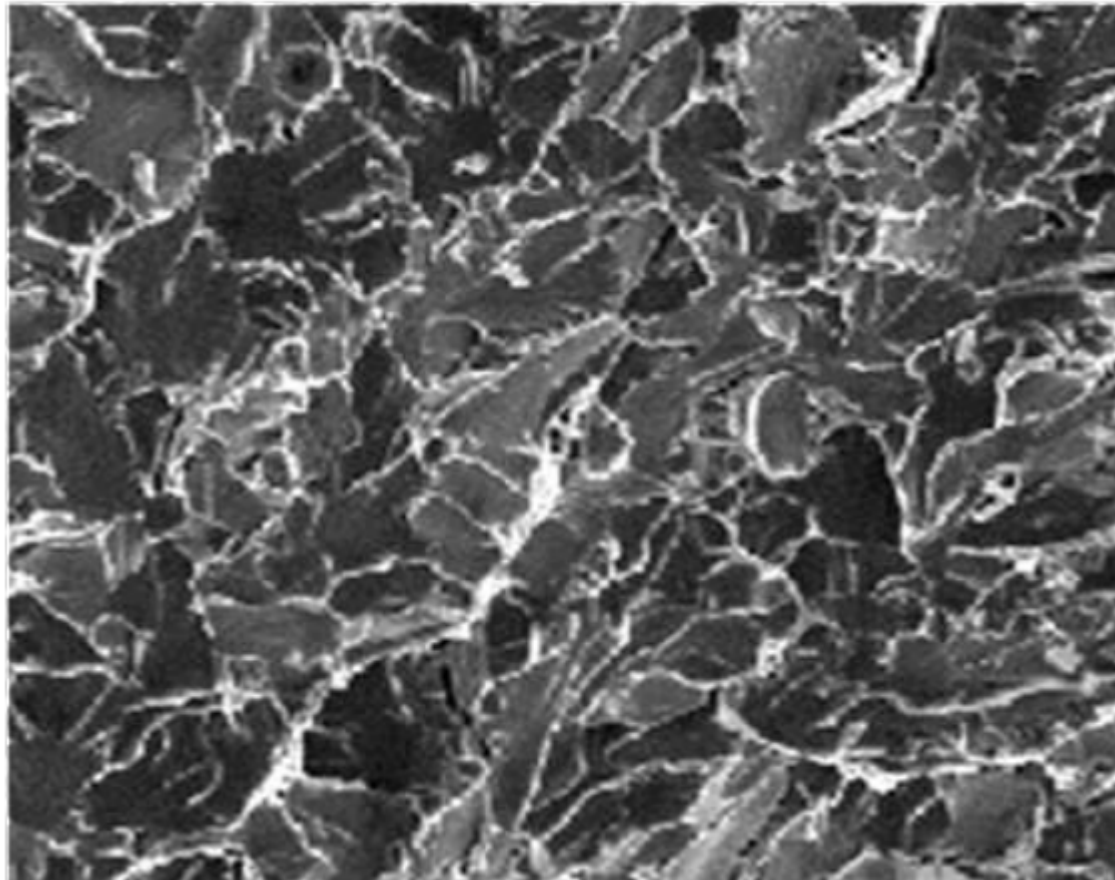
RUPTURE DUCTILE



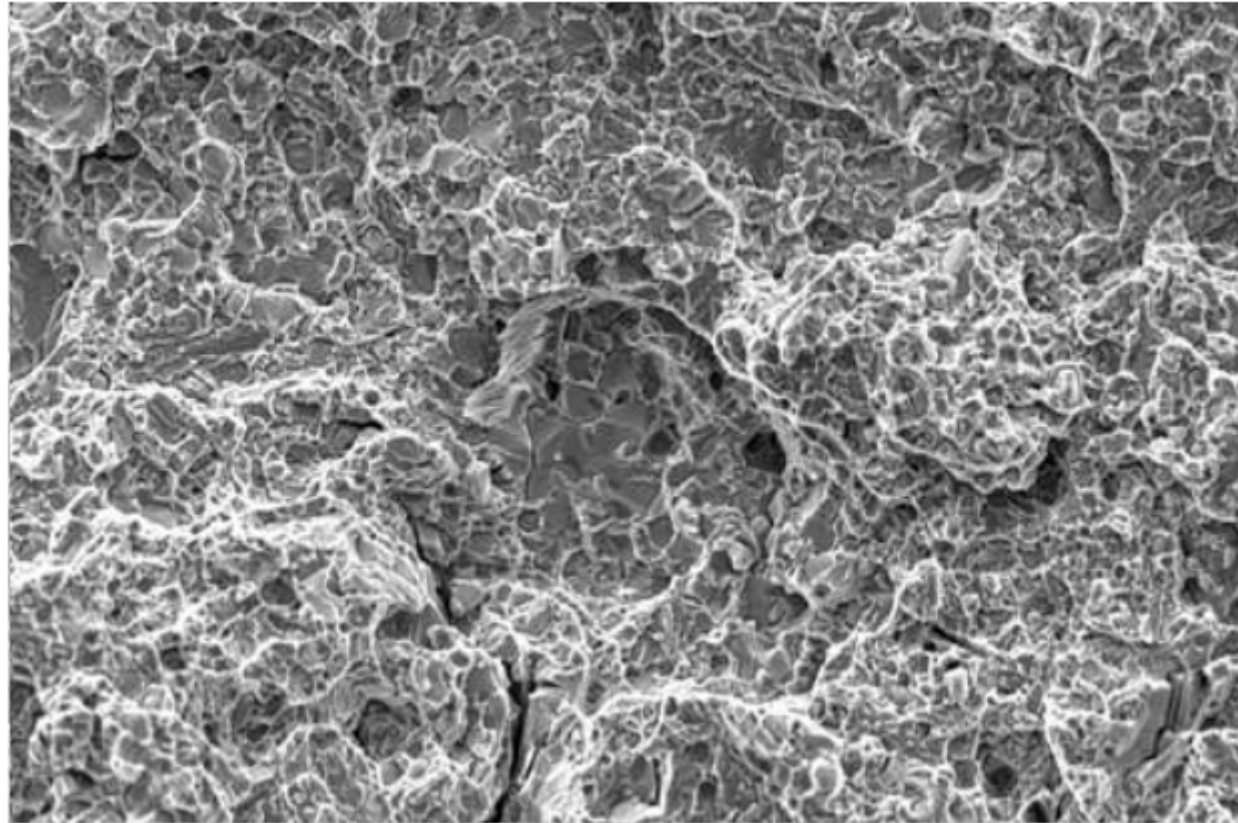
COMPARAISON DES FACIES DE RUPTURE

- Une rupture fragile présente un aspect brillant à grain.
- Une rupture ductile présente un aspect mat avec texture fibreuse.

