

Chapitre I : Caractérisation mécanique des matériaux

1 Introduction

La structure d'un matériau correspond à la façon dont s'agencent ses éléments constitutifs.

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'œil nu

Tous les matériaux interagissent avec des agents extérieurs lorsqu'ils sont utilisés

Par exemple :

- Un matériau sur lequel s'exerce une force subit une déformation
- Une surface métallique polie réfléchit la lumière...

6 grandes catégories de propriétés :

– Mécaniques

– Électriques

– Thermiques

– Magnétiques

– Optiques

– Chimiques Comportement dans un environnement réactif

Propriétés physiques : concernent le comportement des matériaux soumis à l'action de la température, des champs électriques ou magnétiques ou de la lumière

2. Classification des matériaux

Les matériaux solides sont répartis en trois grands groupes : les métaux, les céramiques et les polymères. Mais il existe aussi trois autres types de matériaux synthétiques dits intermédiaires : les composites (figure I.1), les semi-conducteurs et les biomatériaux.

2.1 Métaux et alliages

Exemples : Fe, Cu, Al, aciers, laiton (Cu-Zn), bronze (Cu-Sn), ...

- Solides atomiques à liaison métallique (bien organisée)
- Propriétés mécaniques : résistants + ductiles

- Propriétés chimiques : souvent corrodables

2.2 Polymères

Les polymères les plus connus sont les matières plastiques et les caoutchoucs. Un grand nombre de polymères sont des composés organiques constitués de carbone, d'hydrogène et d'autres éléments non métalliques.

Exemples : Polychlorure de vinyle (PVC), Polyéthylène (PE), Polystyrène (PS), Poly méthacrylate de méthyle (PMMA) (« plexiglas »), PA (« nylon »), PTFE (« teflon »), ...etc.

- Chaînes d'atomes entremêlées et des molécules de très grande taille.
- Propriétés mécaniques : peu résistants, fragiles/ductiles
- Propriétés physiques : légers, température de fusion basse (<200°C), isolants
- Propriétés chimiques : inertes

2.3 Céramiques

Composées d'éléments métalliques et non métalliques, les céramiques sont généralement des oxydes, des nitrures ou des carbures.

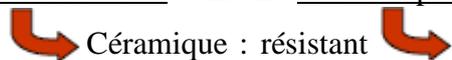
Exemples : silice (SiO₂), alumine (Al₂O₃), carbure de tungstène (WC), carbure de silicium (SiC), Nitrure de Silicium (Si₃N₄) ciment, béton, plâtre, porcelaine, ...

- Solides atomiques à liaisons covalentes et ioniques (organisées)
- Propriétés mécaniques : très résistants, fragiles
- Propriétés physiques : température de fusion très élevée, isolants
- Propriétés chimiques : inertes

2.4 Composites

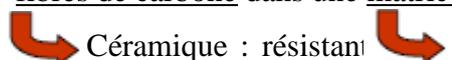
Divers composites ont été synthétisés par combinaison de plusieurs matériaux.

Exemple 1 : « fibre de verre » (PRFV) = fibres de verre dans une matrice époxyde


Céramique : résistant
Polymère :
tenace

(PRFV : polymères renforcés par des fibres de verre)

Exemple 2 : « fibre de carbone » (PRFC) = fibres de carbone dans une matrice époxyde


Céramique : résistant
Polymère :
tenace

(PRFC : polymères renforcés par des fibres de carbone)

Exemple 3 : pneu = fils d'acier dans une matrice de caoutchouc

↳ Métal : résistant ↳ Polymère : souple

Exemple 4 : « béton armé » = ferrailage noyé dans du béton

↳ Métal : résistant ↳ Céramique : peu coûteux + isolant

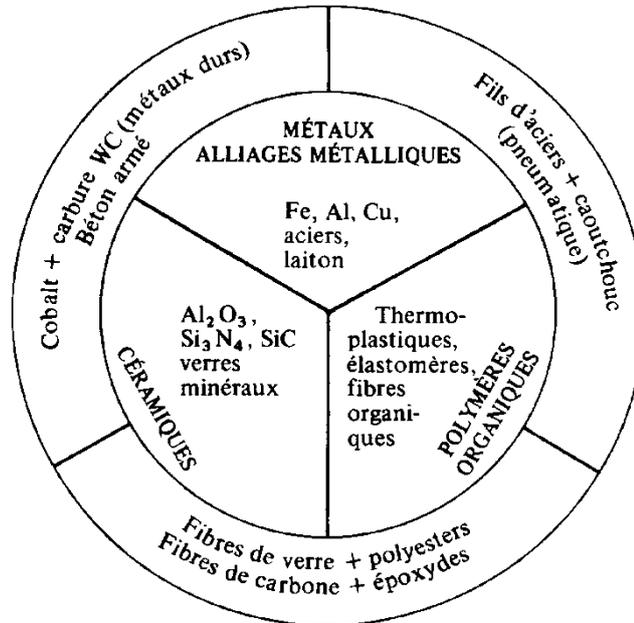


Figure I.1. : Différentes classes des matériaux

2.5 les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont utilisés en raison de leurs propriétés électriques inhabituelles. Ils sont utilisés dans la mise au point et la fabrication des circuits intégrés.

2.6 Les biomatériaux

Les biomatériaux servent à la fabrication de prothèses et d'implants destinés à remplacer certains organes malades ou défaillants du corps humain. Les métaux, les polymères, les céramiques, les composites et les semi-conducteurs peuvent être employés comme biomatériaux.

3 Propriétés générales des matériaux

3.1. Vocabulaire

Les matériaux sont classés en :

- **Matériaux anisotropes**

Les propriétés sont fonction de la direction, exemple : bois, roches sédimentaires, fibres de verre.

- **Matériaux orthotropes**

Les propriétés sont définies selon trois axes, exemple : laminés.

- **Matériaux isotropes**

Les propriétés sont les mêmes dans toutes les directions, exemple : acier, béton.

