

Introduction

Les essais mécaniques ont pour but de fournir les données nécessaires pour appréhender le comportement mécanique des matériaux, notamment dans le cas des procédés de mise en forme, mais aussi de formage et d'assemblage. La connaissance des propriétés mécaniques conduit également au bon dimensionnement des structures, à la détermination des limites de rupture. Le calcul numérique est devenu d'un apport considérable dans l'interprétation et la compréhension des résultats des essais mécaniques.

II.1. Essai de traction**II.1.1. 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. [18]

II.1.2. 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.

II.1.3. Epreuve

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.

Dans l'essai de traction on utilise le plus souvent, des éprouvettes cylindriques, de section circulaire.

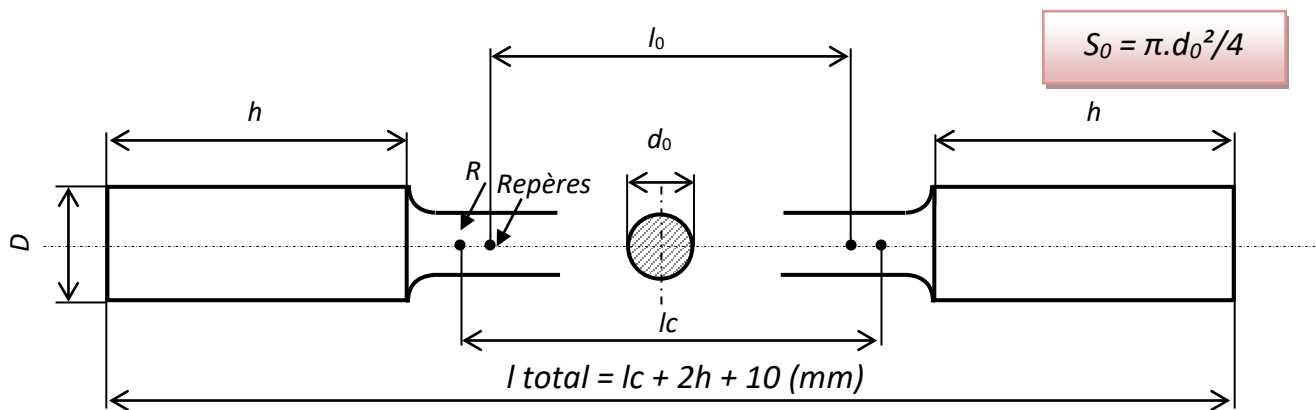


Fig II. 1. Forme de l'échantillon pour l'essai de traction

II.1.4. 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. [18]

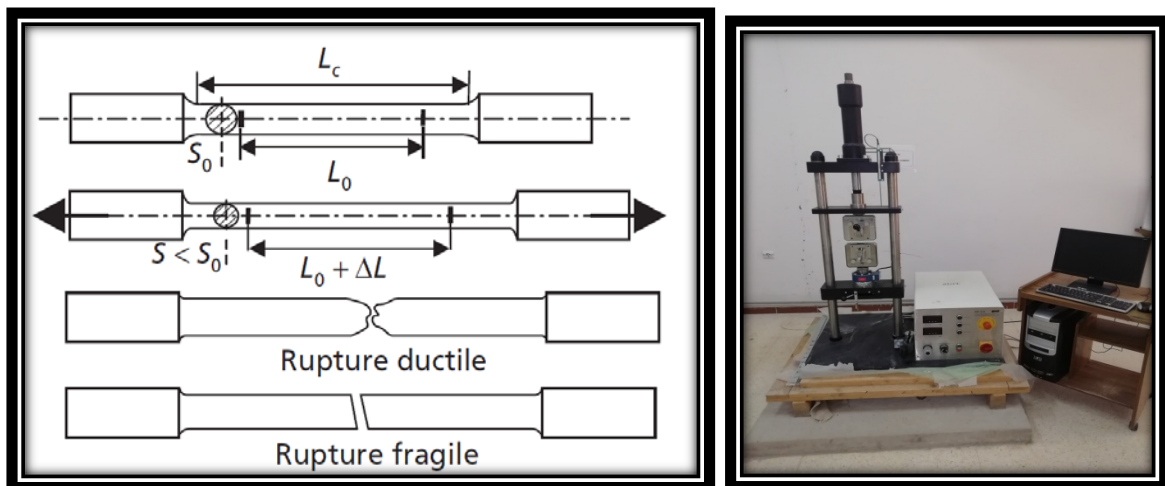


Fig. II.2. Schéma d'une éprouvette de traction cylindrique et de son évolution en cours d'essai et machine de traction.

II.1.5. Exploitation des résultats de l'essai

II.1.5.1. 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 $S_0 (mm^2)$ de l'éprouvette en vue d'obtenir la contrainte conventionnelle $\sigma_c (MPa)$. Et on rapporte l'allongement $\Delta l (mm)$ à la longueur initiale, l_0 , pour obtenir la déformation conventionnelle (ϵ_c), soient : [18]

$$\sigma_c = F/S_0 \text{ [MPa]}$$

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

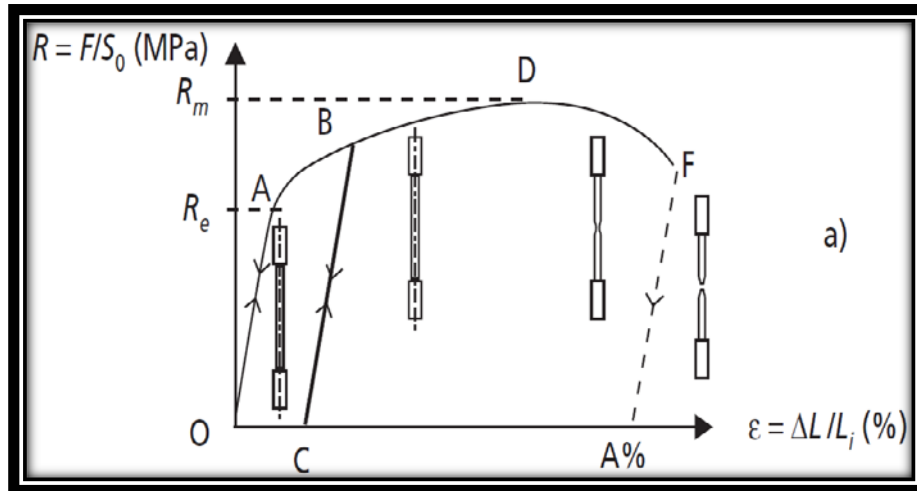


Fig.II.3. Courbes conventionnelles typiques de traction

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/ S0 : limite apparente d'élasticité (MPa) :

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

Rp0,2 : 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.