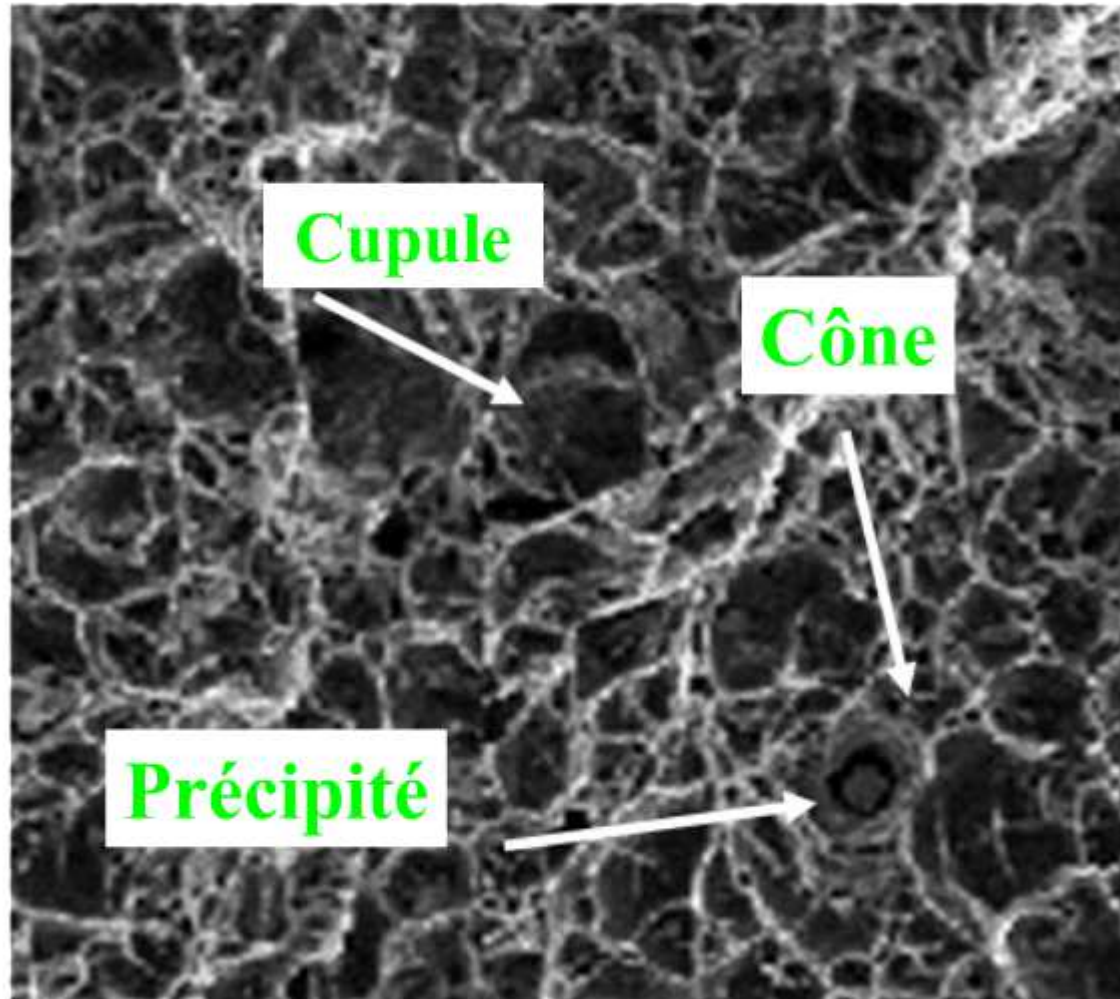
FACIES DE RUPTURE FRAGILE



FACIES DE RUPTURE DUCTILE



FACIES DE RUPTURE

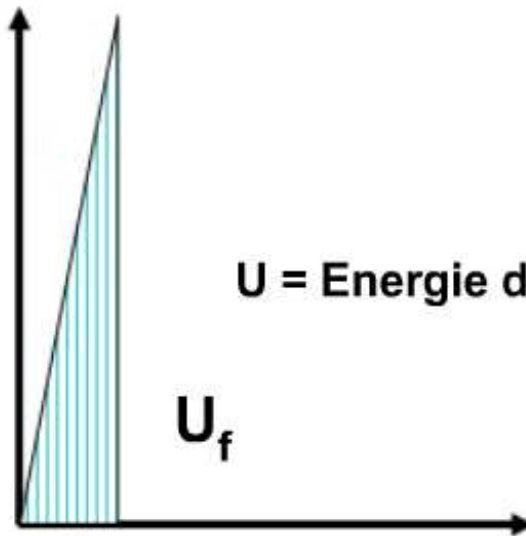


COMPARAISON DES ENERGIES DE RUPTURE

RUPTURE FRAGILE

RUPTURE DUCTILE

Charge P

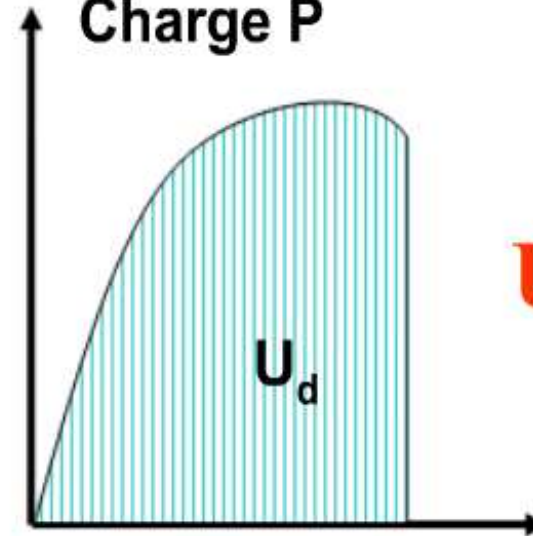