Les quatre grandes classes de propriétés des matériaux sont : les caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques et thermiques. Elles sont à la base du choix des matériaux pour une application donnée (figure I.2).

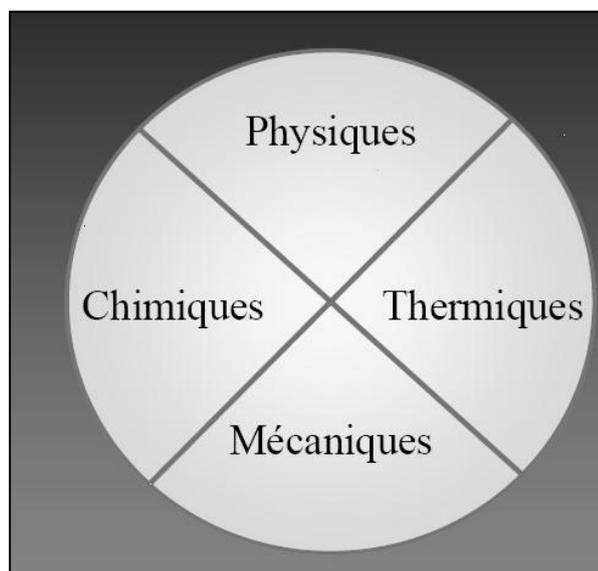


Figure I.2. : Classes de propriétés des matériaux

3.2. les propriétés physiques (densité, propriétés électriques, magnétiques et optiques).

3.2.1. La masse volumique et densité

La masse volumique est la masse d'une pièce divisée par son volume. Elle est désignée par la lettre grecque ρ (rhô), et s'exprime en kilogramme par mètre cube.

$$\rho = m/V \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad \text{I.1}$$

Un matériau de masse volumique élevée est dit « lourd » ; un matériau de masse volumique faible est dit « léger ». On prend souvent comme référence l'eau : $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg/m}^3$.

On parle souvent de densité. La densité d est le rapport entre la masse volumique du matériau et la masse volumique de l'eau ; elle est sans unité. Les valeurs de la masse volumique et de la densité de quelques matériaux sont données au tableau I.1.

$$d_{\text{matériau}} = \rho_{\text{matériau}} / \rho_{\text{eau}} \text{ (sans dimension)}$$

I.2

La masse volumique est importante pour déterminer :

- le dimensionnement de la structure supportant le produit (coût) ;
- l'inertie du produit, donc la puissance des actionneurs (moteurs, vérin, ressorts,...) ;
- le coût de transport, la capacité à être manutentionné ;
- la vitesse de propagation des ondes mécaniques (résonance).

Matériau	ρ (kg/m ³)	d
Bois	450 – 1170	0,45 – 1,17
Alcool	789	0,789
Huile	900	0,9
Eau	1000	1
Polymères	850 – 1410	0,85 – 1,41
Roches, verre, béton, céramiques	1250 – 2800	1,25 – 2,8
Métaux	1750 – 23000	1,75 – 23

Tableau I.1. : Masse volumique et densité de quelques matériaux

3.2.2. Propriétés électriques

3.2.2.1. Conductivité et résistivité électriques

Une des principales caractéristiques électriques (physiques) d'un matériau solide est sa capacité à transmettre un courant électrique. La loi d'Ohm associe le courant I (ou vitesse de passage des charges électriques) à la tension appliquée dans l'équation :

$$V = I \cdot R \quad \text{I.3}$$

Avec V en volt, I en ampère et R en Ohm.

La résistance électrique R d'une pièce dépend de sa forme et du matériau.

$$R = \rho \cdot l / S \quad \text{I.4}$$

Avec

ρ : résistivité, en $\Omega \cdot m$, dépend du matériau ;

l : longueur de la pièce, S : aire de la section de la pièce

La résistance R, est d'autant plus élevée que la longueur l parcourue par les charges électriques est grande et que l'aire S de la section à travers laquelle elles circulent est petite (figure I.3).

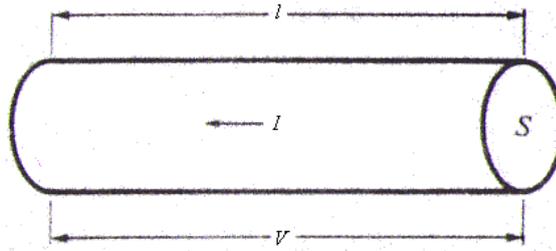


Figure I.3. : Matériau parcouru par un courant électrique d'intensité I , Sous l'influence d'une différence de potentiel V

La loi d'Ohm s'écrit : $V = \rho l/S I$ I.5

La conductivité électrique, σ , est l'inverse de la résistivité, d'où :

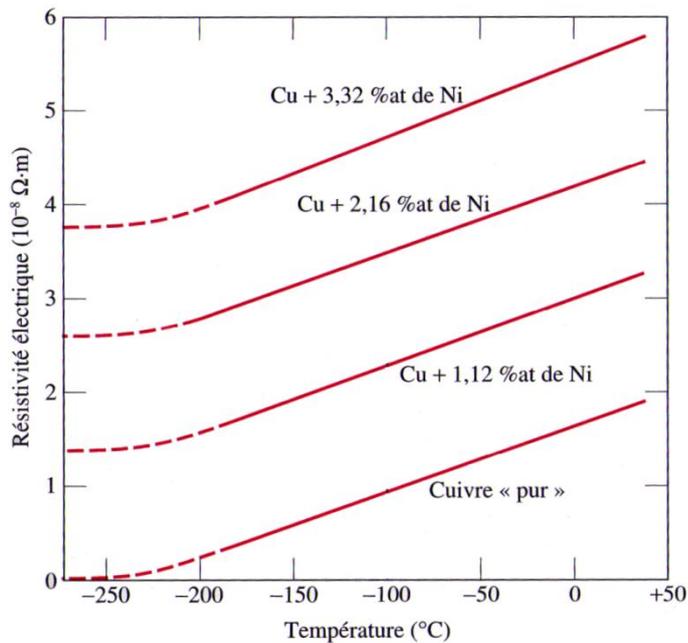
$$\sigma = 1/\rho = 1/R.S = 1.I/V.S \text{ [}(\Omega.m)^{-1}\text{ ou S/m, siemens par mètre]} \quad \text{I.6}$$

Cette propriété indique dans quelle mesure un matériau est conducteur ou non d'un courant électrique (Tableau I.2).