Rm = Fm/S0 : 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 **Su** : la section à la rupture :

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

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

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

$E = R_e/\epsilon_e$: module de Young. En pratique, seule l'utilisation d'un dispositif extenso métrique 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 R_m . [18]

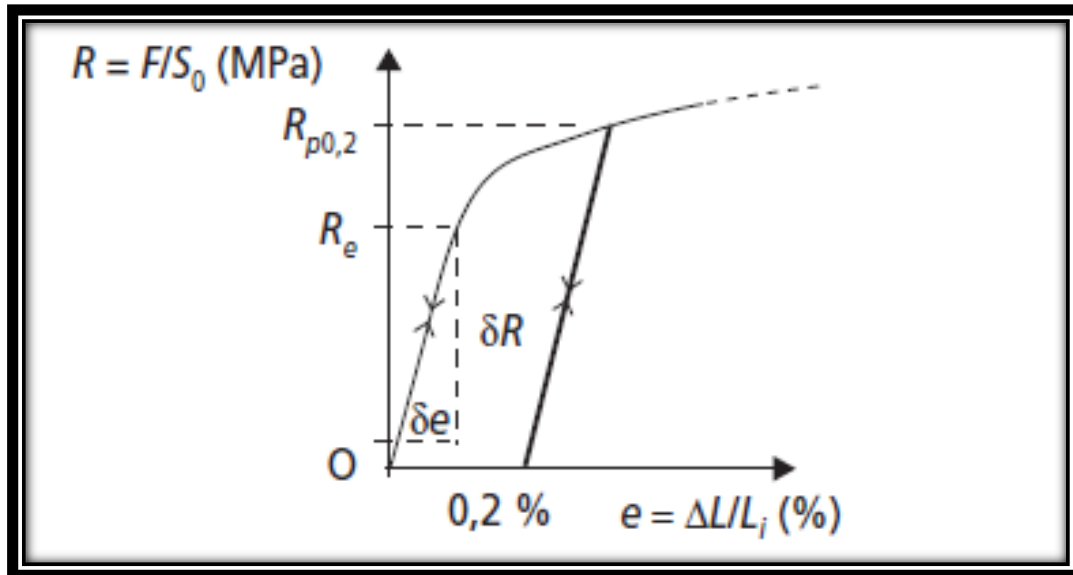


Fig.II.4. Détail pour le calcul de E (pente de la partie élastique) et $R_{p0,2}$

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 termes 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.

II.1.5.2. 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 $\epsilon = \delta l/l$. 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 σ_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 :

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

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 :

$$s_0 \cdot l_0 = s \cdot l = s(l_0 + \Delta l) \text{ Ce qui permet d'écrire : } s = s_0 / (1 + \Delta l / l_0) = s_0 / (1 + e)$$

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

$$\sigma_v = \frac{F}{S_0} (1 + e) = \sigma_e (1 + \varepsilon_e)$$

Déformation rationnelle ε_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 ε_c et ε_r devient important au-delà de 20% de déformation. Elle peut-être comme le travail nécessaire par unité de volume pour provoquer la rupture.

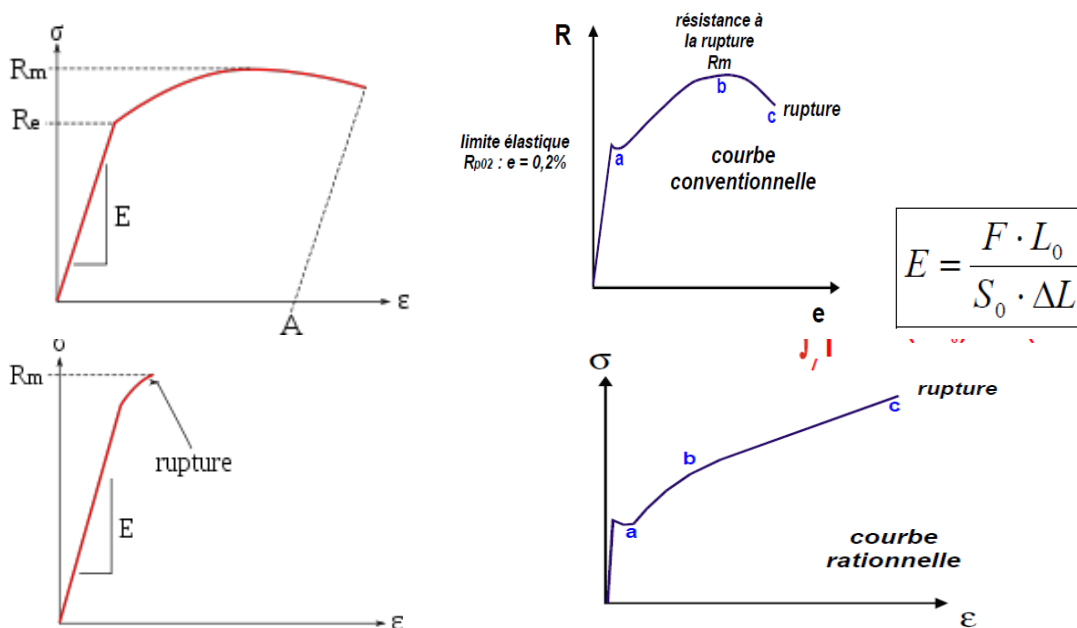


Fig.II. 5. Exploitation des résultats de traction

II.1.6. 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 ε du solide (sans dimension), sont alors proportionnels à la densité surfacique de force, ou contrainte σ , 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/mm²) 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 σ_x appliquée dans la direction x .

