

---

# Chap. 1

## Méthodes de caractérisation des matériaux

---

**Contenu :**

- ☞ *Essai de traction*
- ☞ *Essai de dureté*
- ☞ *Essai de résilience*

## Plan de cours

### Objectifs généraux

- ☞ Connaître les corrélations propriétés-comportement
- ☞ Choisir, pour une application donnée, les propriétés permettant de satisfaire les fonctions de service visées.

### Objectifs spécifiques

- ☞ Connaître les principes et les modes opératoires des essais de traction, de dureté et de résilience
- ☞ Déterminer les caractéristiques mécaniques associées à partir des résultats expérimentaux de chaque essai.
- ☞ Comparer les résultats expérimentaux et évaluer les propriétés de rigidité et de résistance.

### Déroulement

Le chapitre sera abordé durant 3 séances de 1h:30min réparties comme suit :

- ☞ Première séance : Etude de l'essai de traction
- ☞ Deuxième séance : Etude des essais de dureté et de résilience
- ☞ Troisième séance : Correction des applications et TDs associés

### Prérequis

- ☞ Cours RDM (Semestre1)
- ☞ Cours Technologie de construction (Semestre1)

### Evaluation

Réussir plus de 70% des applications et des TD proposés

## Sommaire

<b>Introduction</b>	<b>6</b>
<b>1. Rappel sur les grandes familles des matériaux</b>	<b>6</b>
<b>1.1. Les métaux</b>	<b>7</b>
<b>1.2. Les polymères et les élastomères</b>	<b>7</b>
<b>1.3. Les céramiques et les verres</b>	<b>8</b>
<b>1.4. Les composites</b>	<b>8</b>
<b>2. Essai de traction</b>	<b>9</b>
<b>2.1. Objectifs de l'essai</b>	<b>9</b>
<b>2.2. Principe de l'essai</b>	<b>9</b>
<b>2.3. Eprouvette</b>	<b>9</b>
<b>2.4. Exécution de l'essai</b>	<b>10</b>
<b>2.5. Exploitation des résultats de l'essai</b>	<b>11</b>
<b>2.5.1. Courbe conventionnelle</b>	<b>11</b>
<b>2.5.2. Courbe rationnelle de traction</b>	<b>13</b>
<b>2.6. Déformation élastique et rigidité</b>	<b>14</b>
<b>2.7. Déformation plastique et écrouissage</b>	<b>16</b>
<b>3. Essai de dureté</b>	<b>19</b>
<b>3.1. Objectif et principe de dureté</b>	<b>19</b>
<b>3.2. Epreuves</b>	<b>19</b>
<b>3.3. Exécution de l'essai</b>	<b>19</b>
<b>3.3.1. Essai Brinell</b>	<b>20</b>
<b>3.3.2. Essai Vickers</b>	<b>20</b>
<b>3.3.3. Essai Rockwell</b>	<b>21</b>
<b>3.3.4. Microdureté et nanodureté</b>	<b>24</b>
<b>3.3.5. Nanoindentation.</b>	<b>22</b>
<b>3.3.6. Correspondance entre échelles de dureté</b>	<b>23</b>
<b>4. Essai de résilience</b>	<b>24</b>
<b>4.1. Objectif et principe de l'essai</b>	<b>24</b>
<b>4.2. Epreuve</b>	<b>25</b>
<b>4.3. Principe de l'essai</b>	<b>25</b>
<b>4.4. Machine de l'essai</b>	<b>26</b>
<b>4.5. Mode opératoire et consignes de sécurité</b>	<b>26</b>
<b>4.6. Conduite de l'essai et exploitation des résultats</b>	<b>27</b>

## Introduction

Le choix des matériaux pour une application industrielle donnée exige une connaissance et une maîtrise de ses caractéristiques mécaniques. A ce stade, la caractérisation mécanique des matériaux repose sur l'étude de son comportement vis-à-vis les sollicitations extérieures qui engendrent des contraintes et des déformations. Pour cela, on recourt à un certain nombre d'essais normalisés. Ces derniers, permettent de déterminer les grandeurs physiques caractérisant le comportement mécanique des matériaux testés.

Le premier chapitre portera donc sur la caractérisation mécanique usuelle indispensable pour les calculs de structures et de dimensionnement des pièces mécaniques en vue de prédire leur aptitude de résistances aux différentes sollicitations mécaniques imposées en service. On s'y adresse, donc, à décrire les techniques expérimentales associées permettant la caractérisation mécanique des matériaux : soient leur résistance à la déformation évaluée par les essais de traction et de dureté ainsi que leur résistance au choc mécanique évalué par un essai de résilience.

La maîtrise de nouveaux matériaux a été à l'origine des révolutions dans l'histoire de technologies inventées. Les âges de la préhistoire sont d'ailleurs définis par les matériaux employés, âge de la pierre, âge du bronze, du fer. Aujourd'hui, le nombre de matériaux ou en tout cas le nombre de références est considérable et en constante croissance. En effet, la science des matériaux permet de concevoir de nouveaux matériaux adaptés à chaque nouvelle application. On pourra distinguer deux grandes catégories de matériaux :

- Les matériaux de structure, qui seront l'objet de ce cours et qu'on utilise essentiellement pour leurs capacités à soutenir des sollicitations mécaniques et/ou thermiques.
- Les matériaux fonctionnels, qu'on utilise pour leurs propriétés physiques, telles que conductivité ou semi-conductivité électrique, magnétisme, propriétés optiques ...

Cependant, même en se restreignant aux matériaux de structure, le nombre de matériaux existant reste considérable. L'objectif de ce cours n'est donc pas de les étudier de manière exhaustive, mais de se donner les éléments de compréhension permettant de trouver pour une application particulière la solution matériau la plus adaptée. Une solution matériau pour une application comprend trois volets, la structure, le procédé de mise en œuvre et la tenue en service. Le cours de cette année portera sur les propriétés des grandes familles de matériaux. L'accent sera mis sur les relations entre la structure du matériau et ses propriétés mécaniques.

### 1. Rappel sur les grandes familles des matériaux

Un matériau est une matière d'origine naturelle ou artificielle que l'Homme façonne pour en faire des objets. On distingue quatre grandes familles de matériaux (fig. 1).

- **Les matériaux métalliques.** Ce sont des métaux ou des alliages de métaux. (fer, acier, aluminium, cuivre, bronze, fonte, etc.)

- **Les matériaux organiques.** Ce sont des matériaux d'origine animale, végétale ou synthétiques. (bois, coton, laine, papier, carton, matière plastique, le caoutchouc, le cuir, etc.)
- **Les matériaux minéraux.** Ce sont des roches, des céramiques ou des verres. (céramique, porcelaine, pierre, plâtre, verre, etc.)
- **Les matériaux composites :** Ce sont des assemblages d'au moins deux matériaux non miscibles (fibres de verre, fibres de carbone, contreplaqué, béton, béton armé, kevlar, etc.)

Les membres de la même famille ont des traits communs : propriétés, méthodes de mise en œuvre et souvent applications.

### 1.1. Les métaux

Les métaux (liaisons métalliques). On les obtient soit par réduction à haute température de leurs oxydes en présence de carbone (ex. fer) ou par électrolyse à haute température (ex. aluminium). Ce sont les matériaux les plus employés pour les applications structurales et pour l'essentiel des métaux ferreux (90% ferreux, les non-ferreux étant des alliages de Al, Cu, Ni et Ti). Ils sont capables de se déformer de manière permanente (ductiles) ce qui permet de réaliser des opérations de mise en forme par déformation plastique (emboutissage, forge, estampage...) ou d'assemblage par déformation plastique. Par ailleurs les matériaux métalliques sont denses, et bons conducteurs thermiques et électriques.

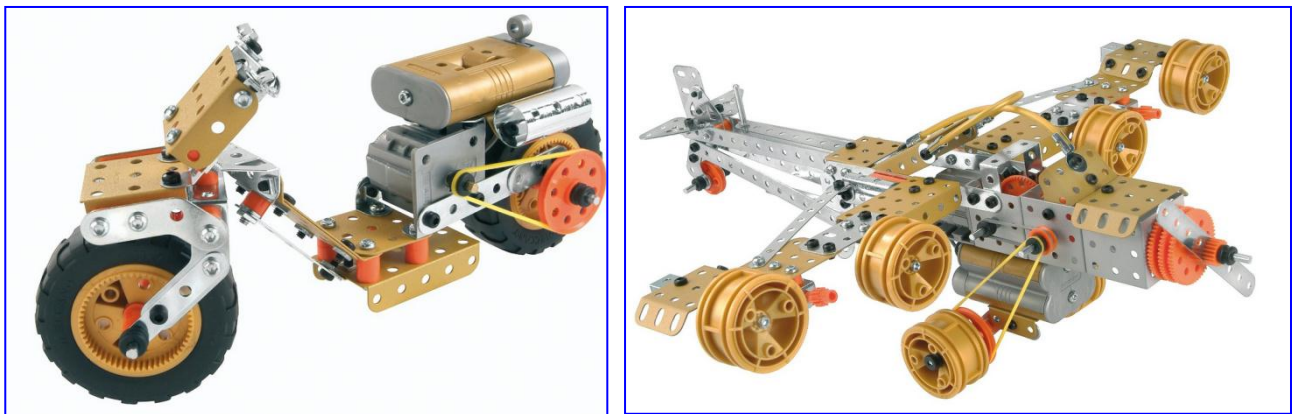


Fig.1.1. Exemples d'assemblages des jouets d'enfants en différentes pièces constituées de métal, de polymères et d'élastomères

### 1.2. Les polymères et les élastomères

Ils possèdent des modules faibles (environ 50 fois inférieures à ceux des métaux) mais ils peuvent être résistants, et ils peuvent se déformer d'une façon importante, des pièces compliquées possèdent plusieurs fonctions peuvent être moulées en une seule opération. Leurs propriétés dépendent fortement de la température, ils résistent à la corrosion et ont des coefficients de frottements faibles. Un élastomère est un polymère présentant des propriétés « élastiques », obtenues après réticulation à différentes échelles. Il supporte de très grandes déformations avant rupture. Le terme de caoutchouc est un synonyme usuel d'élastomère.

### 1.3. Les céramiques et les verres

Cette famille de matériau possède également des modules élevés. Mais contrairement aux métaux, les céramiques et les verres sont fragiles et possèdent une faible tolérance aux concentrations des contraintes (comme les trous et les fissures). Leur résistance à la traction signifie la résistance à la rupture.

Ce sont des matériaux rigides et durs et résistent à l'abrasion, elles conservent leurs résistances à haute températures et résistent bien à la corrosion.



Fig. 1.2. Exemples d'objets faits en céramiques et verres

### 1.4. Les composites

Ces matériaux combinent des propriétés intéressantes des autres familles sans en avoir leurs inconvénients. Ils sont légers, rigides et résistants et peuvent être tenace. La majorité des composites disponibles aujourd'hui sont à matrice polymère (en général époxyde ou polyester) renforcés des fibres de verre, carbone, ou kevlar (Le Kevlar est une fibre synthétique qui possède de très bonnes propriétés mécaniques en traction (résistance à rupture, de 3100 MPa et module entre 70 et 125 GPa) mais ils ne peuvent pas être utilisés au-dessous de 250°C à cause de la matrice en polymère mais leurs performance à température ambiante sont exceptionnelle. Les pièces en composite coutent chères et difficiles à mettre en forme et à assembler c'est pourquoi le concepteur ne les utilisera que lorsque le surcroît de la performance justifie le surcoût.