Matériau	ρ ($\Omega \cdot m$)	σ ($S \cdot m^{-1}$)	Observations
plastique	10^{20}	10^{-20}	Mauvais conducteur = isolant
verre	10^{17}	10^{-17}	Mauvais conducteur = isolant
Semi-conducteurs	10^{-4} à 10^6	10^{-6} à 10^4	Conductibilité intermédiaire
métaux	10^{-8} à 10^{-5}	10^5 à 10^8	Très bons conducteurs

Tableau I.2. : Résistivité (ρ) et conductivité électrique (σ) de quelques matériaux

La variation de la résistivité électrique en fonction de la température pour les métaux purs et les quelques alliages est donnée à la figure I.4.



- 1) Influence de la température,
- 2) Influence de la composition du matériau,
- 3) ρ des alliages > ρ des métaux.

Figure I.4. : Résistivité électrique en fonction de la température

3.2.2.2. Densité du courant et intensité du champ électrique

La densité du courant J , exprimée en ampères par mètre carré, est l'intensité de courant par unité de surface, soit :

$$J = I / S \quad \text{I.7}$$

Ainsi la loi d'Ohm s'écrit sous la forme :

$$V = I R = I \rho l / S \rightarrow V / l = I \rho / S = I / S \cdot 1 / \sigma$$

$$\sigma V / l = I / S = J \rightarrow J = \sigma E \quad \text{I.8}$$

Avec $E = V / l =$ intensité de champs électrique

3.2.3. Propriétés magnétiques

3.2.3.1. Vocabulaire

Certains matériaux ont des propriétés magnétiques. On distingue :

- le ferromagnétisme : les matériaux sont attirés par les aimants et gardent une aimantation rémanente, peuvent constituer des aimants permanents : Fe α (ferrite à structure CC), Co, Ni, alliages (SuperMalloy Fe-Ni-Mo, Heusler Cu-Mn-Al, Sm-Fe-Co, ...); au delà d'une certaine température dépendant du matériau (température de CURIE, T_c), les matériaux ferromagnétiques perdent leur aimantation ;

Par exemple : Fer $\rightarrow T_c = 770^\circ\text{C}$, cobalt = 1120°C , Ni = 358°C , magnétite = 585°C .

- le ferrimagnétisme : les matériaux sont des aimants naturels : magnétite Fe_3O_4 ;

- le paramagnétisme : les matériaux sont attirés par les aimants mais mal, ils s'aimantent sous l'effet d'un champ magnétique, mais ne conservent pas leur aimantation : Fe γ (austénite, plupart des inox), Al, Ca, Pt, Na, U ;
- le diamagnétisme : les matériaux ne sont pas attirés par un aimant, ils ne s'aimantent pas (à l'échelle macroscopique) ; c'est le cas de la très grande majorité des matériaux.

Les matériaux diamagnétiques ne sont influencés que par des champs magnétiques extrêmement puissants.

3.2.3.2. La perméabilité magnétique relative et la susceptibilité magnétique

Considérons un solénoïde de longueur l , composé de N spires, parcouru par un courant I (figure I.5). Donc, l'intensité d'un champ magnétique, sera :

$$H = N I / l \text{ [Ampère/mètre]} \quad \text{I.9}$$

L'induction magnétique B [teslas ou Wb/m^2], ou densité de flux magnétique, est l'intensité du champ magnétique dans un matériau soumis à un champ magnétique H .

$$\text{D'où } B = \mu H \quad \text{I.10}$$

μ : Perméabilité magnétique, caractérise le matériau que traverse le champ H [Wb/Am ou H/m Henrys/m]

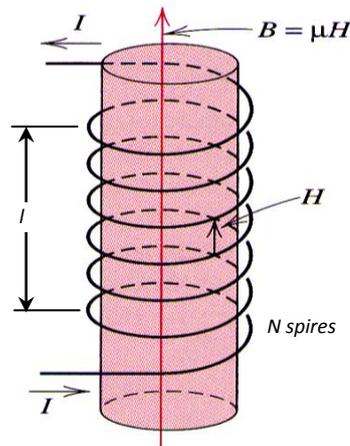


Figure I.5. : Induction magnétique B dans un matériau solide

Dans le cas du vide (pas de barreau à l'intérieur de la bobine) $B_0 = \mu_0 H$, Avec μ_0 perméabilité du vide = $1.257 \cdot 10^6 \text{ H/m}$.

On définit aussi la perméabilité relative, qui détermine les propriétés magnétiques des matériaux ou des substances solides par $\mu_r = \mu / \mu_0$ [sans dimension].

Remarque : la perméabilité et perméabilité relative sont des constantes qui déterminent jusqu'à quel point un matériau peut être aimanté, CAD dans quelle mesure un champ magnétique extérieur H peut induire dans le matériau une densité de flux magnétique B.

- $\mu_r \leq 1$: matériau diamagnétique,
- $\mu_r \geq 1$: matériau paramagnétique,
- $\mu_r \gg 1$ (200 à 10 000) : matériau ferromagnétique ;

L'aimantation M dépend du matériau considéré est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique appliqué par la relation :

$$M = \chi_m H \quad \text{I.11}$$

La constante de proportionnalité χ_m est appelée susceptibilité magnétique. Elle est fonction du matériau considéré. Elle est liée à la perméabilité relative par la relation suivante :

$$\chi_m = \mu_r - 1 \quad \text{I.12}$$

- $\chi_m \leq 0$ (env. -10^{-5}) : matériau diamagnétique,
- $\chi_m \geq 0$ (env. 10^{-3}) : matériau paramagnétique,
- $\chi_m \gg 0$ (50 à 10^5) : matériau ferromagnétique.