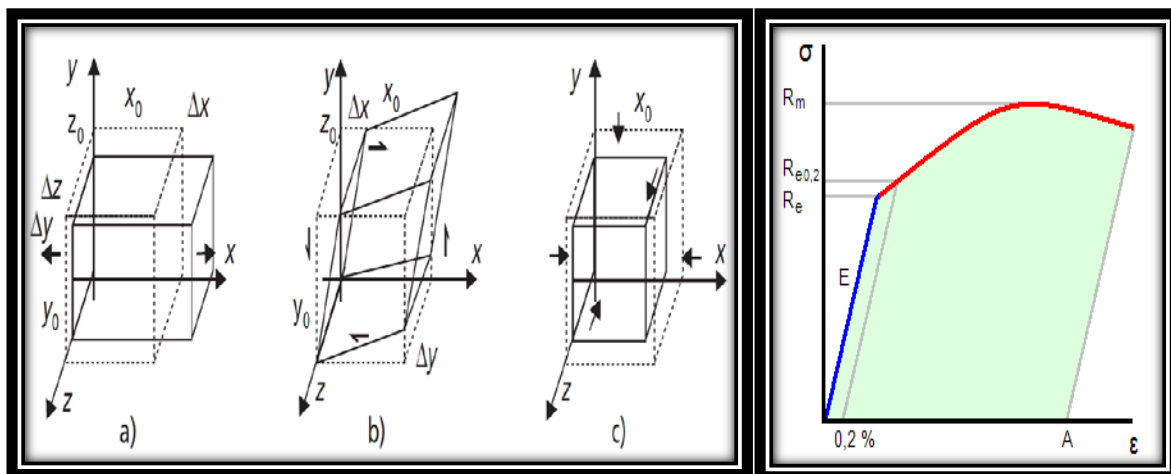


Fig.II.6. Schéma des déformations élastiques provoquées par différentes sollicitations. a) Contrainte de traction uni-axiale σ_x . b) Contrainte de cession τ_{xy} dans le plan xy . c) Pression hydrostatique p .

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

« ν », 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 « τ », une déformation par distorsion « γ » 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 μ) 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 χ) 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 ν par exemple) suffisent à caractériser son comportement élastique. Les constantes E , ν , G et K ne sont donc pas indépendantes, mais peuvent toutes s'exprimer en fonction de deux d'entre elles grâce aux relations :

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

II.1.7. 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 $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ reliant la contrainte équivalente et la déformation plastique équivalente. Les lois empiriques usuelles sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

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

Tableau II.1. Lois d'écrouissage usuelles

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.

II.2. Essai de dureté

II.2.1. 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. Les caractéristiques des principales méthodes de mesure de la dureté utilisées :

- La dureté Brinell(HB)
- La dureté Vickers (HV)
- La dureté 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. [20]

II.2.2. 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.

- Les éprouvettes utilisées et désigné sur les figures suivantes (**Fig II.a**) et(**FigII.b**):



Fig II.a



Fig II.b

Fig.II.7.les éprouvette utilisée

II.2.3. 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.

II.2.3.1. 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’indenter et au matériau testé. [20]

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

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

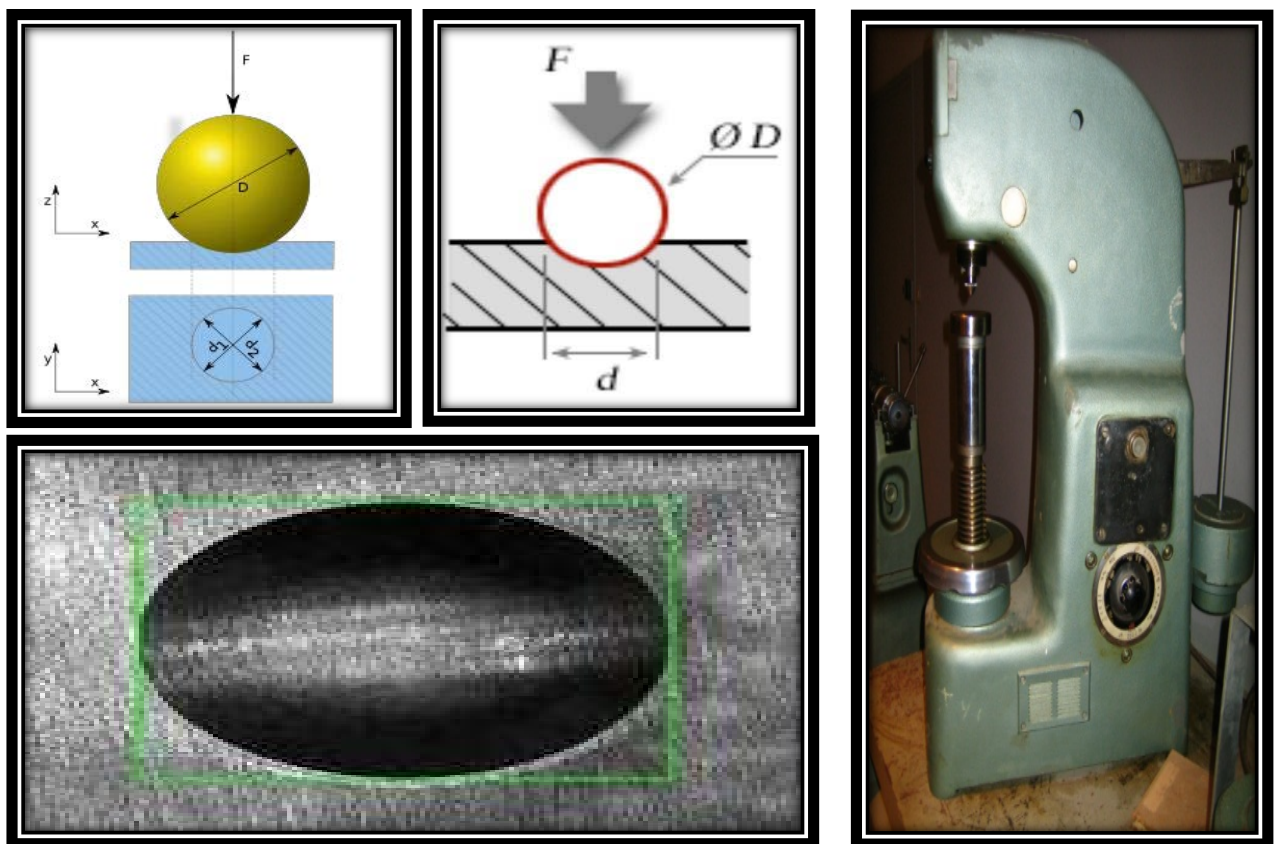


Fig.II.8. Principe de l’essai Brinell et empreinte typique de l’essai

II.2.3.2. 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 direct dans les nouvelles générations des bancs d’essais. [20]