U = Energie de rupture

U_f

Déplacement d

Charge P



$U_d > U_f$

U_d

Déplacement d

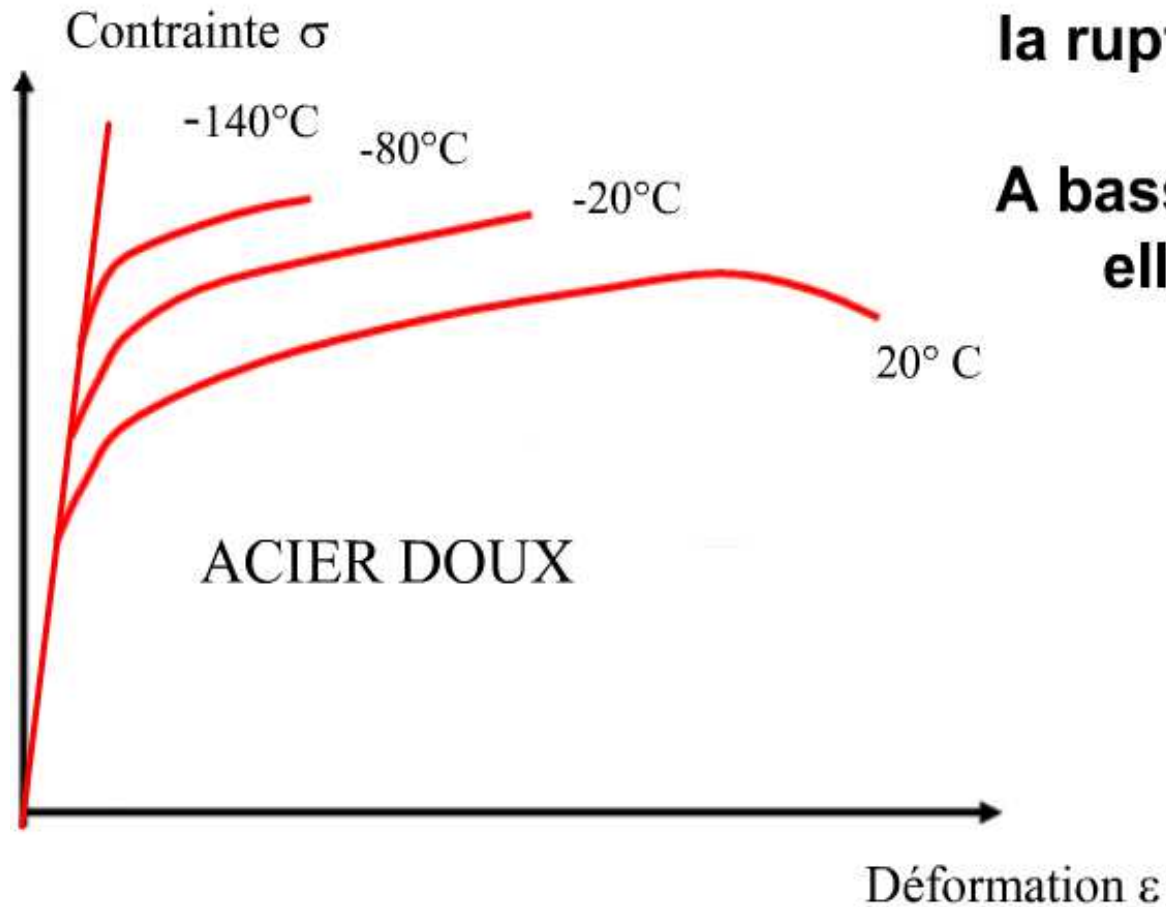
CARACTERES MACROSCOPIQUES DES RUPTURES FRAGILE ET DUCTILE

Type de rupture	Déformation à rupture	Energie de rupture
Rupture fragile	faible	faible
Rupture ductile	forte	forte