I.6.3. Propriétés thermiques

On distingue en général quatre « propriétés thermiques » :

- la température de fusion ;
- la conductivité thermique ;
- la capacité calorifique ;
- le coefficient de dilatation linéaire

I.6.3.1. la température de fusion

La température de fusion se note T_f et s'exprime en kelvins (K) ou en degrés celsius (°C) : en dessous de cette température, le matériau est à l'état solide, au dessus, il est à l'état liquide. Les matériaux à température de fusion élevée sont dits « réfractaires ». La température de fusion de quelques matériaux est donnée au tableau I.3.

Matériau	Température de fusion (°C)
Aluminium	660.2
Chrome Cr	1890
Colbalt Co	1495
Plomb Pb	327.5

Alumine Al ₂ O ₃	2050
Polychlorure de Vynil (PVC)	160

Tableau I.3. : Température de fusion de quelques matériaux

I.6.3.2. la conductivité thermique

La conductivité thermique est l'aptitude d'un matériau conducteur à transmettre la chaleur. Certains matériaux conduisent bien la chaleur que d'autres : ils s'échauffent vite. D'autres, au contraire, s'échauffent très lentement, ce sont les isolants.

La conductivité thermique se note λ (lambda) ; elle s'exprime en watt par mètre par kelvin ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$). Si λ est élevé, le matériau est conducteur de chaleur ; si elle est faible, le matériau est isolant.

La densité de flux de chaleur ou le flux thermique j est la chaleur qui traverse une unité de surface, exprimée en watt par mètre carré ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). Il est relié au gradient de température $\Delta T/\Delta x$ (variation de température par unité de longueur) par la loi de FOURIER.

$$j = -\lambda \times \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{I.13}$$

- j : densité de flux de chaleur ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) ;
- λ : conductivité thermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) ;
- $\Delta T/\Delta x$: gradient de température ($\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$).

La Conductivité thermique de quelques matériaux à 20°C est donnée au tableau I.4.

Matériau	λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
Aluminium	247
cuivre	428
Nickel	90
Acier inoxydable 316	15.9
Alumine Al ₂ O ₃	39
Magnésie MgO	37.7
Polystyrène	0.13
Téflon	0.25
Nylon	0.24

Tableau I.4. : Conductivité thermique de quelques matériaux à 20°C

I.6.3.3. Capacité calorifique

C'est l'aptitude d'un matériau à absorber la chaleur du milieu ambiant. Elle correspond à la quantité de chaleur nécessaire pour faire augmenter de un degré la température d'un matériau.

$$C = dQ / dT \text{ [J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}] \quad \text{I.14}$$

C'est l'énergie qu'il faut apporter à un kilogramme de matériau pour élever sa température d'un degré.

La Capacité calorifique se mesure de 02 façons différentes : soit à pression constante (C_p) (pression extérieure constante), soit à volume constant (C_v) (volume de l'échantillon est constant). Le tableau I.5 donne quelques valeurs de la capacité calorifique à pression constante (C_p).

Matériau	$C_p \text{ (J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1})$
Aluminium Al	900
Argent Ag	235
Acier 1025	486
Alumine Al ₂ O ₃	775
Silice SiO ₂	740
Polystyrène	1360
PMMA	1500
Epoxy	1800

Tableau I.5. : Comparaison des valeurs de la capacité calorifique de quelques matériaux

I.6.3.4. Dilatation thermique

La plupart des matériaux se dilatent en se réchauffant et se contractent en se refroidissant. Le changement de longueur correspond à une variation de température s'exprime par :

$$\frac{L-L_0}{L_0} = \alpha (T-T_0) \text{ (Loi de la dilatation linéaire)} \quad \text{I.15}$$

Ou encore
$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \times \Delta T \quad L = L_0(1 + \alpha \times \Delta T) \quad \text{I.16}$$

Avec :

α (alpha) (α est en K^{-1} ou C^{-1}), le coefficient de dilatation linéaire, qui donne la variation relative de longueur en fonction de la variation de température. Il indique dans quelle mesure un matériau se dilate lorsqu'on le chauffe.

- ΔL : variation de longueur ;
- L_0 : longueur initiale ;
- ΔT : variation de température ;
- T_0 : température initiale.

Des exemples du coefficient de dilatation linéaire des différentes classes de matériaux sont donnés au tableau I.6.

Matériau	α ($10^{-6} K^{-1}$)
Alumine Al ₂ O ₃	7,6
verre	9
métaux (sauf Li)	8 à 29
lithium	51,2
soufre	79
polystyrène	50 à 83
nylon	150
PMMA	50à90
Epoxy	55 à 90

Tableau I.6. : Coefficient de dilatation linéaire des différentes classes de matériaux

I.6.4. Propriétés chimiques

I.6.4.1. Résistance aux agressions extérieures (corrosion)

La corrosion désigne l'attaque destruction et involontaire que subit un métal. C'est une dégradation électrochimique (elle consiste en une réaction chimique marquée par un transfert d'électrons entre 2 espèces chimiques). Donc, c'est une dégradation par réaction avec l'environnement et non pas par sollicitation mécanique.

La corrosion concerne essentiellement les métaux, mais tous les matériaux sont susceptibles de se dégrader selon l'environnement. La corrosion se manifeste par une perte effective de matière par dissolution. L'oxydation, un type de corrosion, se manifeste par la formation d'une pellicule ou d'une croûte non métallique sur la surface des pièces.