$$HV = \frac{1,8454P}{d^2}$$

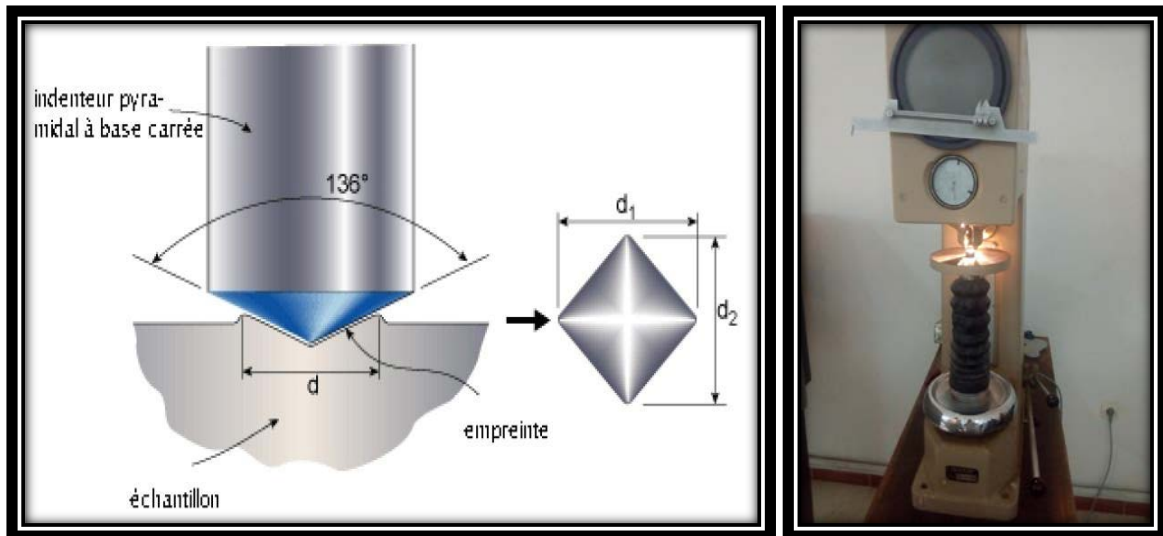


Fig.II.9. Principe de l'essai Vickers

II.2.3.3. 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 un pré chargé F_0 . Il descend alors à un niveau qui sert d'origine aux mesures de profondeur ultérieures. [20]

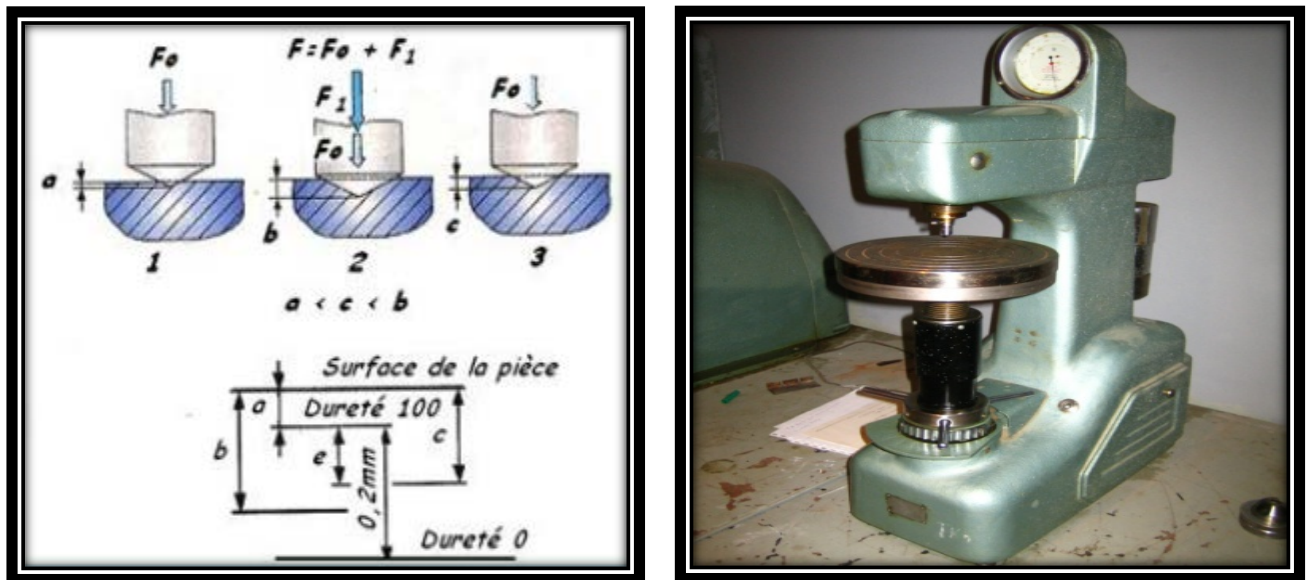


Fig.II.10. Schéma de principe d'un essai de dureté Rockwell

II.2.3.4. Micro dureté et nano dureté

Du point de vue scientifique, on peut séparer les essais de dureté précédemment décrits des essais de micro dureté par le fait que les premiers intéressent un nombre quelque fois 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 micro dureté permettent de déterminer des caractéristiques locales. [20]

a. Micro dureté 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 μm à quelques dizaines de μm . 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. [20]

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 :

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



Fig.II.11. la micro dureté Vickers



Fig.II.12. la micro dureté Knoop

II.3. Essai de résilience

II.3.1. 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 tri axialité 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. [19, 20]

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

II.3.2. Epreuve

On utilise les éprouvettes dont les dimensions sont normalisées 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°.