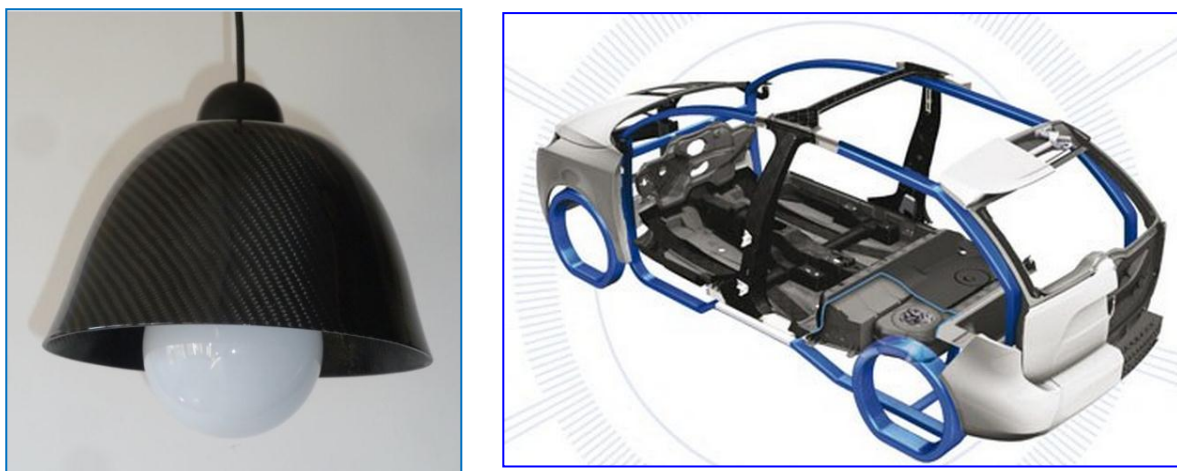


Fig. 1.3. Lampe en composite à fibre de carbone Fig. 1.4. Carrosserie composite pour voiture « Hybride »

## 2. Essai de traction

### 2.1. Objectifs de l'essai

L'essai de traction est le moyen le plus couramment employé pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau sous une sollicitation progressive à vitesse de chargement faible ou modérée. L'essai permet, en outre, l'étude et l'identification des mécanismes physiques de déformation plastique. Cette dernière, gouverne le processus majeur de mise en forme, par ou sans enlèvement de matière, des matériaux dans la plus part des procédés de fabrication utilisés dans l'industrie mécanique.

### 2.2. Principe de l'essai

Des éprouvettes du matériau concerné, en forme de barreau cylindrique ou prismatique comportant une partie centrale calibrée à section constante  $S_0$  et longueur  $L_0$  raccordée à chaque extrémité à deux têtes de section plus importante, sont fixées dans une machine de traction. Sauf indications contraires, l'essai est effectué à la température ambiante dans les limites comprises entre 10°C et 35°C. Des essais de traction peuvent être effectués à des différentes températures allant de la température cryogénique à celle des hautes températures inférieures à la moitié de la température de fusion pour modéliser le comportement du matériau en fonction de la température.

### 2.3. Eprouvette

La forme et les dimensions des éprouvettes dépendent de la forme et des dimensions des produits métalliques dont on veut déterminer les caractéristiques mécaniques. L'éprouvette est généralement obtenue par usinage d'un prélèvement d'un produit ou d'une ébauche moulée. Cependant, les produits de la section constante (profilés, barres, files, etc.), ainsi que les éprouvettes brutes de fonderie (par exemples : fontes, alliages non ferreux) peuvent être soumises à l'essai sans être usinées.

Les éprouvettes usinées doivent comporter un congé de raccordement entre les têtes de fixation et la partie calibrée lorsque celles-ci sont de dimensions différentes. Les dimensions de ce congé peuvent être importantes et il est recommandé pour qu'elles soient définies dans la spécification du matériau. Les têtes de fixation peuvent être de toute forme adaptée aux dispositifs de fixation de la machine. Les éprouvettes non usinées (par exemple celles brutes fonderie) doivent comporter un congé de raccordement entre les têtes de fixation et la partie calibrée. Les dimensions de ce congé sont importantes et il est recommandé pour qu'elles soient définies dans la norme de produit.

**On note** :  $S_0$  : section initiale en  $\text{mm}^2$

$L_0$  : longueur initiale entre repères

$L_c$  : longueur de la partie calibrée

$S_u$  : section minimale après rupture

$L_u$  : Longueur ultime après rupture

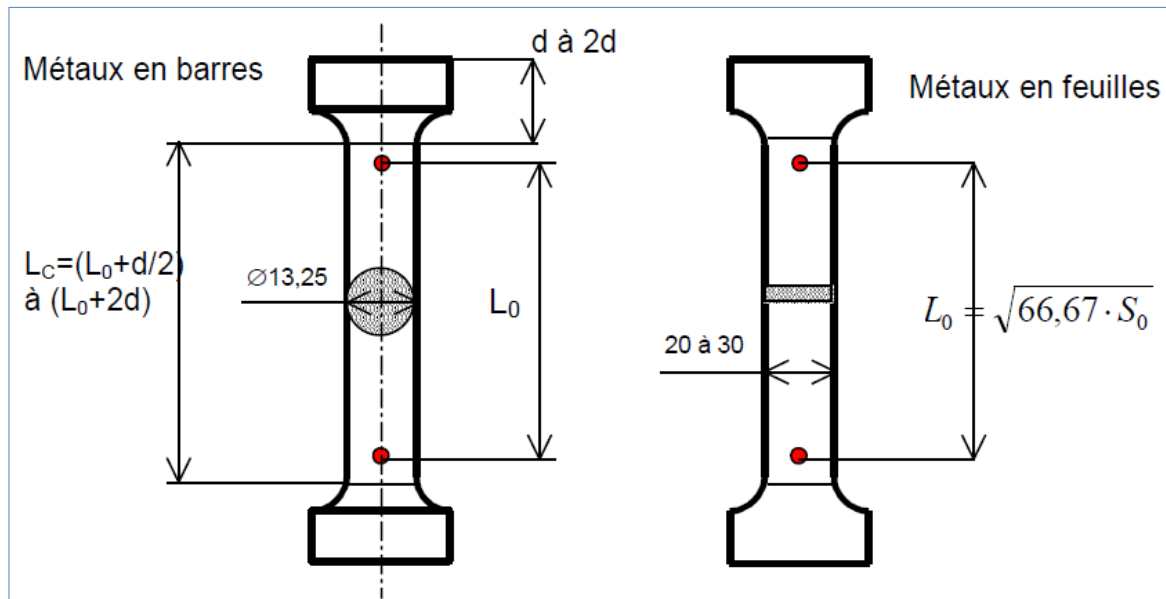


Fig1. 5. Dimension de l'échantillon pour l'essai de traction

Tous les paramètres qui sont déduits de l'essai de traction traduisent les propriétés de l'acier dans la direction de l'essai. Ces valeurs dépendent donc de la direction de prélèvement de l'éprouvette par rapport à d'éventuelles directions d'anisotropie (par exemple en carrosserie, la direction de laminage de la tôle mince). Pour les tôles laminées, la direction de prélèvement doit donc toujours être précisée :

- Sens long SL (repéré par l'indice  $0^\circ$ )
- Sens travers ST (repéré par l'indice  $90^\circ$ )
- Sens "oblique" (repéré par l'indice  $45^\circ$ ).

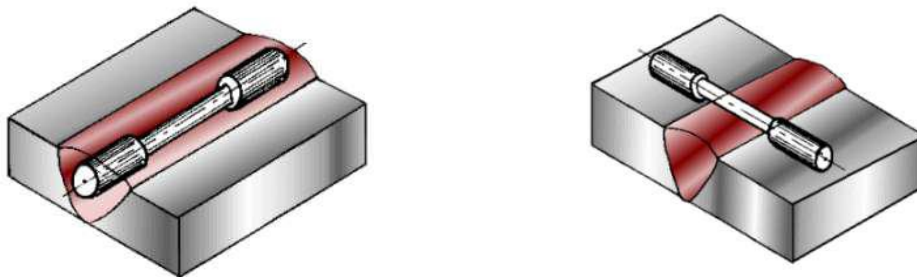


Fig.1.6 : évaluation des caractéristiques d'un cordon de soudure

## 2.4. Exécution de l'essai

Une machine de traction est constituée d'un bâti rigide équipé d'un travers fixe à laquelle est fixée l'une des têtes de l'éprouvette ; l'autre extrémité de l'éprouvette est fixée à une traverse mobile. Le mouvement de la traverse mobile est assuré soit par une commande hydraulique, soit des vis sans fin. La charge imposée à l'éprouvette est mesurée par un dynamomètre, et l'allongement par un extensomètre. Ceci, permettra d'aboutir à des résultats d'enregistrement de la courbe brut de traction,  $F=F(\Delta l)$ , caractéristique de l'échantillon et de sa géométrie.



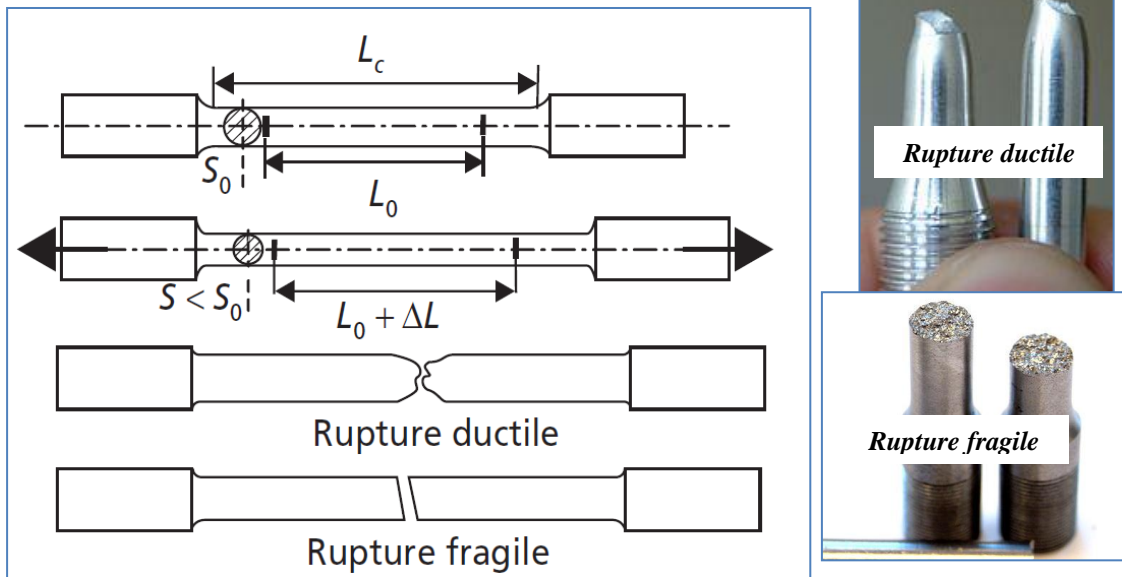


Fig. 1.7. Schéma d'une éprouvette de traction cylindrique et de son évolution en cours d'essai.