Les caractéristiques du milieu de corrosion, dont la composition, la température et la vitesse du fluide, peuvent avoir une incidence marquée sur les propriétés relatives à la corrosion des

matériaux se trouvant dans un tel milieu. Dans la plupart des cas, l'accroissement de la vitesse du fluide fait augmenter la vitesse de corrosion en raison d'effets érosifs. La vitesse de la plupart des réactions chimiques et en particulier celles de corrosion s'accroît avec la température. Très souvent, une hausse de concentration de l'espèce corrosive se traduit par une plus grande vitesse de corrosion. On peut quantifier la corrosion par le taux de corrosion, c'est-à-dire la proportion (en pour cent) de métal qui s'est transformé en oxyde durant un essai normalisé. L'essai consiste à soumettre le matériau à un environnement donné pendant un temps donné, comme par exemple une projection de saumure (eau salée) dans le cas du test de brouillard salin.

1- formes de corrosion

La corrosion métallique est répartie en huit catégories :

Corrosion uniforme, corrosion galvanique, corrosion caverneuse, piqûration, corrosion intergranulaire, lixiviation différentielle, corrosion par érosion, corrosion sous contrainte.

2- milieux corrosifs

Les milieux corrosifs englobent l'atmosphère (origine des pertes les plus élevées), les solutions aqueuses, les sols, les acides, les bases, les solvants inorganiques, les sels fondus, les métaux liquides et enfin le corps humain.

3- prévention de la corrosion

Les moyens et les méthodes de prévention contre la corrosion résident dans :

- ❖ Le choix judicieux des matériaux, acier inoxydable,
 - ❖ La modification du milieu. Diminution de la température et de la vitesse du fluide se traduit par une baisse de la vitesse de corrosion. L'augmentation ou la diminution de la concentration de certaines substances (les inhibiteurs) réduisent la corrosivité
 - ❖ La conception, traitement sous vide, (oxydation) exclure l'air
 - ❖ Les revêtements et protection cathodique. Revêtements métalliques ou non métalliques, rendre la réaction d'oxydation en une réduction.

I.6.4.2. L'oxydation

L'oxydation des alliages métalliques est également possible dans des atmosphères gazeuses telles que l'air, où se forme alors une croûte d'oxyde à la surface du métal. On donne à ce phénomène le nom de corrosion sèche (corrosion sèche : réaction d'oxydoréduction

entre le métal et un agent corrosif non métallique, comme : O, Cl, F, SO₂, CO, CO₂, H₂O, ..., avec formation d'un composé oxyde, chlorure, sulfure, fluorure ...etc. (tableau I.7) en milieu gazeux.

Matériau	oxyde	sulfure
Beryllium	BeO	//
Cuivre	CuO	Cu ₂ S
Nickel	NiO	Ni ₃ S ₂
Chrome	Cr ₂ O ₃	CrS
Titane	TiO	//
Fer	FeO ou Fe ₃ O ₄	FeS
Aluminium	Al ₂ O ₃ (alumine)	
Argent	Ag ₂ O	Ag ₂ S
Silicium	SiO ₂	

Tableau I.7. : Quelques oxydes et sulfures à 20 °C

Propriétés mécaniques des matériaux (traction, dureté et résilience)

II.1. Introduction

En général, les opérations de formage et d'assemblage, notamment le soudage, conduisent à des pièces contenant des contraintes résiduelles. Celles-ci peuvent modifier considérablement leur tenue ultérieure en provoquant des déformations, ou en exerçant des effets néfastes ou bénéfiques sur la fissuration. Il s'avère donc très important d'apprécier convenablement ces contraintes résiduelles, et, en dehors des mesures toujours délicates, de plus en plus les calculs apportent les réponses voulues. Ici encore, ils ne sauraient être convenablement conduits sans une connaissance précise des lois de comportement mécanique. Enfin et surtout il faut déterminer les propriétés mécaniques des matériaux pour dimensionner les structures de façon à éviter divers modes de ruines : le flambage, la déformation plastique exagérée,

la rupture brutale ou la rupture différée par fatigue, corrosion sous contrainte ou fluage. Il est indispensable de maîtriser de mieux en mieux ces questions en raison tant des exigences accrues de sécurité, dans l'énergie nucléaire et dans les transports notamment, que des économies de matière et d'énergie susceptibles d'être apportées par une meilleure durabilité. Les calculs nécessitent une évaluation correcte des champs de contraintes et de déformations qui existent dans les pièces : il faut donc connaître les lois de comportement.

De plus, il est indispensable de déterminer les limites qu'il ne faut pas dépasser pour éviter la ruine : limite d'élasticité, charge de rupture, limite d'endurance en fatigue, etc.

Les essais mécaniques font naturellement l'objet de nombreuses normes (AFNOR, ASTM, DIN, ISO, etc.

Les essais mécaniques permettent d'évaluer les qualités mécaniques des matériaux utilisés.

Ils sont pratiqués soit :

- Directement sur les pièces
- Sur des éprouvettes - échantillons du matériau considéré

II.2. Contraintes et déformations

Quand un corps est soumis à l'action de forces extérieures, des contraintes s'établissent, par réaction, à l'intérieur de ce corps (corps dans un état contraint). Aux contraintes sont associées des déformations. Ces déformations sont dites élastiques ou réversibles, si le corps sollicité, retrouve sa forme initiale quand les forces extérieures sont retirées.

II.2.1. Définition de la contrainte

Premier cas : Application d'une force F perpendiculaire à la surface d'un bloc (corps) de matériau (figure II.1).