**POUR LES ACIERS, IL EXISTE UNE
TRANSITION ENTRE RUPTURES
FRAGILES ET DUCTILES**

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LES COURBES DE TRACTION




**A haute température ,
la rupture est ductile,**

**A basse température,
elle est fragile.**

Mécanique linéaire de la rupture en fatigue des matériaux

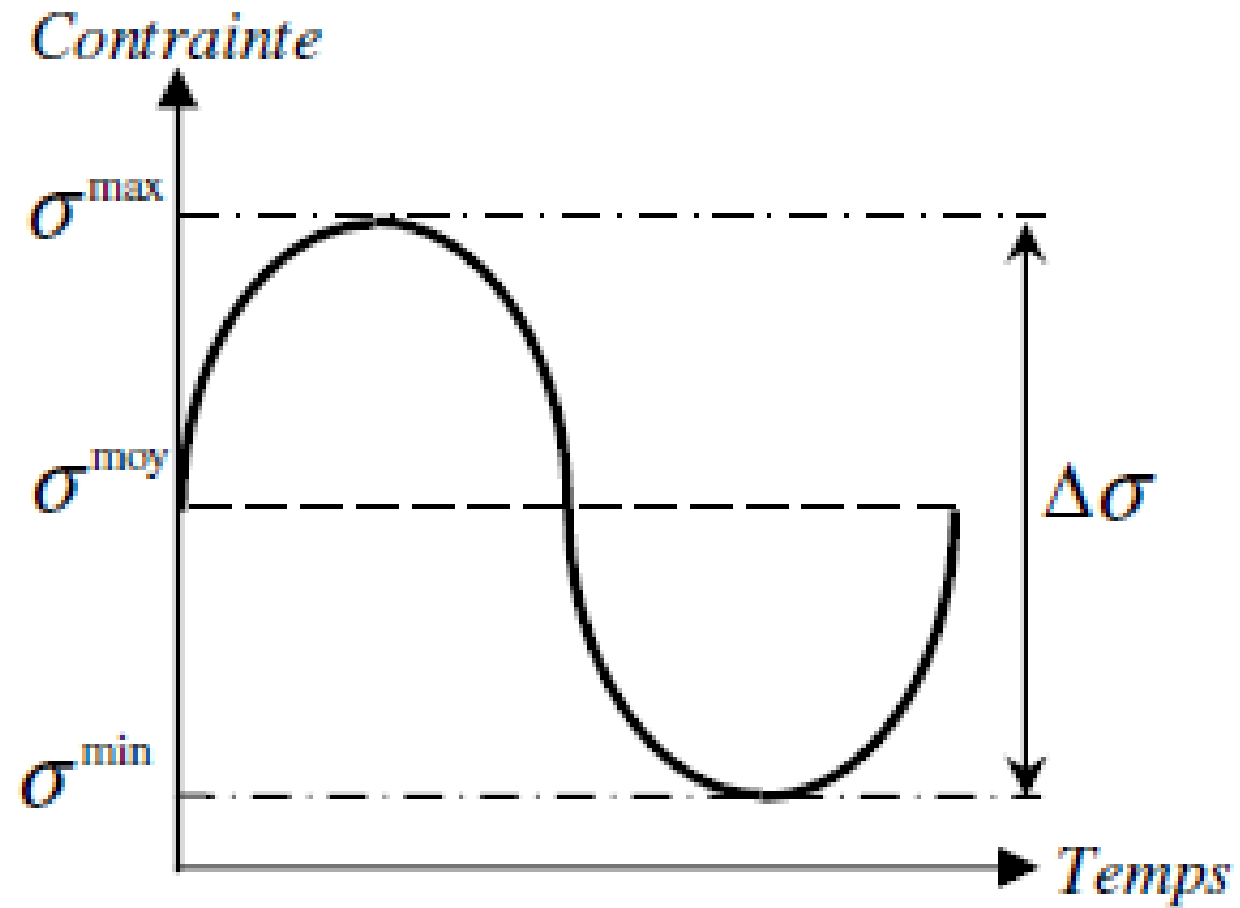
La fatigue est la modification des propriétés des matériaux consécutive à l'application de sollicitations cycliques. Elle produit en général des défaillances des structures qui conduisent à la fissuration et à la ruine des matériaux. Les composants mécaniques tels que les vilebrequins, les bielles, les pignons pour l'industrie automobile, les rails et essieux pour l'industrie ferroviaire ou encore les trains d'atterrissage, les aubes de turbines et de compresseurs pour l'industrie aéronautique, se détériorent souvent par fatigue. L'endommagement par fatigue, associé à plus de 50% des cas de défaillances des systèmes mécaniques, se manifeste en général par l'amorçage et la propagation de fissures.