Fig. 1.8. Machine de traction

## 2.5. Exploitation des résultats de l'essai

### 2.5.1. Courbe conventionnelle

Afin de pouvoir utiliser les courbes brutes de traction, on doit les modifier pour que les résultats obtenus soient fonction que de matériau étudié et non de la géométrie de l'éprouvette. Pour ce faire, on rapporte la charge  $F(N)$  à la section initiale  $S_0$  ( $\text{mm}^2$ ) de l'éprouvette en vue d'obtenir la contrainte conventionnelle  $\sigma_c(\text{MPa})$ . Et on rapporte l'allongement  $\Delta l$  ( $\text{mm}$ ) à la longueur initiale,  $l_0$ , pour obtenir la déformation conventionnelle ( $\epsilon_c$ ), soient :

$$\sigma_c = \frac{F}{S_0} [\text{Mpa}]$$

$$\epsilon_c = \frac{\Delta l}{l_0} [\%]$$

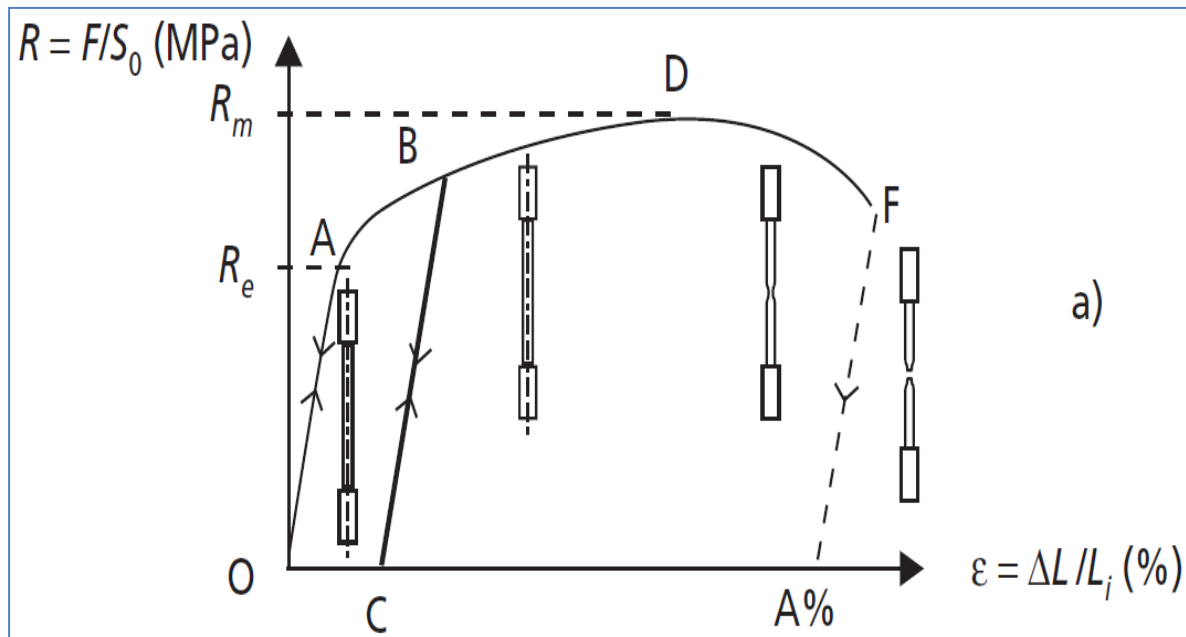


Fig. 1.9. Courbes conventionnelles typiques de traction

**OA** : allongement élastique linéaire, réversible.

**Au-delà de A** : déformation plastique permanente + déformation élastique.

La suppression de la force appliquée (BC) laisse apparaître un allongement plastique rémanent (OC). Une remise en charge conduit à une nouvelle limite d'élasticité (CB).

**Re = Fe / S<sub>0</sub>** : limite apparente d'élasticité (MPa) :

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

**Rp<sub>0,2</sub>** : limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % d'allongement plastique; sa détermination nécessite souvent l'usage d'un extensomètre.

**AD** : allongement élastique + allongement plastique réparti.

**R<sub>m</sub> = F<sub>m</sub> / S<sub>0</sub>** : résistance à la traction (MPa).

**DF** : apparition et progression d'une striction (réduction de section localisée) dans les matériaux ductiles. En F : la rupture de l'éprouvette.

**Z%** : Coefficient de Striction, Avec **S<sub>u</sub>** : la section à la rupture :

$$Z\% = 100 \cdot \frac{S_0 - S_u}{S_0}$$

**A % = ΔLu / Li** : allongement pour cent après rupture (%) :

$$A\% = 100 \cdot \frac{L_u - L_0}{L_0}$$

**E = Re / ε<sub>e</sub>** : module de Young. En pratique, seule l'utilisation d'un dispositif extensométrique très précis permet d'exploiter la pente de la montée élastique pour la mesure de E.

**Cas d'un à comportement fragile** : Dans le cas d'un matériau fragile, la rupture survient en fin de domaine élastique. L'allongement à la rupture est nul ou très faible. On ne peut déduire de la courbe que le module de Young E, et la résistance à la traction **Rm**

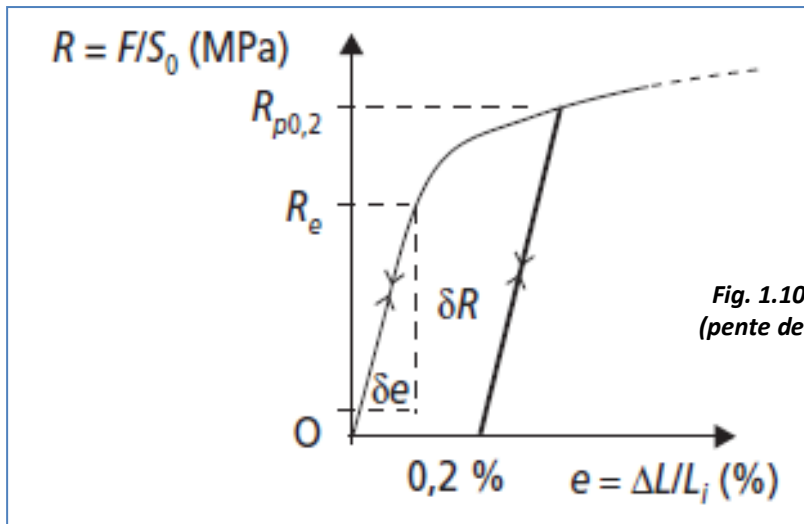


Fig. 1.10. Détail pour le calcul de  $E$  (pente de la partie élastique) et  $R_{p0,2}$

La courbe conventionnelle est donc obtenue à partir d'enregistrement  $F-\Delta l$  effectué lors de l'essai en rapportant la force à la section initiale pour raisonner en terme de contrainte, et en rapportant l'allongement à la longueur initiale pour raisonner en termes d'allongement relatif. On obtient ainsi une courbe intrinsèque au matériau, indépendante des dimensions de l'éprouvette utilisée.

### 2.5.2. Courbe rationnelle de traction

C'est la courbe obtenue en rapportant la force à la section minimale instantanée  $S$ , pour raisonner en termes de contrainte vraie  $\sigma = F/S$ , et en rapportant l'allongement à la longueur instantanée pour raisonner en termes de déformation rationnelle  $\varepsilon = \delta l/l$ . La courbe ainsi obtenue est croissante, même pendant la striction. Le volume de l'éprouvette restant constant et la déformation étant uniformément répartie de  $O$  à  $D$ , on a :

**Contrainte vraie  $\sigma_v$  :** Elle tient compte de la variation de section au cours de l'essai, et est égale à la charge rapportée à la section instantanée :

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ [MPa]}$$

En admettant que le volume de la partie calibrée (de longueur utile) de l'éprouvette reste constant en raison d'une déformation plastique homogène avec conservation du volume, on a :

$$S_0 l_0 = S l = S(l_0 + \Delta l) \quad \text{Ce qui permet d'écrire : } S = \frac{S_0}{1 + \frac{\Delta l}{l_0}} = \frac{S_0}{1 + e}$$

Portant l'expression de la section dans la relation de la contrainte vraie, nous obtenons :

$$\sigma_v = \frac{F}{S_0}(1 + e) = \sigma_c(1 + \varepsilon_c)$$

**Déformation rationnelle  $\varepsilon_r$  :** L'allongement instantané est égal à  $dl/l$  et, au même instant, l'allongement depuis le début de l'essai est, en considérant des allongements infiniment petite  $dl$

$$\varepsilon_r = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln(1 + \varepsilon_c)$$

L'avantage de cette définition est la mise en évidence de la propriété d'additivité, utile pour les calculs de plasticité. La différence entre  $\varepsilon_c$  et  $\varepsilon_r$  devient important au-delà de 20% de déformation. Elle peu être comme le travail nécessaire par unité de volume pour provoquer la rupture.

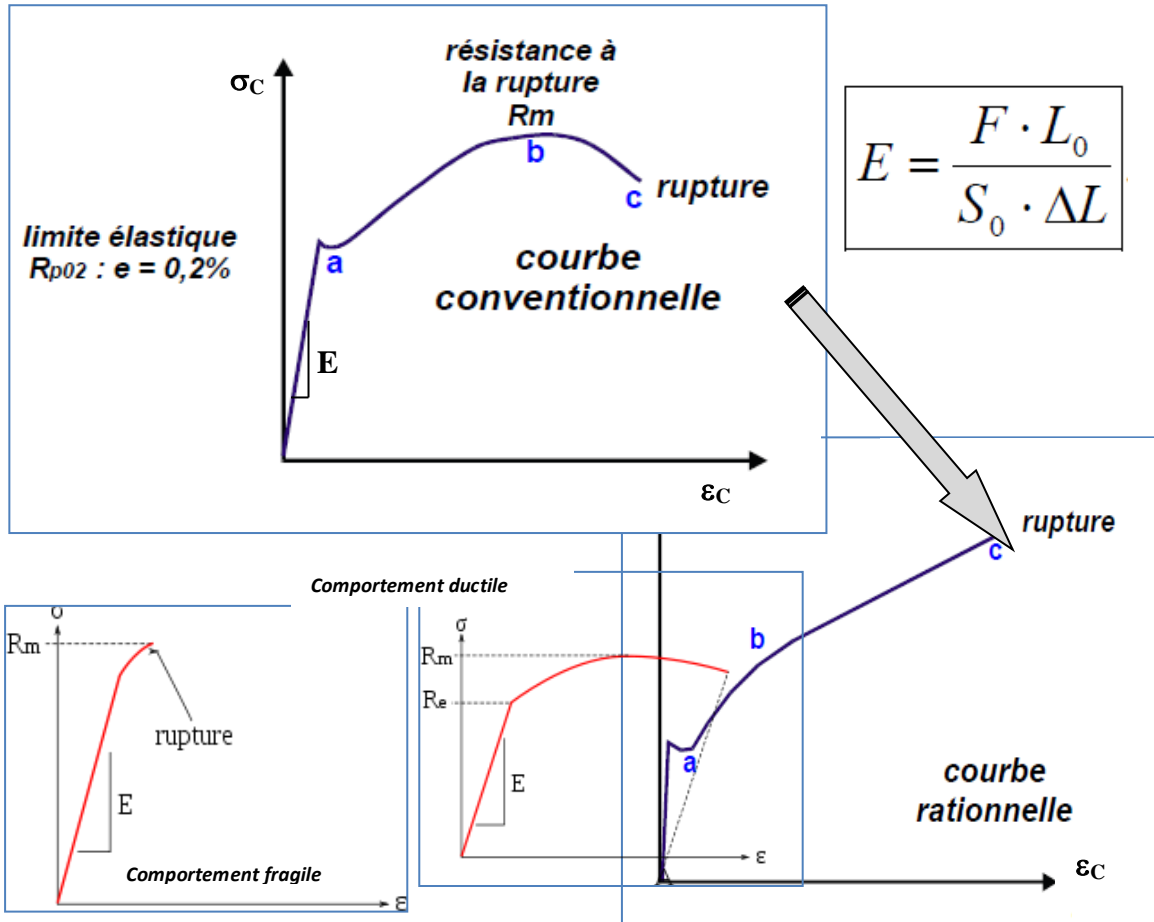
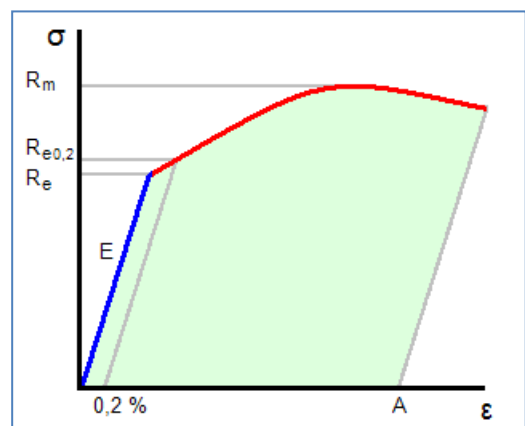