La contrainte de traction (étirement du bloc) est :

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

Unités : Dans le système International d'unités les contraintes sont exprimées en Pascal : $1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{\text{m}^2}$

En génie des matériaux les unités les plus utilisées sont :

$$1 \text{ MPa} = \frac{1 \text{ N}}{\text{mm}^2} = 10^6 \text{ Pa} \quad \& \quad 1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa}$$

Deuxième cas : Application d'une force F non perpendiculaire à la surface d'un bloc (corps) de matériau (figure II.2).

$$F = F_n + F_t$$

F_n : force perpendiculaire (normale) à la surface

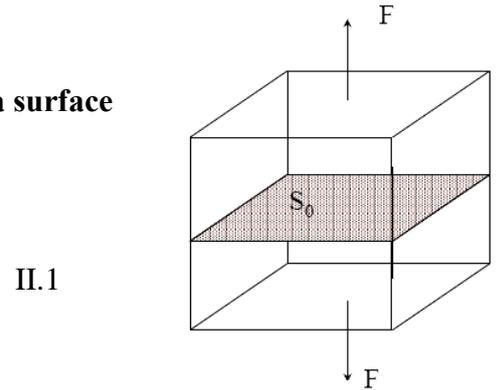
F_t : force parallèle à la surface

La contrainte de traction (étirement du bloc) est :

$$\sigma = \frac{F_n}{S_0}$$

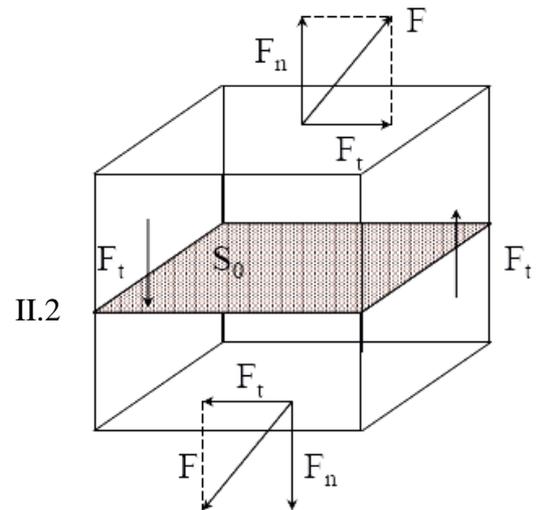
La contrainte de cisaillement ou la cission est :

$$\tau = \frac{F_t}{S_0}$$



II.1

Figure II.1. : Corps soumis à une force perpendiculaire à sa surface



II.2

Figure II.2. : Corps soumis à une force non perpendiculaire à sa surface

II.2.2. Principaux états de contraintes

Il y a quatre états de contrainte que l'on rencontre souvent :

1. L'état de contrainte uniaxiale : traction ou compression simple (figure II.3).

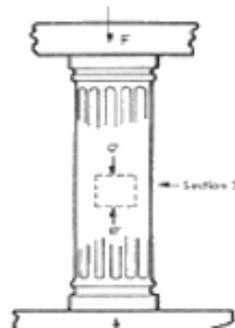
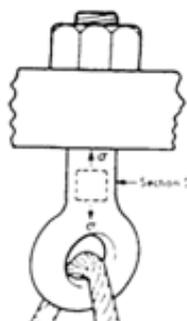


Figure II.3. : Traction ou compression simple

2. Traction biaxiale : chargement dans deux directions (exemple : réservoir sphérique contenant un fluide sous pression). C'est un état de contrainte non symétrique où les deux contraintes de traction sont différentes (figure II.4).

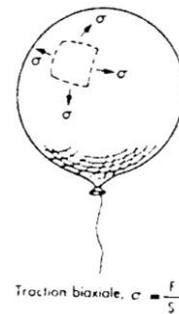


Figure II.4. : Traction biaxiale

3. Pression hydrostatique : c'est le cas où un solide est soumis à des compressions identiques sur toutes ses faces. Elle s'exerce aux grandes profondeurs des océans par exemple (figure II.5).

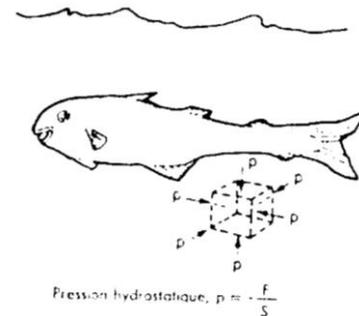


Figure II.5. : Pression hydrostatique

4. Cission pure ou Cisaillement pur : exemple : torsion d'un tube mince (figure II.6).

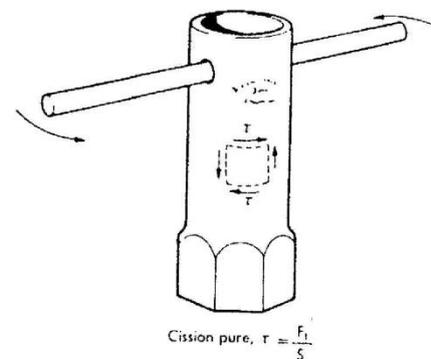


Figure II.6. : État de cission pure

II.2.3. Définition de la déformation

Les matériaux réagissent aux contraintes en se **déformant**. Les matériaux ne se déforment pas de la même manière, les matériaux rigides se déforment très peu, un matériau souple ou flexible se déforme beaucoup plus.

II.2.3.1. Cas d'une traction simple

Sous l'effet d'une traction simple, les corps subissent des déformations de traction ou des allongements (positifs ou négatifs).

Considérons le cube d'arrête l_0 soumis à une contrainte de traction σ qui agit perpendiculairement à la surface (figure II.7). On appelle **déformation ε le rapport des allongements à la longueur initiale**.

Ainsi, le cube s'allonge de Δl dans la direction de traction, on définit la déformation longitudinale conventionnelle (ou nominale).

Il subit une déformation latérale conventionnelle ε_l (contraction latérale, allongement négatif, v) suivant l'autre direction.