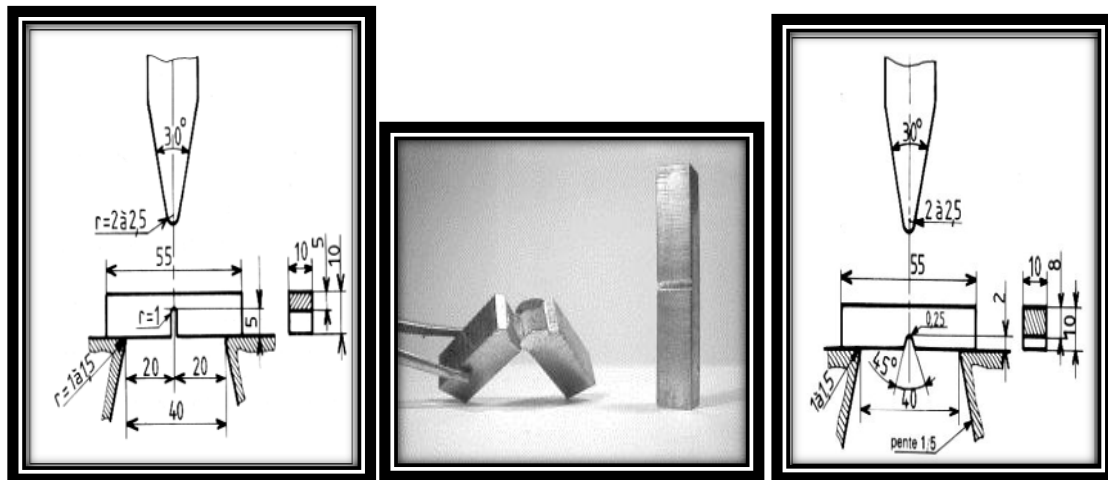


Fig.II.13. Éprouvette Charpy normalisée (A gauche : entaille en V ; A droite : en U)

D'ailleurs, la norme prescrit leur usinage minimisant toutes les altérations concernant la structure métallique provenant, par exemple, de l'effet d'écrouissage 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.

II.3.3. Principe de l'essai

Un marteau de masse m est fixé à l'extrémité d'un pendule. 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 :

$$W = mg(h_0 - h_1)$$

($m.g$: le poids du pendule)

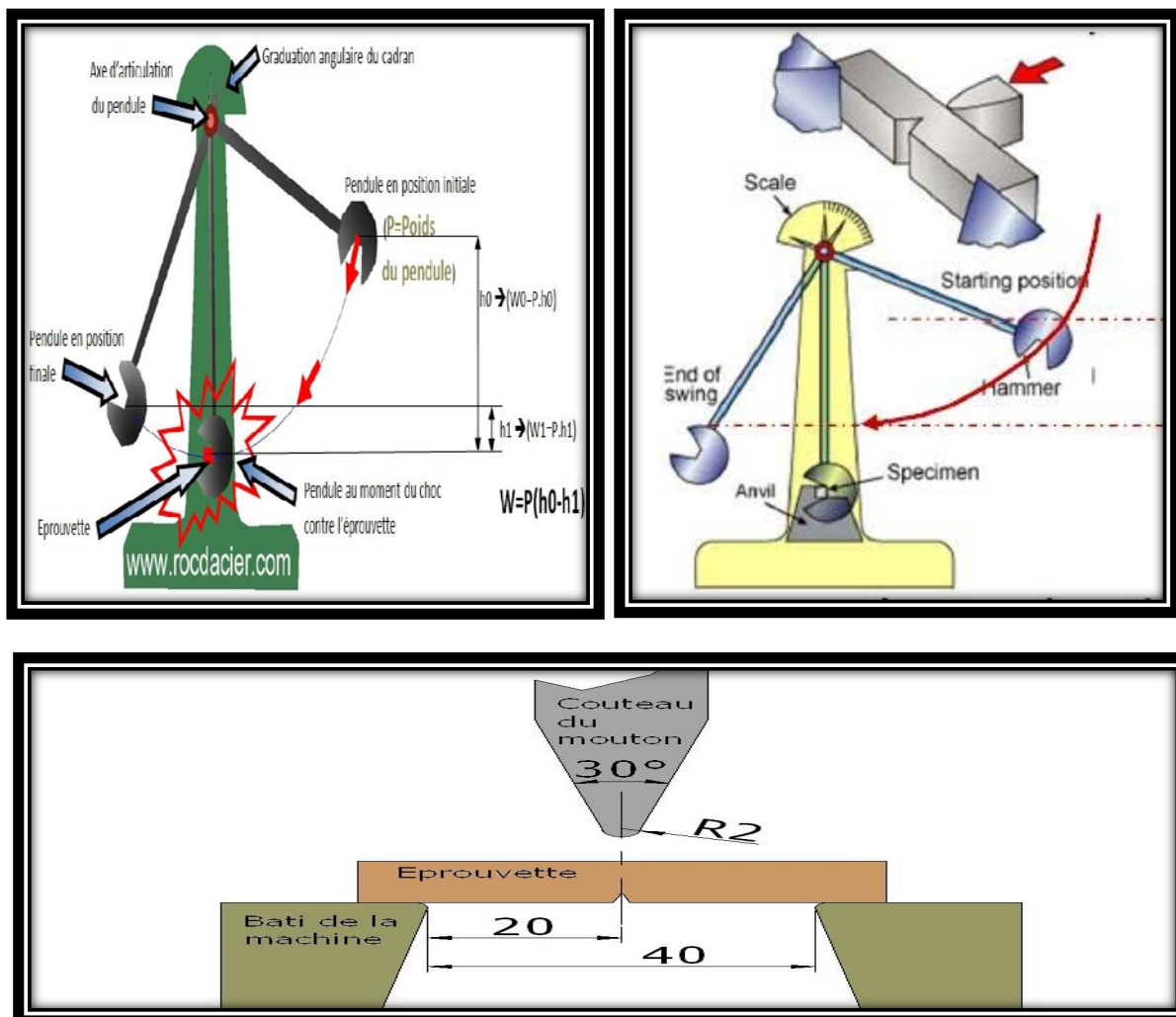


Fig.II.14. Principe de l'essai (en haut) et du montage de l'éprouvette (en bas)

II.3.4. Machine de l'essai

La machine d'essai utilisée de capacité 300J est celle de l'Unité Grue(UG). L'énergie de rupture en joule, de l'éprouvette testée est lue directement sur le cadran de la machine. C'est un mouton pendule équipé d'un marteau oscillant dans un plan vertical autour d'un axe O. La masse comporte un couteau destiné à rompre l'éprouvette. L'appareil est équipé d'un système qui permet de mesurer l'énergie absorbée par la rupture de l'éprouvette. Dans ce système, la masse est abandonnée à elle-même à partir d'une hauteur déterminée par construction. L'éprouvette se trouve au point bas. La masse entraîne une aiguille qui se déplace devant un cercle gradué. La mesure de l'angle de remontée, avec et sans rupture de barreau, permet le calcul du travail absorbé par cette rupture. L'éprouvette est constituée d'un barreau de section 10 mm x 10 mm, de longueur 55 mm, entaillé en son milieu par une entaille en U. [19, 20]