Fig.1. 11. Exploitation des résultats de traction

### 2.6. Déformation élastique et rigidité

Le module de Young ou module d'élasticité (longitudinale) ou, noté « E », encore module de traction est la constante mesurable et qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et le début de la déformation d'un matériau élastique. Le module d'Young E décrit le comportement en traction et en compression.

Pour de faibles déplacements, la force de rappel peut être considérée comme proportionnelle au déplacement :  $d-d_0$  (pour le cas d'une éprouvette



cylindrique par exemple). Les allongements (ou raccourcissements) relatifs ou déformations  $\varepsilon$  du solide (sans dimension), sont alors proportionnels à la densité surfacique de force, ou contrainte  $\sigma$  (figure 6.1), ce qui traduit la loi de Hooke :

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \cdot \frac{d - d_0}{d} = E\varepsilon$$

Les contraintes s'expriment en MPa (ou N/mm<sup>2</sup>) et les déformations étant sans dimensions, le coefficient E, appelé module d'élasticité à la traction ou module de Young du matériau, s'exprime en MPa. Simultanément à la déformation dans la direction d'application de la force, des déformations de signe opposé se produisent dans les directions orthogonales. Dans les axes de la ci-dessous, les déformations élastiques peuvent toutes s'exprimer en fonction de la contrainte  $\sigma_x$  appliquée dans la direction x.

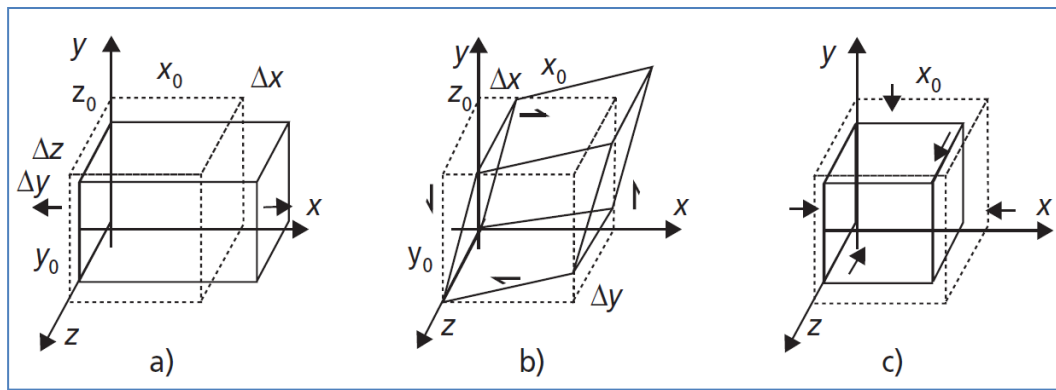


Fig. 1.12. Schéma des déformations élastiques provoquées par différentes sollicitations. a) Contrainte de traction uni-axiale  $\sigma_x$ . b) Contrainte de cession  $\tau_{xy}$  dans le plan xy. c) Pression hydrostatique p.

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta x}{x_0} = \frac{\sigma_x}{E} \text{ et } \varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y_0} = \varepsilon_z = \frac{\Delta z}{z_0} = -\nu \varepsilon_x = -\frac{\nu}{E} \sigma_x$$

«  $\nu$  », sans dimension, est ici le coefficient de Poisson, autre constante caractéristique du comportement élastique du matériau. Dans le cas d'une contrainte tangentielle de cession «  $\tau$  », une déformation par distorsion «  $\gamma$  » apparaît, qui est approximativement proportionnelle à la cession appliquée.

$$\gamma = \frac{\Delta y}{x_0} = \frac{\Delta x}{y_0} = \frac{\tau}{2G}$$

La constante G (ou  $\mu$ ) est appelée module d'élasticité au cisaillement du matériau, en MPa. Par ailleurs, une compression hydrostatique sous une pression p permet de définir le module de compressibilité K (ou  $\chi$ ) du matériau, en MPa, à partir de la variation relative de volume :

$$\frac{\Delta V}{V_0} = -\frac{p}{K}$$

Dans le cas courant d'un matériau isotrope, deux constantes d'élasticité (E et  $\nu$  par exemple) suffisent à caractériser son comportement élastique. Les constantes E,  $\nu$ , G et K ne

sont donc pas indépendantes, mais peuvent toutes s'exprimer en fonction de deux d'entre elles grâce aux relations :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} K = \frac{E}{3(1-2\nu)} G = \frac{3}{2} K \frac{(1-2\nu)}{(1+\nu)} E = \frac{9KG}{G+3K}$$

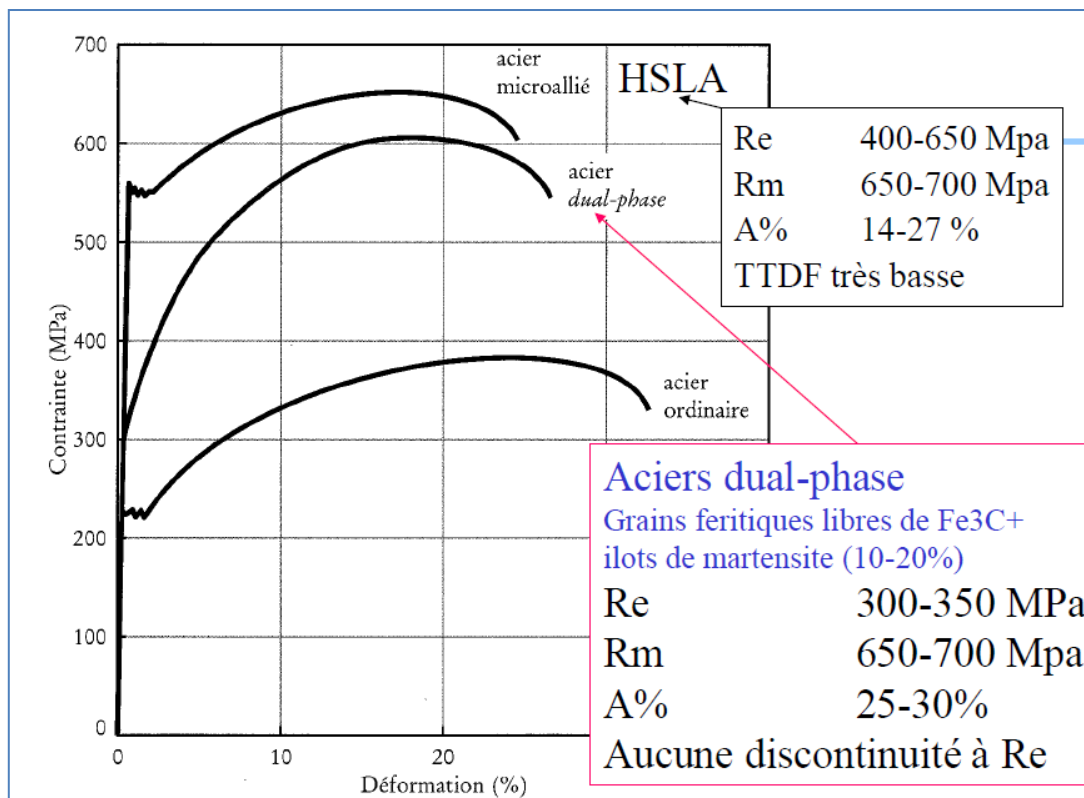
## 2.7. Déformation plastique et écrouissage

Le comportement élastique, caractérisé par la réversibilité des déformations lors de la suppression des contraintes, ne se manifeste seul que pour des contraintes inférieures à une valeur limite, appelée limite d'élasticité. Au-delà de cette valeur, des déformations permanentes s'ajoutent aux déformations élastiques ou bien la rupture se produit. Pour compléter la modélisation de la plasticité anisotrope dans le cadre des modèles d'écrouissage isotrope, il convient de préciser la loi d'écrouissage  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}^p)$  reliant la contrainte équivalente et la déformation plastique équivalente. Les lois empiriques usuelles sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1.1. Lois d'écrouissage usuelles

Loi d'écrouissage	$\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}^p)$	$\gamma = \frac{1}{\bar{\sigma}} \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}^p}$	Remarques
Loi de Hollomon	$\bar{\sigma} = K(\bar{\varepsilon}^p)^N$ <i>N exposant d'écrouissage</i>	$\gamma = \frac{N}{\bar{\varepsilon}^p}$	<i>Limite élastique nulle (La limite élastique doit être faible devant l'écrouissage)</i>
Loi de Swift	$\bar{\sigma} = K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}^p)^N$ <i><math>K\varepsilon_0^N</math> limite élastique</i>	$\gamma = \frac{N}{\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}^p}$	<i>Bien adaptée aux aciers doux, aciers faiblement alliés</i>
Loi de Ludwik	$\bar{\sigma} = \sigma_E + K(\bar{\varepsilon}^p)^N$ <i><math>\sigma_E</math> limite élastique</i>	$\gamma = \frac{N(\bar{\sigma} - \sigma_E)}{\bar{\sigma}\bar{\varepsilon}^p}$	<i>Fort écrouissage à faible déformation</i>
Loi de Voce	$\sigma = \sigma_s(1 - \alpha \exp(-\beta \varepsilon))$ <i><math>\sigma_s</math> contrainte de saturation</i> $0 < \alpha < 1$ $\beta < 0$	$\gamma = -\frac{\alpha\beta}{\exp(-\beta\bar{\varepsilon}^p) - \alpha}$	<i>Bien adaptée aux alliages d'aluminium Hautes température</i>

La modélisation de la partie élastique peut être établie selon les capacités de la matière à supporter les déformations plastiques avant de se rompre. Plusieurs formulations ont été prouvées pour de nombreux auteurs et qui peuvent représentées sur le tableau ci-dessous.