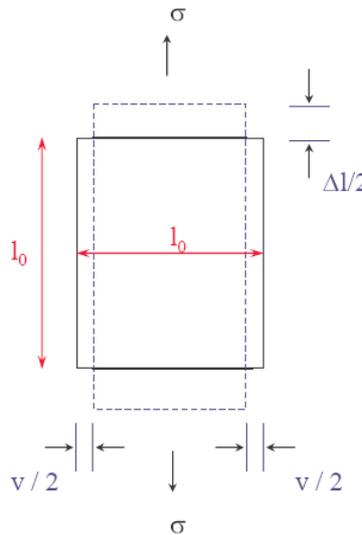


Figure II.7. : Déformation longitudinale et latérale dans le cas d'une traction simple

$$\text{D'où, la déformation longitudinale : } \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad \text{II.4}$$

$$\text{La déformation latérale : } \varepsilon_l = -\frac{v}{l_0} \quad \text{II.5}$$

Les déformations sont liées entre elles par le coefficient de poisson :

$$v = -\frac{\text{déformation latérale}}{\text{déformation longitudinale}} = -\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon} \quad \text{II.6}$$

II.2.3.2. Cas d'une compression pure

Sous l'effet des contraintes tangentielles ou de cisssion τ qui agissent parallèlement aux surfaces du cube, ce dernier subit **des déformations de cisaillement** (figure II.8).

Ainsi, si le cube est cisailé latéralement sur une longueur w , la déformation de cisaillement, ou distorsion, est défini par :

$$\gamma = \frac{w}{l_0} = \tan \theta$$

Puisque les déformations élastiques sont très petites, alors : $\gamma = \theta$

$$\text{ce qui donne : } \gamma = \theta = \frac{w}{l_0} \quad \text{II.7}$$

Où γ, θ est l'angle de cisaillement et w longueur de cisaillement.

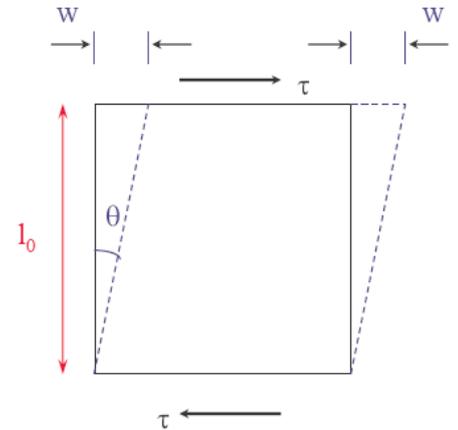


Figure II.8. : Déformation de cisaillement dans le cas d'une cission pure

II.3. Essai de Traction

II.3.1. Principe de l'essai

Cet essai consiste à exercer un effort axial sur une éprouvette de section initiale S_0 et de longueur utile l_0 et à enregistrer simultanément son allongement : on obtient une courbe de traction.

II.3.2. Dimensions de l'éprouvette et appareil de traction

Les dimensions des éprouvettes sont normalisées (figure II.9). Elles sont plates ou cylindriques, de longueur calibrée l de section constante S_0 et dans laquelle on définit la longueur de référence l_0 .

La longueur initiale l_0 et la section initiale S_0 sont reliées par la relation suivante :

$$l_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$$

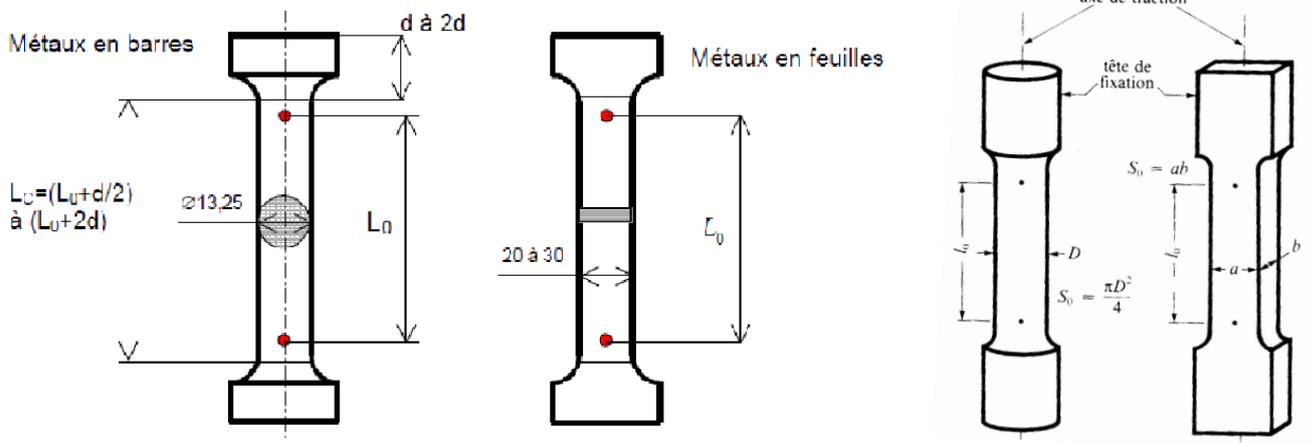
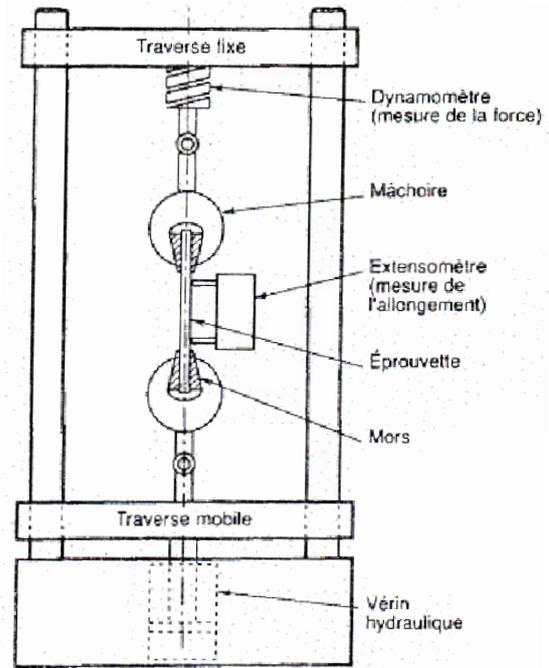


Figure II.9. : Dimensions des éprouvettes de traction

Les extrémités des éprouvettes cylindriques sont filetées ; elles sont donc vissées, celles des éprouvettes plates sont attachées par serrage dans les mors de la machine (figure II.10).