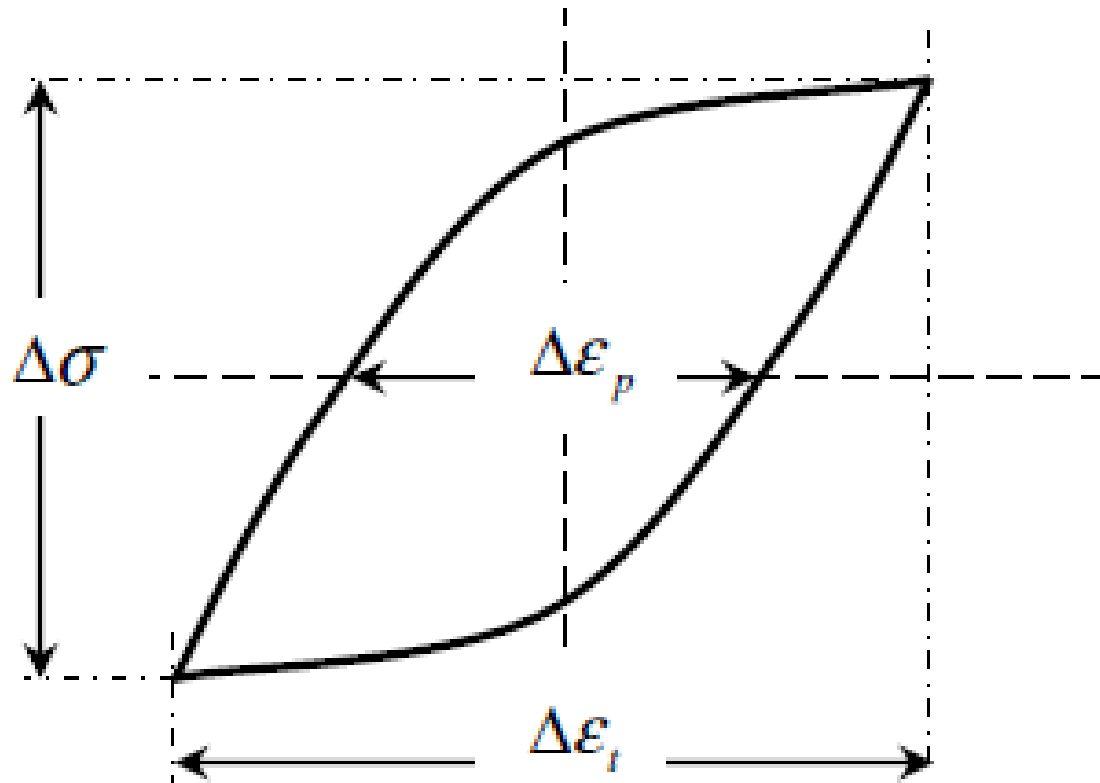
Dans la pratique des procédures de caractérisation du phénomène de fatigue, la période de l'amorçage (apparition de fissure) est traitée à l'aide d'essais sur des éprouvettes lisses (parfois entaillées) et l'on détermine alors une durée de vie en fonction d'une amplitude de contrainte ou de déformation.

La phase de propagation est quant à elle essentiellement étudiée à partir d'essais de fatigue sur des éprouvettes entaillées, la vitesse de fissuration est ensuite décrite en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes DK . C'est une des applications majeures du concept de FIC.

Caractéristiques d'un cycle de contrainte



Courbe contrainte-déformation en fatigue oligocyclique



Fatigue par corrosion

Très comparable à la **corrosion** sous contrainte, le phénomène de **fatigue-corrosion** apparaît sous l'action conjuguée de l'environnement et d'une sollicitation cyclique. Il se manifeste par un abaissement de la résistance du matériau à la **fatigue**.

Caractérisation au choc

Paramètres clés

Définition du principe de l'essai de résilience

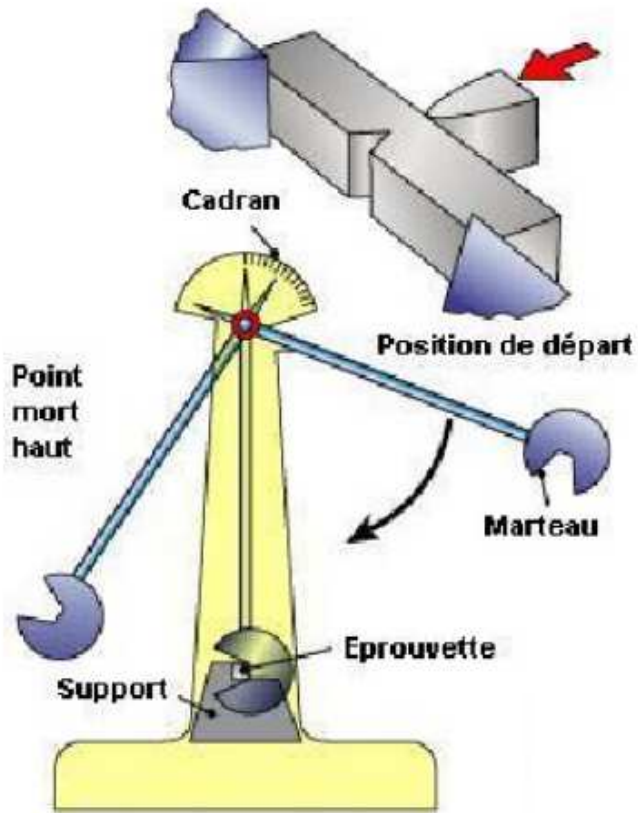
L'**essai de résilience** (essai au choc) consiste à rompre, par un seul choc, une éprouvette préalablement entaillée en son milieu et à mesurer l'énergie W (en joules) absorbée par la rupture. **La résilience** est définie par la lettre K (Joules/cm²)

L'**essai** se réalise sur une machine appelée mouton pendule rotatif. On mesure la **résistance au choc** du matériau.