**Exercice d'application 1**

On vous donne les trois courbes conventionnelles de traction pour trois nuances et on vous demande de :

1. Consulter la bibliographie pour collecter des informations et connaissances sur les trois nuances présentées dans cet exercice, soit l'acier micro-allié, dual-phase et acier ordinaire.
2. Dresser un tableau dans lequel vous présenterez tous les résultats qui peuvent être déduits à partir d'une courbe de traction conventionnelle et effectuer les calculs si nécessaire, surtout pour le cas de E.
3. Comparer les résultats de la question 1. en termes de résistance, de déformabilité ou de ductilité.
4. Faire tous les calculs nécessaires, les graphiques pour identifier les paramètres des lois d'érouissage pour les trois nuances susnommées. On vous donne : Acier micro-allié (Ludwik), Dual-phase (loi de Hollomon) et Acier ordinaire (loi de Swift).
5. Démontrer pour chaque loi l'expression de la déformation par distorsion «  $\gamma$  ».

**Exercice d'application 2**

Analyse d'un essai de traction simple. Déformation conventionnelle ou rationnelle. Limite d'élasticité conventionnelle  $R_{p0.2}$ %. Critère de plasticité de Von Mises. Les données du tableau 1 ont été obtenues lors d'un essai de traction sur une éprouvette d'acier doux à 0.38% de Carbone, à fût cylindrique de diamètre  $D_0=12$  mm et de longueur utile  $L=20$  mm. Un extensomètre a été monté sur l'éprouvette. L'écartement initial  $l_0$  des couteaux de

l'extensomètre est égal à  $l_0=10 \text{ mm}$ . On mesure l'évolution de l'écartement  $l$  des couteaux de l'extensomètre en fonction de l'effort appliqué sur l'éprouvette lors de l'essai.

**Tableau 1.2 : Résultats de l'essai de traction unidirectionnelle**

N° du point	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta l$ (mm)	0	0.01	0.03	0.05	0.12	0.20	0.48	0.82	1.25	1.44	1.57	1.75
F (KN)	0	30.3	62.5	59.5	68.4	84.3	91.2	91.7	90.7	90.3	87.1	78.1

#### ◇ Questions

1. Tracer la courbe  $F=f(\Delta l)$ , Déduire  $F_e$ , et  $\Delta l_u$ .
2. Dresser un tableau de valeur et tracer la courbe conventionnelle  $\sigma_c=f(\epsilon_c)$
3. Estimez le module d'élasticité du matériau
4. Estimez la limite d'élasticité du matériau  $R_e$ , et déduire graphiquement sa limite d'élasticité conventionnelle  $R_{p0.2}$ .
5. Discuter l'utilité et la différence entre  $R_e$  et  $R_{p0.2}$ .
6. Etudiez les différentes parties de la courbe. En particulier, que se passe-t-il au point 4 et entre les points 4 et 5.
7. Calculer le coefficient de striction Z% si la section  $D_u$  à la rupture est **9.66mm**.
8. Déterminer la contrainte maximale en traction  $R_m$  du matériau.
9. Que se passe-t-il lors de la striction ?



### 3. Essai de dureté

#### 3.1. Objectif et principe de dureté

La dureté est la mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration. Cette dernière est fonction de plusieurs facteurs dont les principaux sont : la déformation élastique et plastique, le frottement pénétrateur-surface indentée, la géométrie de pénétrateur, ses propriétés mécaniques et la charge qui y est impliquée. Le tableau 2. Résume les caractéristiques des principales méthodes de mesure de la dureté utilisée : la dureté Brinell (HB), la dureté Vickers (HV), les duretés Rockwell C et B (HRC et HRB). Bien que les valeurs de dureté soient données sans dimensions, les duretés Brinell et Vickers, de par leur définition, sont homogènes à des contraintes.

#### 3.2. Eprouvettes

La surface de l'éprouvette doit être propre, plane et lisse soigneusement préparée. Plus des dimensions du pénétrateur sont petites, plus l'état de la surface doit être lisse. Une application du polissage en mode automatique est parfois obligatoire. La préparation de l'éprouvette doit être faite sans provoquer des altérations des propriétés du matériau dues, par exemple, au chauffage ou à, l'écrouissage.

L'épaisseur de l'éprouvette doit être suffisante pour qu'aucune trace d'une déformation ne soit visible sur la surface opposée à celle de l'application de la charge. D'après une règle générale, l'épaisseur minimale est au moins dix fois supérieure à la profondeur de l'empreinte.

#### 3.3. Exécution de l'essai

On emploie pour l'exécution de l'essai un dispositif qui est suffisamment rigide et stable. L'essai doit être fait sans choc et sans vibrations, autrement les résultats sont erronés. L'éprouvette doit être installée sur un support rigide du dispositif pendant l'action de la charge. Les essais les plus courants se font par pénétration, les essais les plus classiques sont les essais Brinell, Vickers et Rockwell.



#### Mode Opérateur (Cas de l'essai Rockwell) :

- Préparer de la surface à tester
- Monter l'indenteur adéquat
- Régler la charge et les paramètres d'essai
- Monter l'éprouvette sur son support (de révolution ou plate)
- Appliquer la pré-charge de 10N (Indication lumineuse)
- Appliquer la charge de l'essai en appuyant sur la manette
- Retirer la charge
- Lire la valeur de dureté correspondante
- Pour la précision de la mesure : effectuer au moins 3 reprises pour chaque essai.

**3.3.1. Essai Brinell**

Il consiste à imprimer dans la pièce à essayer une bille en acier ou en carbures de tungstène de diamètre **D(mm)** sous une charge **F(N)**, et à mesurer le diamètre **d** de l’empreinte résiduelle après retrait de la charge. La charge d’essai **F(N)** est choisie dans une gamme normalisée adaptée au diamètre de l’indenteur et au matériau testé.

$$HBW = \frac{0.102 * 2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Pour éviter la déformation de la bille et la détérioration de la bille, l’usage de l’essai Brinell est limité aux matériaux tels que HBS <350 ou HBW <650.

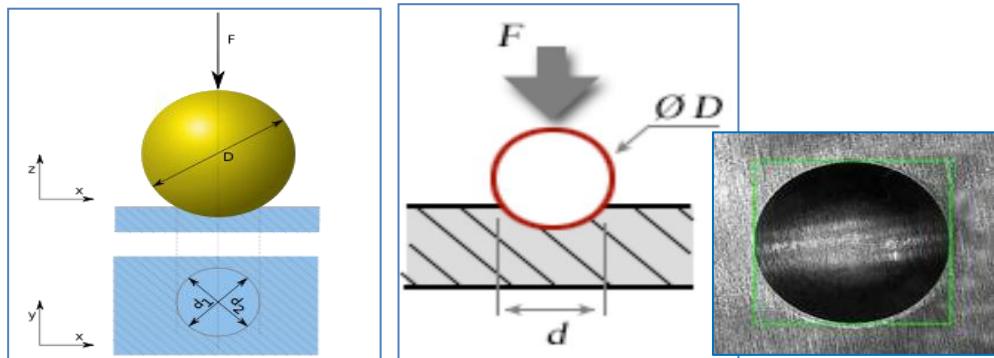


Fig.1.12. Principe de l’essai Brinell et empreinte typique de l’essai

**3.3.2. Essai Vickers**

Le pénétrateur est une pyramide en diamant, à base carrée et d’un angle au sommet entre faces opposées égales à 136°. L’empreinte est une pyramide en creux de diagonales du carré de base. Les mesures s’effectuent à l’aide d’un appareil optique approprié ou à afficheur directe dans les nouvelles générations des bancs d’essais.

$$HV = 0.102 * \frac{2F \cdot \sin(136^\circ/2)}{d^2} = 0.189 \cdot \frac{F}{d^2}$$

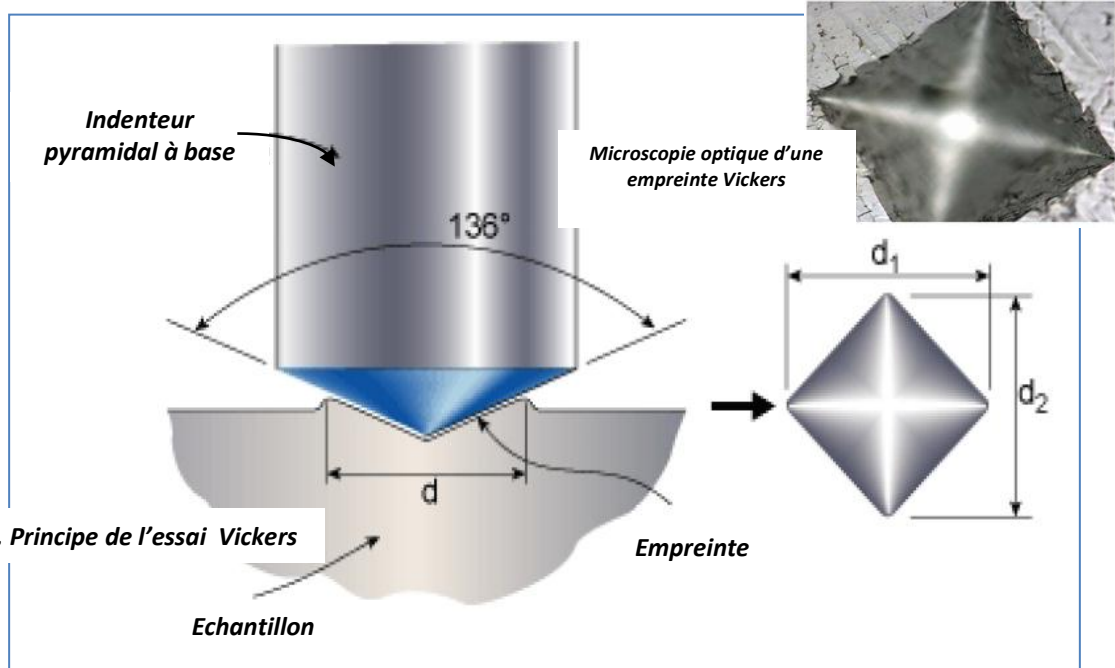


Fig. 1.13. Principe de l’essai Vickers

### 3.3.3. Essai Rockwell

**Principe de l'essai :** le pénétrateur est soit une bielle en acier trempé, soit un cône en diamant, et la charge d'essai peut prendre plusieurs valeurs. La dureté définie à partir de la différence de profondeur de pénétration après application de la charge. Le pénétrateur est appliqué sur la surface de la pièce avec une précharge  $F_0$ . Il descend alors à un niveau qui sert d'origine aux mesures de profondeur ultérieures