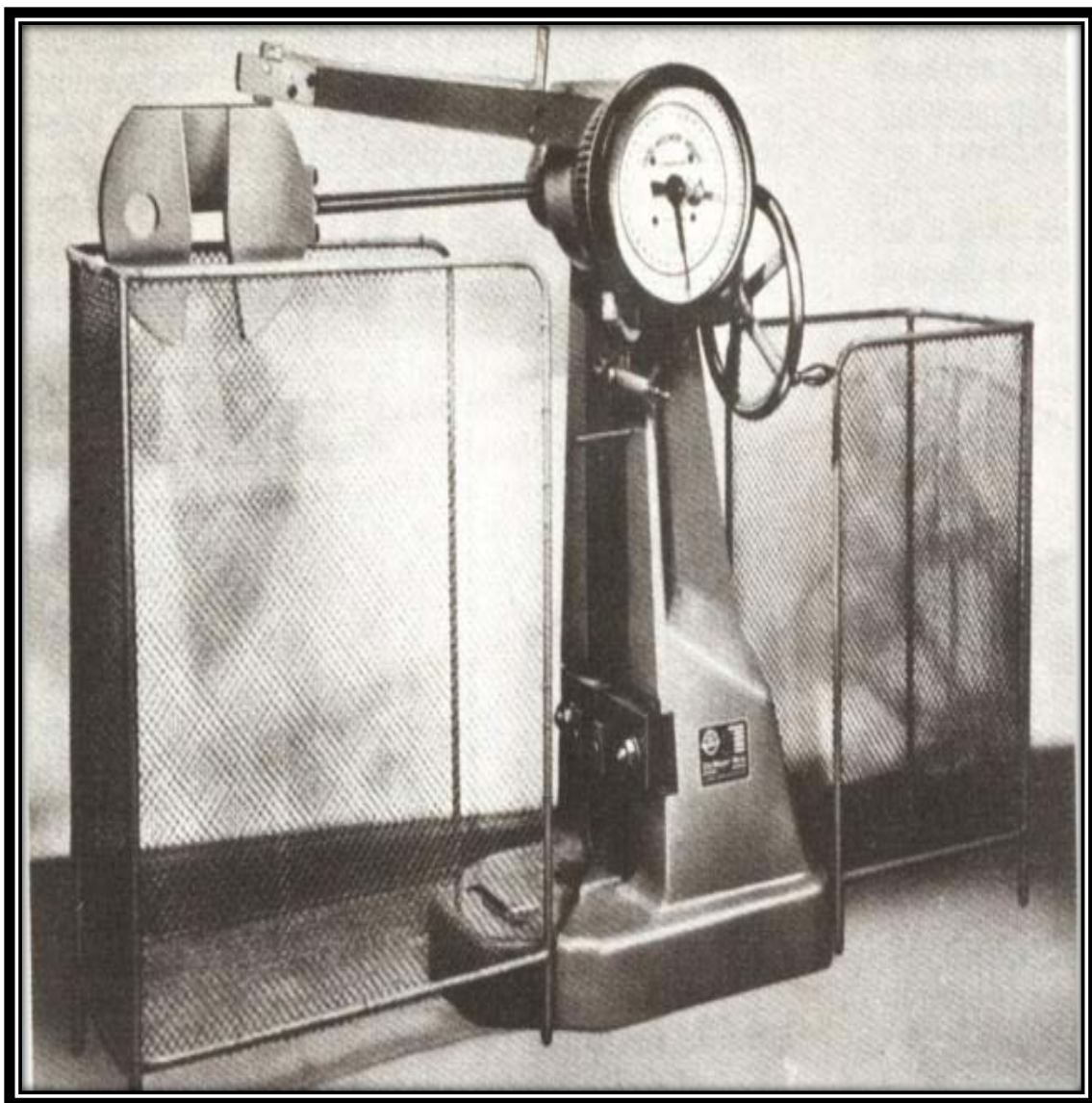


Fig.II.15. Mouton pendule Charpy de capacité 300J

II.4. La Rugosité (état de surface) :

La rugosité est une caractéristique de l'état de surface d'un matériau solide. C'est aussi un paramètre d'un écoulement se produisant sur ce matériau. C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique.

Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc.

Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.).

Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication. [14]

On la mesure avec un rugosimètre ou un profilomètre. La rugosité concerne les défauts micro géométriques de la surface. Ils sont évalués après filtrage de la surface réelle à l'aide d'un filtre passe-haut ne retenant que les longueurs d'onde latérales les plus courtes. Les paramètres de rugosité en profilométrie commencent par la lettre majuscule R suivie d'une ou plusieurs lettres déterminant le type de paramètre. Par exemple, le paramètre 'Ra' est la rugosité moyenne arithmétique du profil. 'Rz' est la rugosité maximale du profil.

La rugosité d'une pièce usinée est une signature du type d'usinage (tournage, polissage, pierrage, etc.) La cotation des états de surface en mécanique fait essentiellement référence à l'usinage par enlèvement de matière. Les défauts sont des stries et des sillons creusés par les arêtes coupantes des outils (outils de tournage, fraises, meules, etc.). On distingue 2 niveaux de défauts d'état de surface :

- Niveau 1 : stries périodiques
- Niveau 2 : défauts aperiodiques : arrachement de matière