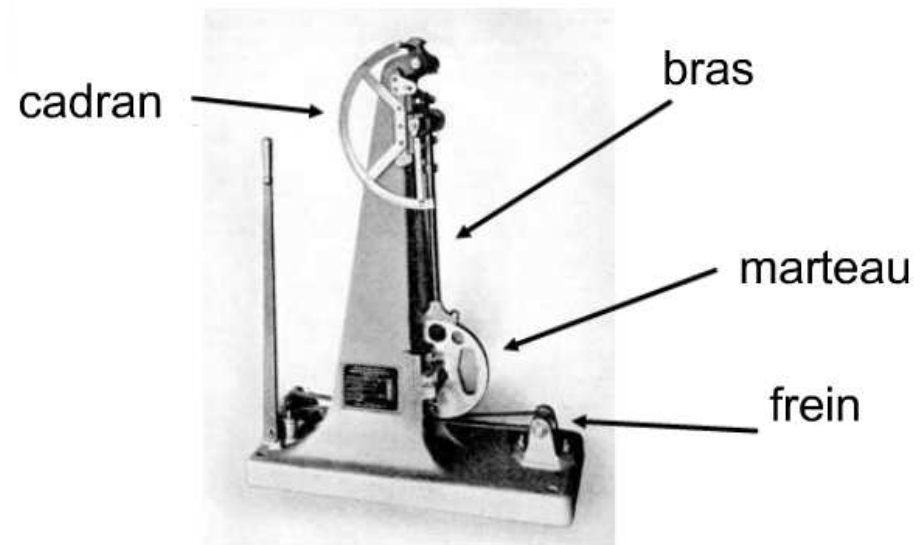
L'appareil utilisé est le mouton-pendule de Charpy. Une masse M portant un couteau C oscille dans un plan vertical autour d'un axe horizontal A à la manière d'un pendule.

L'éprouvette E fixée sur un support S est frappée par le couteau quand celui-ci passe par sa position la plus basse. Pour réaliser un essai, on écarte le bras du pendule d'un angle α par rapport à sa position d'équilibre et on le lâche. Le pendule frappe l'éprouvette, la rompt et remonte jusqu'à un point P. Il fait alors un angle α avec la verticale qui constituait sa position d'équilibre.

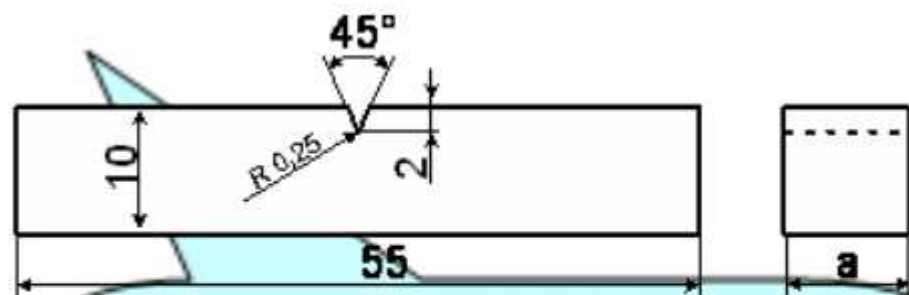
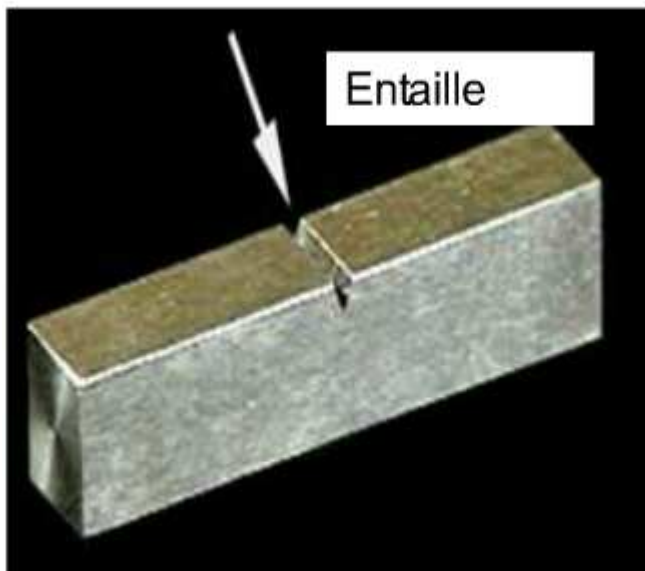
Les éprouvettes utilisées sont généralement des éprouvettes parallélépipédiques de 55 mm de long et de section carrée de 10 mm de côté. Elles présentent une entaille profonde de 5 mm terminée par un fond cylindrique de 1 mm de diamètre. Il existe des éprouvettes plus petites pour des essais de laboratoire.