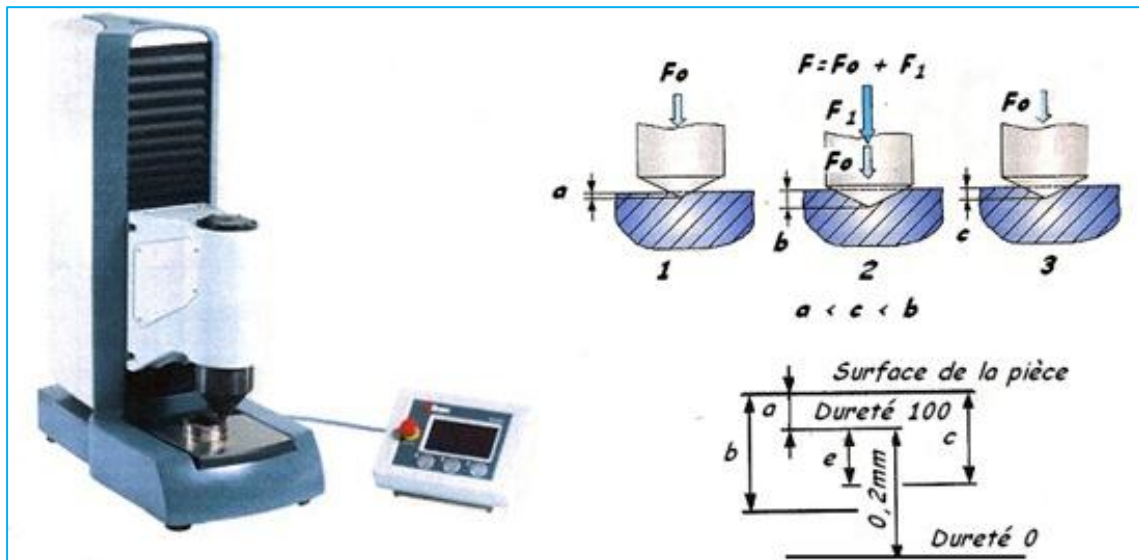


Fig1.14. Schéma de principe d'un essai de dureté Rockwell : Cas d'un Rockwell C

- Une surcharge  $F_1$  est appliquée, pour atteindre la valeur de la charge totale  $F$
- La surcharge est retirée, entraînant une remontée du pénétrateur (retour élastique)
- On mesure alors à l'aide d'un comparateur l'accroissement  $h$  de la profondeur de pénétration, entre le début et la fin de l'essai sous précharge  $F_0$ .

La dureté Rockwell, noter HRC dans la figure 1.14, est un nombre sans dimension compris entre 0 et 100 (ou 130), défini comme le complément de  $h$  à une profondeur de référence de 0.2mm (respectivement 0.26mm) partagée en cent (respectivement 130) graduation identiques.

### 3.3.4. Microdureté et nanodureté

*Du point de vue scientifique, on peut séparer les essais de dureté précédemment décrits des essais de microdureté par le fait que les premiers intéressent un nombre quelquefois très important de grains de métal, alors que les seconds sont destinés en principe à définir les propriétés à l'intérieur des grains soit de la matrice, soit de ses divers constituants. Alors que les essais de dureté procurent une valeur moyenne des propriétés d'une zone de métal assez importante, les essais de microdureté permettent de déterminer des caractéristiques locales.*

#### a. Microdureté Vickers.

*Par Analogie à un essai Vickers, l'échelle microscopique de l'essai s'effectue sous une charge de quelques grammes à quelques centaines de grammes. L'appareil utilisé comporte*

une colonne de microscope optique en réflexion, qui permet de viser la zone souhaitée sur un échantillon poli. Le pénétrateur Vickers est ensuite placé dans l'axe optique pour effectuer l'essai, puis le microscope permet de mesurer les diagonales de l'empreinte : de quelques  $\mu\text{m}$  à quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ . On peut ainsi mesurer par exemple la dureté des différentes phases d'un matériau ou le profil de dureté obtenu sur une surface traitée ou usinée.

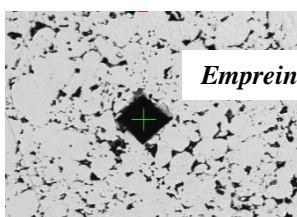
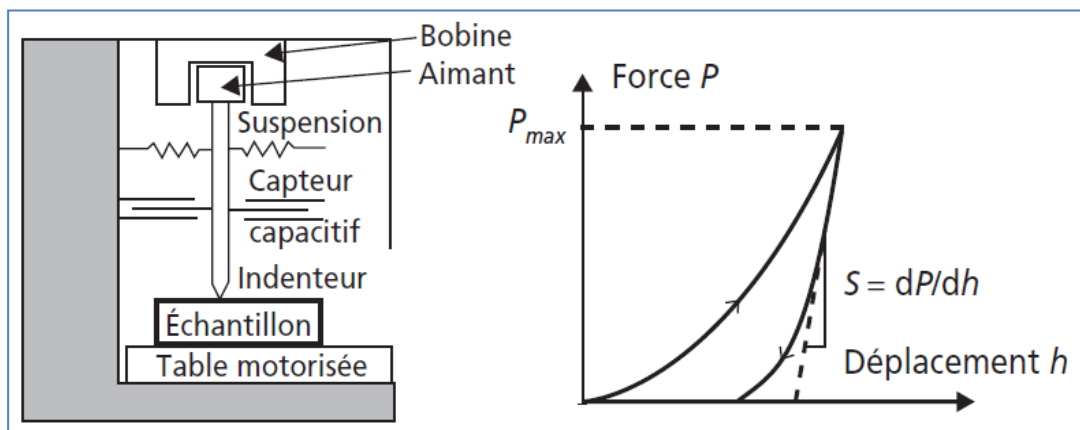
### b. Dureté Knoop

De mêmes principes d'utilisation et d'exécution que l'essai précédent, l'essai Knoop s'effectue avec un diamant pyramidal à base losange effilé qui permet des empreintes résiduelles de longueur  $l$  (mm) plus lisibles et plus rapprochées. La dureté Knoop (HK) est donnée par le rapport de la charge d'essai  $F$  (N) sur la surface de l'empreinte, exprimé sans dimension :

$$HK = 1,448 F/l^2$$

### 3.3.5. Nanoindentation.

L'utilisation de couches de revêtement de plus en plus minces (PVD par exemple) nécessite, pour l'étude de leurs propriétés mécaniques, le développement d'essais de dureté à une échelle de nm. Ce type d'essais est nommé essai de nanoindentation, où la profondeur de l'empreinte peut se limiter à quelques dizaines de nanomètres. Le pénétrateur utilisé est généralement de type Berkovich, diamant pyramidal à base triangulaire. La dureté  $H$  est mesurée par le rapport à la charge maximale appliquée  $P_{max}$ . La mesure en mode continu de l'aire  $A$  de contact pénétrateur-échantillon permettra également de mesurer la dureté et le module de rigidité de la surface indentée. L'instrumentation asservie permet de traçage de la courbe  $P=P(h)$  (fig. 6.17). La pente  $dP/dh$  du retour élastique de l'indenteur est proportionnelle au module de Young du matériau testé, qui peut être calculé moyennant un étalonnage de rigidité de l'appareil.



Empreinte de

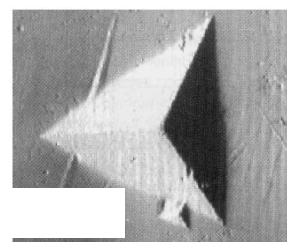


Figure 1.15. Schéma de principe d'un nano-indenteur et d'une courbe de nanoindentation.



Dureté sous charge réduite et microdureté Vickers			
Dureté sous charge réduite		Microdureté	
Désignation	Charge (N)	Désignation	Charge (N)
HV <sub>0,2</sub>	1,961	HV <sub>0,01</sub>	0,09807
HV <sub>0,3</sub>	2,942	HV <sub>0,015</sub>	0,1471
HV <sub>0,5</sub>	4,903	HV <sub>0,02</sub>	0,1961
HV <sub>1</sub>	9,807	HV <sub>0,025</sub>	0,2452
HV <sub>2</sub>	19,61	HV <sub>0,05</sub>	0,4903
HV <sub>3</sub>	29,42	HV <sub>0,1</sub>	0,9807

Fig.1.16. Dispositif de microdureté Vickers et correspondance en charge des différentes échelles de l'essai

### 3.3.6. Correspondance entre échelles de dureté

La dureté est une caractéristique complexe, qui dépend à la fois de la limite d'élasticité et du comportement plastique du matériau testé. Les techniques pour la mesurer reposent sur des bases tribologiques très différentes. Il ne peut donc exister que des correspondances empiriques entre les différentes échelles. La figure ci-dessous en est un exemple. On y trouve également une autre correspondance très approximative :  $HV = 0.3Rm$  [MPa].

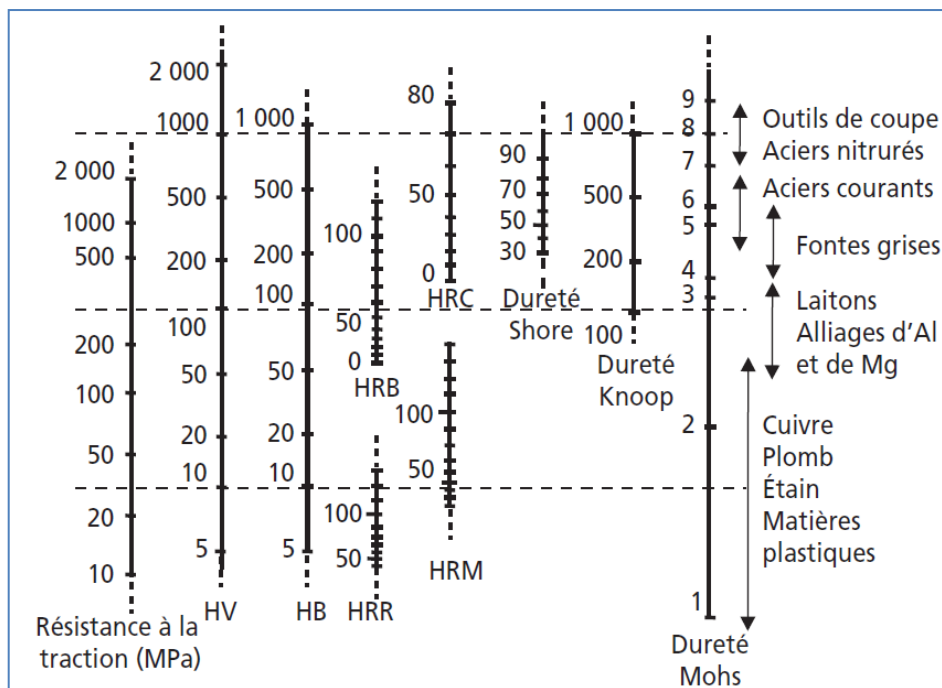


Fig. 1.17. Correspondances entre les échelles de dureté

## 4. Essai de résilience

### 4.1. Objectif et principe de l'essai

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite d'élasticité dans des conditions particulières qui rendent le matériau fragile. Les facteurs fragilisant sont :

- Le triaxialité des contraintes ;
- L'abaissement de la température ;
- L'augmentation de la vitesse de déformation.