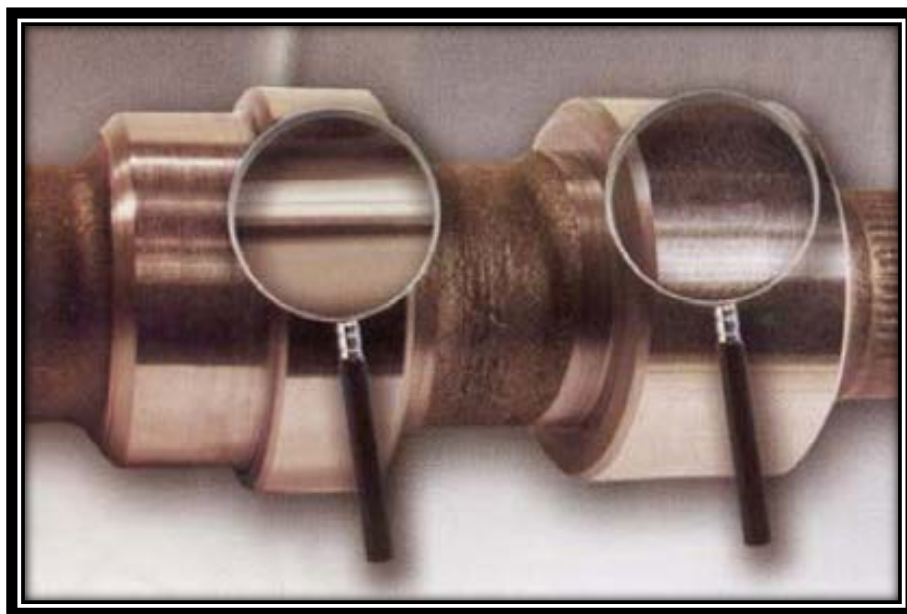


Fig. II.16. Mesure de la rugosité

II.4.1. Les défauts d'états de surface

L'aptitude d'une pièce à remplir une fonction donnée dépend de nombreux facteurs, notamment des caractéristiques de son état de surface. L'état de surface est caractérisé par la micro géométrie de la surface, qui joue un rôle important dans certaines fonctions telles que le frottement, le glissement, le roulement, l'étanchéité, parfois même l'aspect.

Pour que les pièces puissent être contrôlées, il faut chiffrer les caractéristiques d'une surface. La définition des caractéristiques d'une surface se fait sur un profil de cette surface.

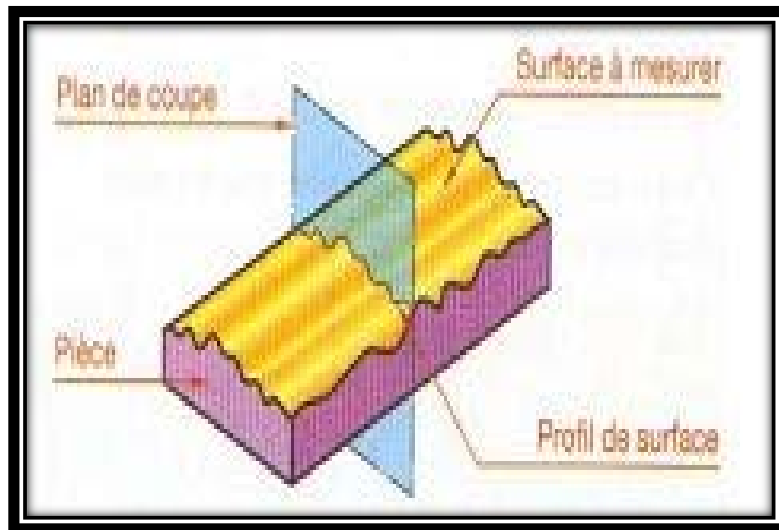


Fig. II.17. Profil de surface

La norme NF E 05-515 distingue six ordres de défauts de surface, du plus grand au plus petit :

1. Écart de forme (échelle macroscopique) : défaut de planéité, de rectitude, de circularité.
2. Ondulation (échelle macroscopique) : l'écart entre les crêtes est compris entre 0,5 et 2,5mm
3. Stries et sillons (défauts périodiques ou pseudopériodiques, échelle microscopique) l'écart entre les crêtes est inférieur ou égal à 0,5 mm
4. Défauts localisés (échelle microscopique) : marque d'outil, arrachement, fente, piquêr.
5. Structure cristalline (échelle méso-scopique).
6. Réseau cristallin (échelle nano-scopique). [15]. [16]

II.4.2. Les paramètres d'amplitude de rugosité

Il existe un grand nombre de paramètres pour la définition de la rugosité, certains sont pourtant beaucoup plus employés que d'autres:

- **Rugosité moyenne R_a**

Normes : ASME B46.1-1995, ASME B46.1-1985, ISO 4287-1997, ISO 4287/1-1997. Ecart moyen arithmétique. Il s'agit de l'écart moyen de tous les points du profil de rugosité par rapport à une ligne moyenne sur la longueur d'évaluation.

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |r_j|$$

Une manière plus ancienne de spécifier une plage de R_a . Il s'agit d'un symbole placé sur un dessin et spécifiant la valeur minimale et maximale de R_a [10]

- **Rugosité moyenne quadratique R_q**

Normes : ASME B46.1-1995, ISO 4287-1997, ISO 4287/1-1997.

Moyenne quadratique des écarts de hauteur sur la longueur d'évaluation et mesurés par rapport à la ligne moyenne. [15]

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r_j^2}$$

- **Hauteur maximale du profil R_t**

Normes : ASME B46.1-1995, ISO 4287-1997.

Hauteur crête-à-crête maximale. Il s'agit de la valeur absolue entre les hauteurs maximum et minimum. [15]

Représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil relevé sur toute la longueur de planage.

$$R_t = \left| \min_{1 \leq j \leq N} r_j \right| + \left| \max_{1 \leq j \leq N} r_j \right|$$

- **Profondeur minimale des vallées R_v , R_m**

Normes : ASME B46.1-1995, ASME B46.1-1985, ISO 4287-1997, ISO 4287/1-1997.
Vallée la plus profonde. Il s'agit de la profondeur de la vallée la plus profonde du profil de rugosité sur la longueur d'évaluation. [10]

$$R_v = \left| \min_{1 \leq j \leq N} r_j \right|$$

- **Hauteur maximale des pics R_p**

Normes : ASME B46.1-1995, ASME B46.1-1985, ISO 4287-1997, ISO 4287/1-1997.

Pic le plus élevé. Il s'agit de la hauteur du pic le plus élevé du profil de rugosité sur la longueur d'évaluation. [15]

$$R_p = \left| \max_{1 \leq j \leq N} r_j \right|$$

- **Hauteur maximale moyenne R_z**

Représente la rugosité totale moyenne

Normes : ISO 4287-1997.