MOUTON CHARPY

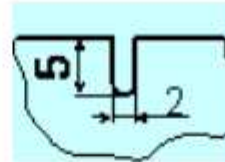


EPROUVETTE CHARPY

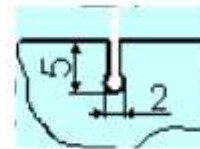


Dimensions
10x10x55 mm

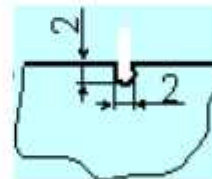
AUTRES TYPES D'ÉPROUVETTES



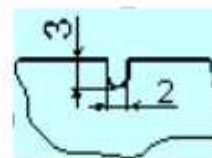
Charpy U



**Charpy trou
de serrure**



Mesnager



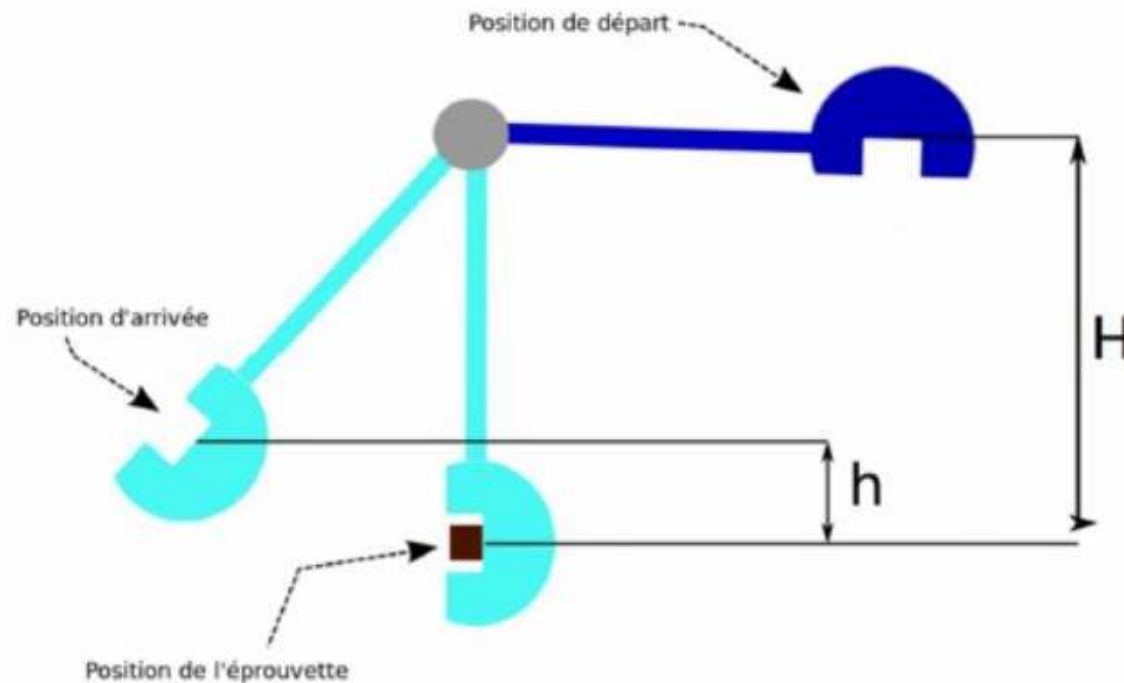
DVM

Dimensions de l'entaille en mm

C'est le barreau à entaille en V qui est le plus utilisé.

Schématisation de l'essai de résilience

- Au départ, le pendule est placé à une hauteur paramétrée qui devra délivrer une énergie normalisée de 294 Joules (si l'on tient compte de la gravité de $9,81 \text{ m/s}^2$)
- Le pendule est libéré, ce qui grâce à son propre poids, provoquera un choc.
- L'éprouvette encaissera une partie du choc, mais sera brisée.
- Le pendule continuera dans son élan jusqu'à une certaine hauteur, ce qui permettra de mesurer l'énergie absorbée par l'éprouvette.



L'énergie obtenue « **K** » (en négligeant les frottements) est égale à :

$$\mathbf{K} = m \times g \times (H - h)$$

m = masse du mouton-pendule [kg]

g = Accélération terrestre. [m s⁻²] (9.80665)

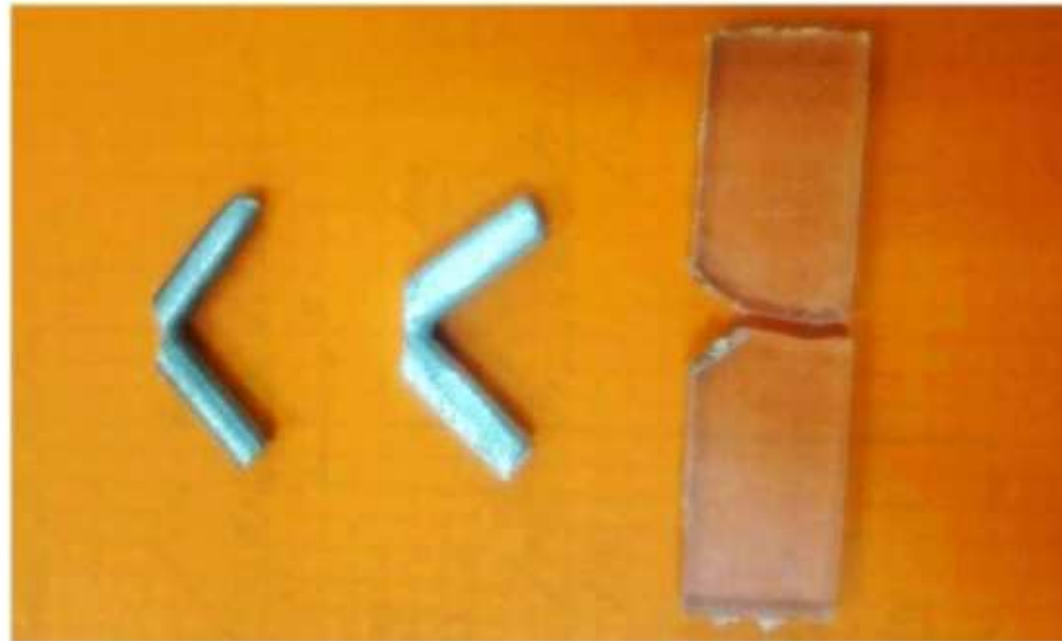
H = hauteur du mouton-pendule à sa position de départ [m]

h = hauteur du mouton-pendule à sa position d'arrivée [m]

La graduation de la machine permet généralement d'obtenir directement une valeur en joule.