Le principe de l'essai consiste à rompre par choc du mouton pendule une éprouvette entaillée reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie absorbée caractérisant la résistance aux chocs du matériau métallique essayé. La résistance aux chocs, donc l'énergie nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette, exprimée en joule par centimètre carré.

$$\text{Résilience} = \frac{\text{Energie absorbée par la rupture (J)}}{\text{Section au droit de l'entaille (Cm}^2\text{)}}$$

### 4.2. Eprouvette

On utilise les éprouvettes dont les dimensions sont normalisées (figure 6.a et 6.b) et dont la façon de prélèvement est définie dans la norme du produit appropriée. En ce qui concerne la forme d'entaille, les deux types des éprouvettes peuvent être utilisées : soit avec l'entaille en U, soit avec l'entaille en V à 45°

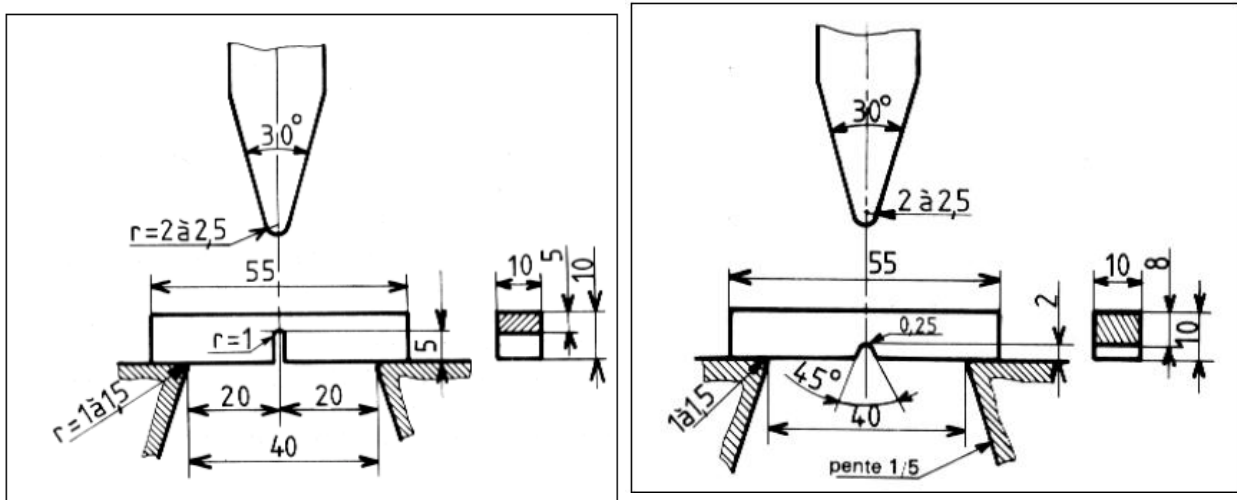


Fig.1.18. Éprouvette Charpy normalisée (A gauche : entaille en V ; A droite : en U)

D'ailleurs, la norme prescrit leur usinage minimisant toutes les altérations concernant la structure métallique provenant, par exemple, de l'effet d'écaillage ou d'échauffement. Cependant, l'usinage ne concerne pas les éprouvettes étant préparées comme les pièces de fonderie dans une précision exigée et ainsi peuvent-elles être brutes. Les caractéristiques dimensionnelles des éprouvettes sont les suivantes : longueur, hauteur, largeur, hauteur restant au fond de l'entaille, rayon d'entaille et, au cas de l'entaille en V, angle d'entaille.

**4.3. Principe de l'essai**

Un marteau de masse  $m$  est fixé à l'extrémité d'un pendule (fig. 2 et 3). Ce pendule peut tourner dans le plan vertical autour d'un axe horizontal. L'éprouvette repose sur un support et se trouve au point le plus bas sur la trajectoire du marteau. Pour effectuer un essai, on écarte le bras jusqu'à ce que le marteau atteigne sa position initiale  $P$  et on le lâche. Quand le pendule vient frapper l'éprouvette, il a une énergie cinétique qui est égale à l'énergie potentielle qu'il avait à sa position de départ  $mgh_0$ ,  $h$  étant la hauteur du marteau par rapport à sa position d'équilibre. Après la rupture, le marteau remonte. Dans son point culminant (hauteur  $h_1$ ), l'énergie cinétique résiduelle s'est de nouveau transformée en énergie potentielle  $mgh_1$ . L'énergie  $K$  dépensée pour rompre l'éprouvette vaut alors :

$$KV = mg(h_0 - h_1) \quad (m.g : \text{le poids du pendule})$$

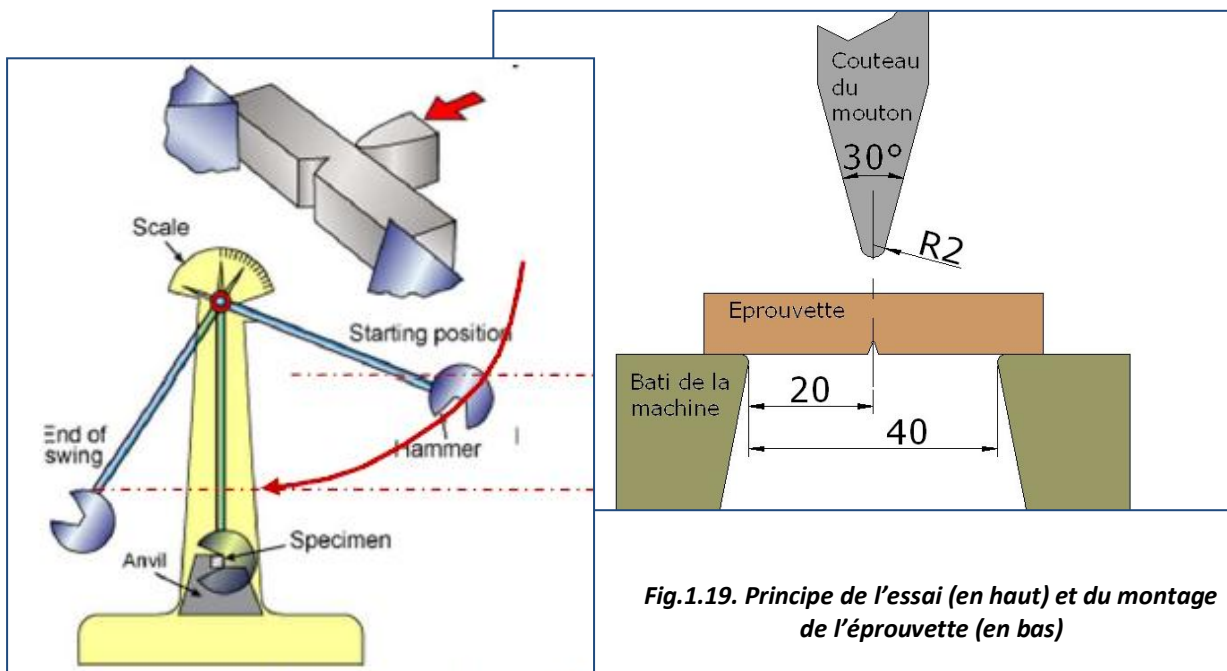
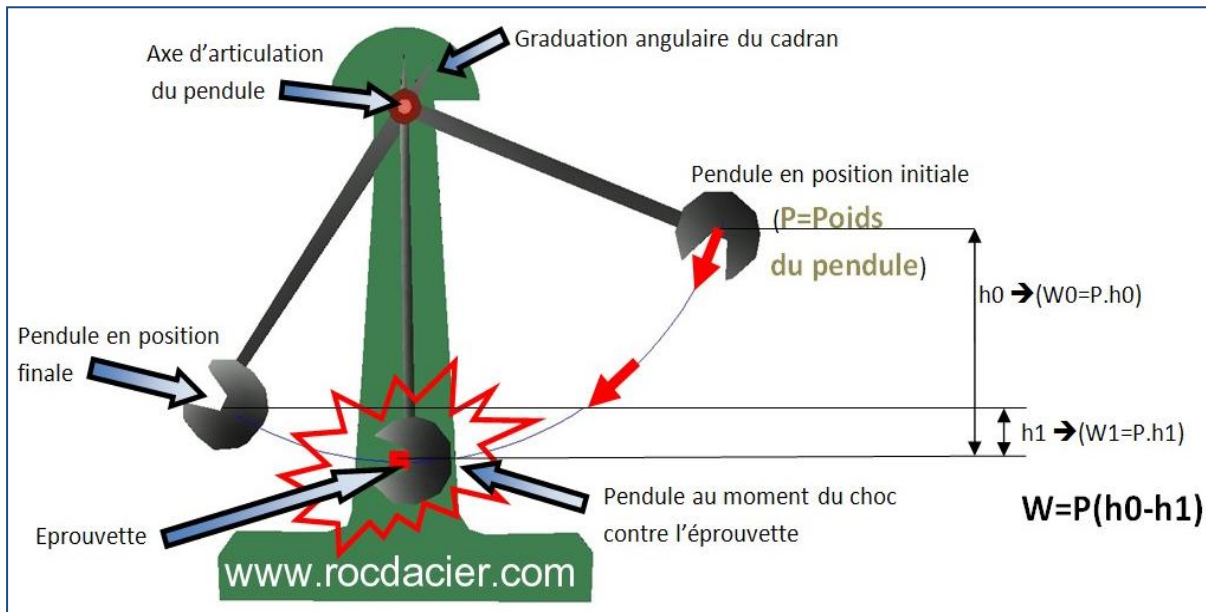


Fig.1.19. Principe de l'essai (en haut) et du montage de l'éprouvette (en bas)

#### 4.4. Machine de l'essai

Le mouton Pendule Charpy permettant de réaliser des essais de résilience avec une capacité disponible qui peut atteindre **750 J** selon les versions. L'essai permet de déterminer l'énergie absorbée lors de la rupture d'une éprouvette entaillée. Le pendule est constitué d'une base en fonte et de deux colonnes d'appui pour le support des éprouvettes **CHARPY**, un mouton-pendule avec son bras, un système de levage du mouton motorisé et un mécanisme de déclenchement.

Un afficheur numérique permet la lecture de l'énergie absorbée par l'éprouvette testée et un frein motorisé assure la réaction sur le mouton en ralentissement rapide des oscillations. L'équipement est disponible en différentes versions; 150, 300, 450 et 750 Joules et avec différents couteaux d'impact pour répondre aux normes en rigueurs. La sécurité est assurée par un carter de protection transparent avec micro contacteur de sécurité conforme aux normes CE.