Moyenne des valeurs absolues des cinq plus hauts pics et des cinq plus basses vallées sur la longueur d'évaluation. [15]

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Z_i$$

- **Rugosité max R_{\max}**

Elle représente la hauteur maximale des irrégularités du profil de rugosité. [15]

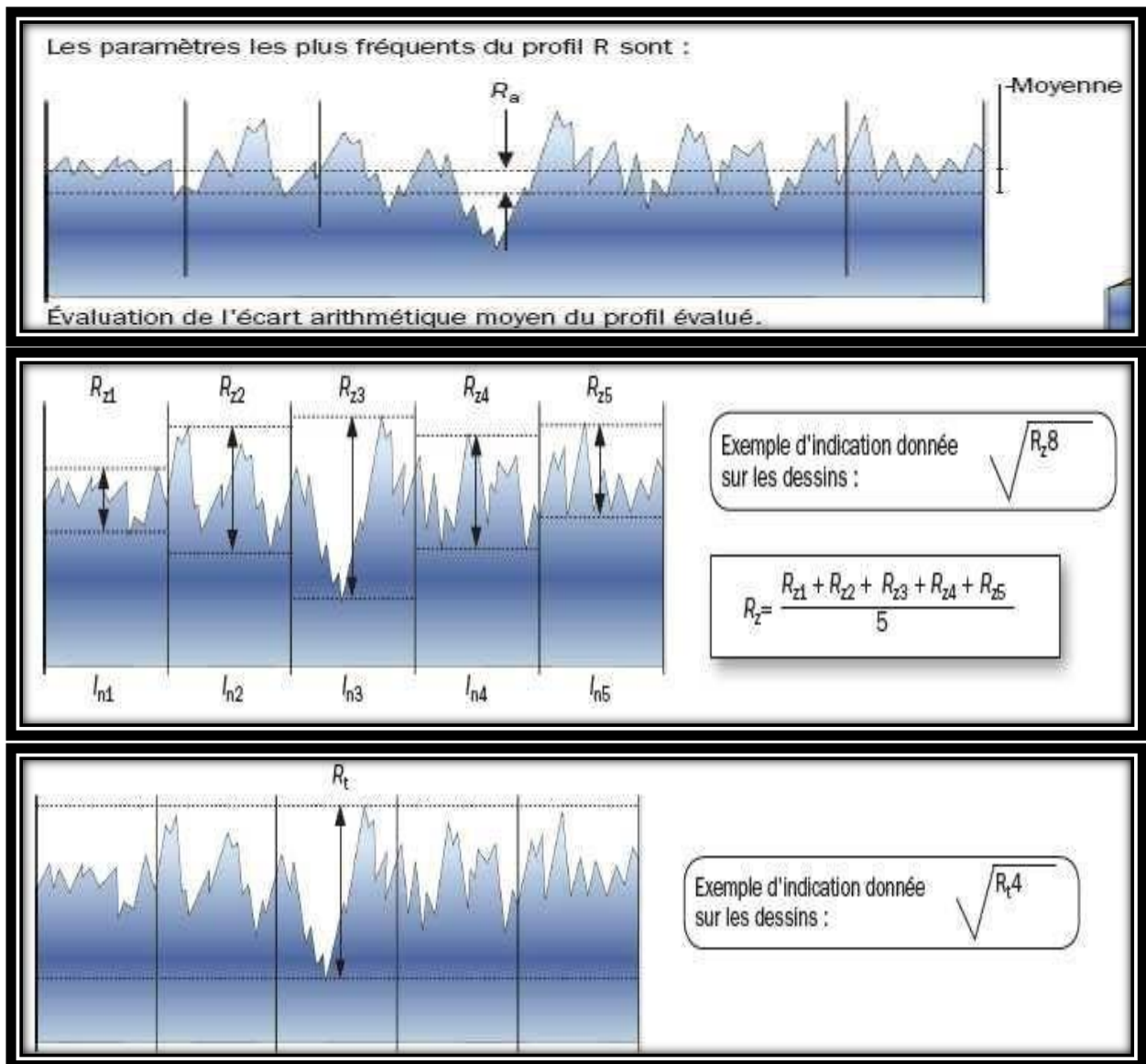


Fig.II.18. Amplitude de rugosité

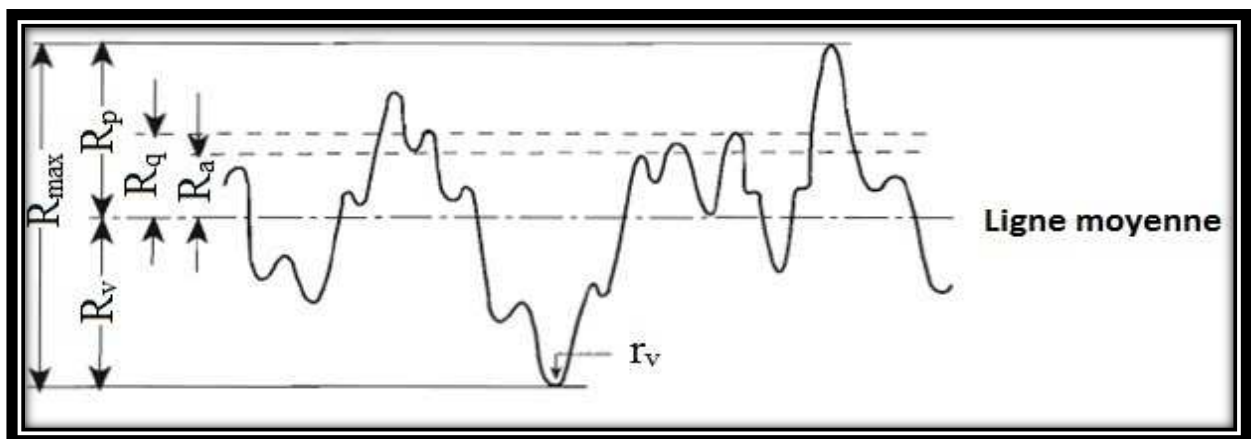


Fig. II.19. Différents paramètres utilisés pour décrire la rugosité de surface

II.4.3. La Machine de la rugosité

Il s'effectue à l'aide d'un appareil modèle surfest-4

Lorsque les comparaisons visuelles et tactiles ne sont pas suffisantes pour distinguer une différence de rugosité entre deux surfaces, on utilise un rugosimètre qui détermine de manière sûre et précise un certain nombre de paramètres de rugosité (R_a , R_z , R_{max} ...). Parmi les applications industrielles nécessitant l'utilisation d'un rugosimètre on peut citer les domaines suivants :

- Mécanique : l'optimisation de la rugosité permet un meilleur ancrage mécanique, notamment au sein de dispositifs où les forces de friction jouent un rôle fonctionnel prépondérant.
- Qualité : l'utilisation d'un rugosimètre permet le contrôle de la qualité de finition en bout de chaîne de production, permettant de détecter et de corriger d'éventuels problèmes survenus durant l'usinage. [17]. [16]



Fig. II.20. La machine de la rugosité modèle surfest-4