Exemple

nous avons utilisé 3 éprouvettes-échantillons pour tester : Plexiglas, Aluminium, Acier.



$$H = 0,85 \text{ M}, m = 10 \text{ Kg}, g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Plexiglas :

Nous avons obtenu une valeur de $h = 0.7 \text{ m}$

$$K = m \times g \times (H-h)$$

$$K = 10 \times 9,81 \times (0,85-0,7) \quad \text{donc : } \boxed{K = 14,715 \text{ J}}$$



Aluminium :

Nous avons obtenu une valeur de $h = 0,45 \text{ m}$

$$K = m \times g \times (H-h)$$

$$K = 10 \times 9,81 \times (0,85-0,45) \quad \text{donc : } K = 39,24 \text{ J}$$

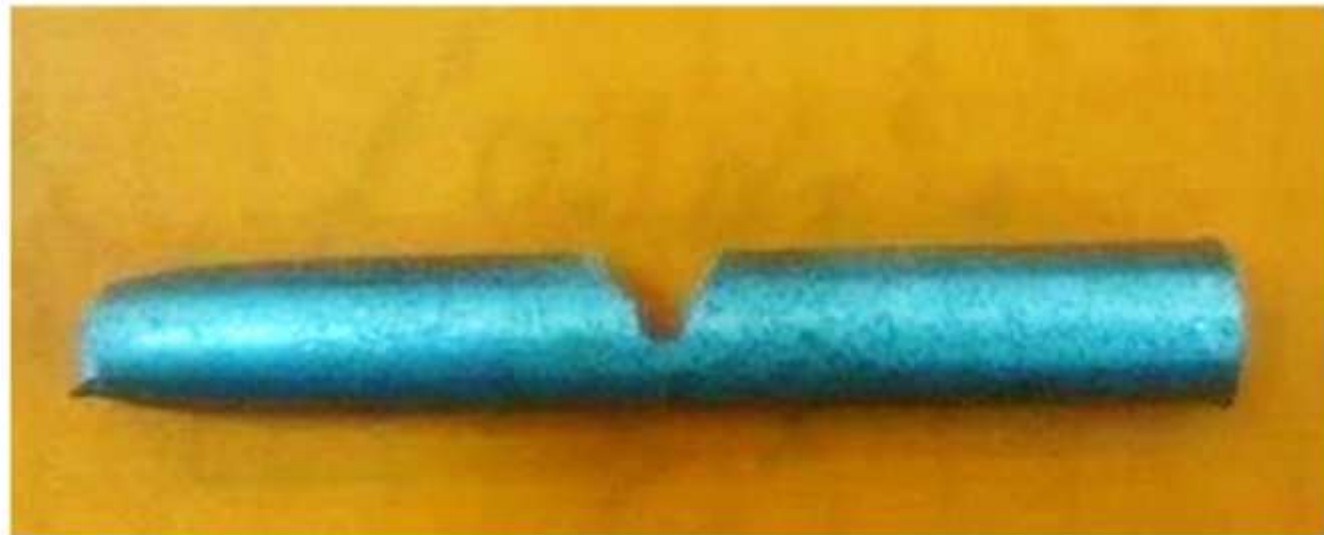


Acier :

Nous avons obtenu une valeur de $h = 0.40 \text{ m}$

$$K = m \times g \times (H-h)$$

$$K = 10 \times 9,81 \times (0,85-0,40) \quad \text{donc : } \mathbf{K = 44,145 \text{ J}}$$



L'essai Charpy a pour but de mesurer la résistance d'un matériau à la rupture, nous avons testé trois types de matériaux : Plexiglas, Aluminium, Acier. Notre essai a montré que l'acier est plus résistant à la rupture, sachant que l'énergie nécessaire pour le rompre est de $K = 44,14$ J, suivi par l'aluminium $K = 39,24$ J puis vient le plexiglas avec une valeur de $K = 14,71$ J.

D'après nos résultats, on peut classer les matériaux en fonction de leur résilience comme suit :

Acier > Aluminium > Plexiglas.

DÉFINITION DE LA RÉSILIENCE

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 :

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



INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LES COURBES DE TRACTION

Resilience, Temperature de
transition

LA TÉNACITÉ K_{IC}

Pour les matériaux fragiles, la résistance à la rupture est appelée ténacité K_{IC} .

Elle se déduit de la contrainte globale critique par la relation:

$$K_{IC} = \sigma_g^c \cdot \sqrt{\pi a} \cdot F_\sigma$$

a taille de défaut,

F_σ correction de géométrie,

σ_g^c contrainte critique.



Types d'essais: Essai Charpy,
Essai Pellini, Crash test

FACTEUR
D'INTENSITÉ DE
CONTRAINTES

FACTEUR DE CONCENTRATION DE CONTRAINTE ÉLASTIQUE

Il existe deux définitions du facteur de concentration de contraintes élastiques k_t .

À partir de la contrainte globale : $\sigma_{\max} = k_t \sigma_g$

À partir de la contrainte nominale : $\sigma_{\max} = k_t \sigma_N$

Le facteur de concentration de contrainte élastique ne dépend que des géométries de la pièce et de l'entaille.

$$k_t = f\left(\frac{a}{D}, \frac{a}{\rho}\right)$$

FACTEURS DE CONCENTRATION DE CONTRAINTES ET DE DÉFORMATION ÉLASTOPLASTIQUES

Les facteurs de concentration de contraintes et de déformation élastoplastique tiennent compte de la relaxation plastique qui se produit le plus souvent en fond d'entaille.

Définitions :

- Facteur de concentration de contraintes élastoplastique $k_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_N}$
- Facteur de concentration de déformation élastoplastique $k_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_N}$

FACTEURS DE CONCENTRATION DE CONTRAÎNTE ET DE DÉFORMATION ÉLASTOPLASTIQUES

Les facteurs de concentration de contrainte et de déformation élastoplastique tiennent compte de la relaxation plastique qui se produit le plus souvent en fond d'entaille.

Définitions :

- Facteur de concentration de contrainte élastoplastique $k_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_N}$
- Facteur de concentration de déformation élastoplastique $k_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_N}$