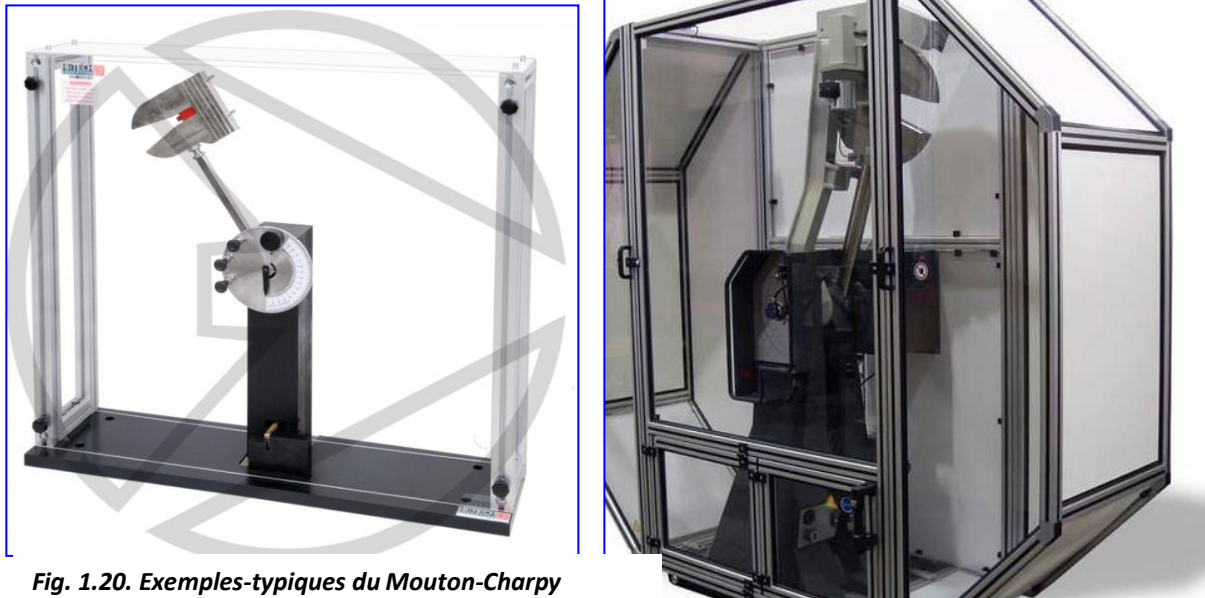


Fig. 1.20. Exemples-typiques du Mouton-Charpy

#### 4.5. Mode opératoire et consignes de sécurité

- Ne jamais essayer d'arrêter le pendule manuellement ; Utiliser le frein avec le pied, le faire doucement et de façon progressive
- Régler le zéro,
- Faire osciller le pendule à vide, et relever la valeur de l'angle de remontée à vide.
- Mesurer les dimensions de l'éprouvette, la peser.
- Centrer l'éprouvette entre les deux supports. Pendant cette opération, veillez à ce que le pendule ne soit pas en position haute.
- Monter le pendule, le verrouiller.
- Lâcher le pendule, le freiner puis lire l'angle de remontée.
- Examiner le grain de la pièce cassée, relever l'angle de rupture en rapprochant les deux fragments de l'éprouvette de façon à les faire coïncider.



#### 4.6. Conduite de l'essai et exploitation des résultats

Le plan d'oscillation du mouton doit passer sensiblement par le centre de gravité de la cabote. Le point d'impact coïncide avec le centre de percussion du mouton. Pour l'essai normal, l'énergie disponible du mouton doit être égale **294 Nm**. La résilience obtenue avec un tel mouton est désignée par le symbole **K**

L'éprouvette est placée sur le porte-éprouvette de telle sorte que l'arête du couteau vienne la frapper dans le plan de symétrie de l'entaille et sur la face opposée à celle-ci. La valeur qu'en donne la quantité **K** est alors généralement approchée par excès en raison du frottement des extrémités de l'éprouvette sur les portes-éprouvettes ; mention de cette particularité doit donc, le cas échéant, accompagner les résultats d'essai.

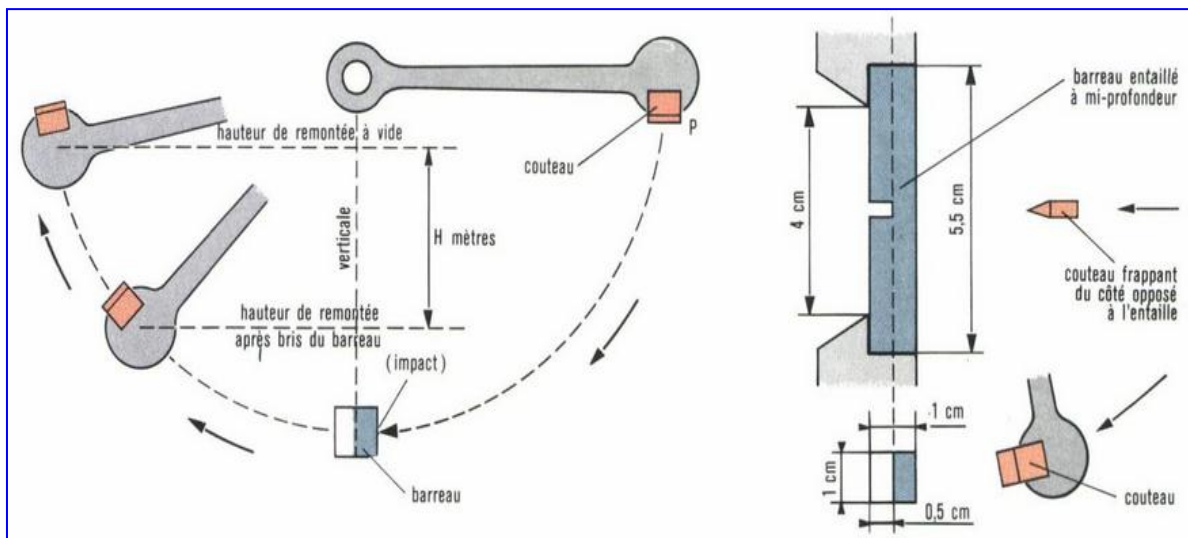


Fig.1.21. Disposition avant et après l'essai Charpy

En principe, il serait bien utile de connaître les contraintes critiques qui provoquent la rupture sous l'effet d'un choc. Néanmoins dans la pratique et dans la théorie, le phénomène de la rupture dynamique est très complexe. Même au niveau expérimental, la détermination d'une contrainte critique s'avère déjà extrêmement difficile. Comme la fissuration sous l'effet du choc avance à très grande vitesse et que de ce fait les contraintes montent et descendent presque instantanément, leur mesure exacte n'est pratiquement pas possible. On doit reconnaître que les contraintes du choc se transmettent par une onde acoustique.

L'essai s'effectue à la machine d'essai (figure 1.18) dont la construction et l'installation doivent être rigides et convenir à la norme en vigueur. La machine est équipée par l'échelle prévue pour le mesurage de l'énergie de choc. Dans les conditions standard l'essai s'exécute à une température de  $23 \pm 5$  °C, et avec une énergie initiale nominale de la machine :  $W_0 = 300 \pm 5$  **Joules**. Tout d'abord, le Mouton pendule est mis en position initiale à une hauteur  $h_0$  qui correspond ainsi à une énergie de départ  $W_0$ .

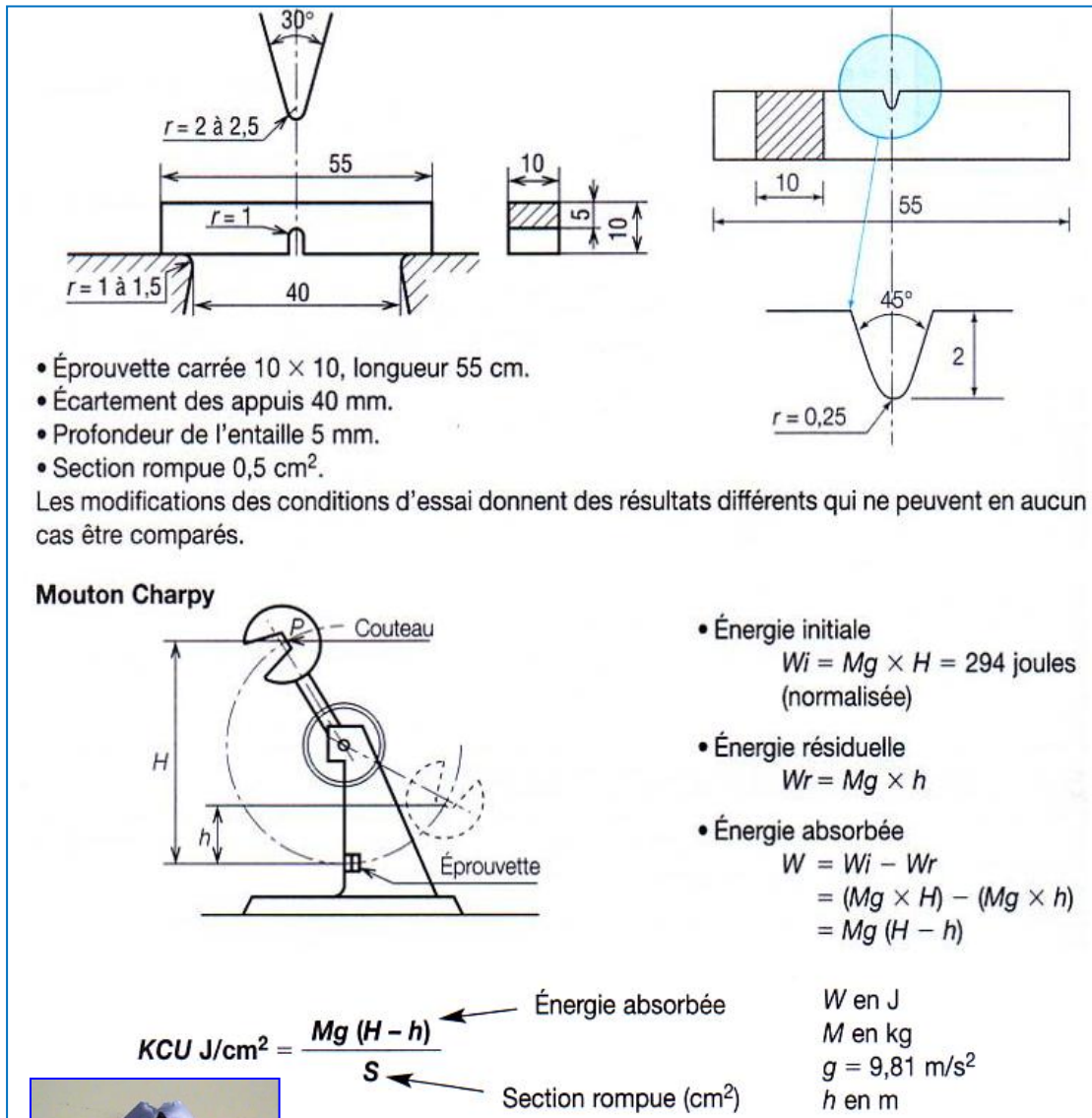


Fig.1.22. Exemple de la démarche de mesure de la résilience des éprouvettes testées

**Application**

Soit un mouton de Charpy dont le pendule mesure  $OG = 0,7 \text{ m}$  et une masse en extrémité de  $22,5 \text{ k}$ . Sachant que le pendule est lâché d'une hauteur  $h_0 = 1,34 \text{ m}$  et que l'angle de remontée mesuré est  $\theta_1 = 74^\circ$ , en déduire la valeur du KCU.

**Solution**

$P = M.g = 22,5 \times 9,81 = 219,74 \text{ N}$

$W_0 = Mg.h_0 = 219,74 \times 1,34 = 294,45 \text{ J}$

Hauteur de remontée  $h_1 = OG - OG.\cos \theta_1 = 0,7 (1 - \cos 74^\circ) = 0,507 \text{ m}$

Energie de rupture (absorbée) :  $W = P (h_0 - h_1) = 219,74 (1,34 - 0,507) = 149,11 \text{ J}$

Section nette de l'éprouvette en U :  $S_0 = 1 \text{ cm} \times 0,5 = 0,5 \text{ cm}^2$

$KCU = 149,11/0.5 = 298,22 \text{ J/cm}^2$  (acier extra-doux).