Les profils de raccords sont de rayon suffisamment grand pour qu'il n'y ait pas de concentration de contrainte dans ces zones.

Figure II.10. : Appareil de traction



Tous les paramètres qui sont déduits de l'essai de traction 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 (figure II.11) :

- sens long SL (repéré par l'indice 0°)
- sens travers ST (repéré par l'indice 90°)
- sens "oblique" (repéré par l'indice 45°).

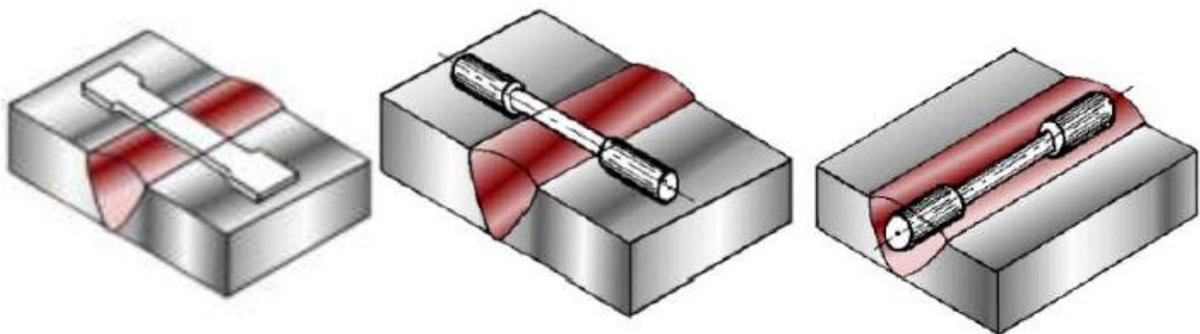


Figure II.11. : Évaluation des caractéristiques d'un cordon de soudure selon la direction de prélèvement

II.3.3. Courbe de l'essai de traction (figure II.12)

La courbe de traction obtenue présente classiquement trois zones :

- La droite OA correspond à la déformation élastique réversible (si on supprime l'effort, l'éprouvette reprend sa longueur initiale). L'éprouvette s'allonge proportionnellement à l'effort.
- La courbe AC est le domaine de déformation plastique homogène : si on supprime la force de traction, il y a un retour élastique suivant une parallèle à OA (l'éprouvette ne reprend pas sa longueur initiale, elle conserve un certain allongement) et il reste une déformation permanente.
- Pour CD, la force nécessaire pour déformer le matériau diminue alors que l'allongement continue d'augmenter : cette instabilité est appelée instabilité plastique. La striction apparaît. En D il y a rupture de l'éprouvette.

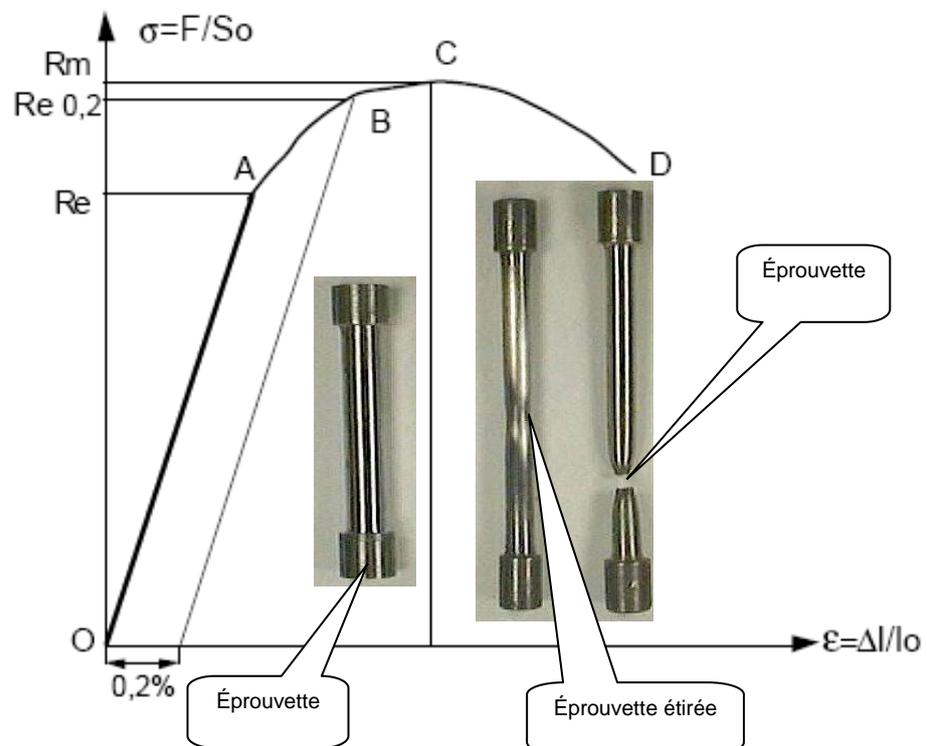


Figure II.12. : Courbe de l'essai de traction et formes de l'éprouvette de traction déformée

II.3.4. Caractéristiques mécaniques

II.3.4.1. Limite élastique R_e (contrainte élastique σ_e)

R_e (MPa) est la limite de proportionnalité ou **limite élastique**. Elle est bien marquée pour les matériaux ductiles. R_e correspond au seuil d'écoulement plastique.

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad \text{II.9}$$

II.3.4.2. Résistance limite à la traction R_m (contrainte maximale, contrainte à la rupture par traction σ_m)

R_m est la **résistance limite** à la traction. Cette valeur est utilisée pour estimer la limite d'endurance à la fatigue (Figure II.12)

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad \text{II.10}$$

R_e est atteinte quand on observe la première chute de l'effort lors de l'essai. En l'absence de ce phénomène, quand OA n'est pas rectiligne, on doit utiliser la limite conventionnelle d'élasticité.

II.3.4.3. Limite conventionnelle d'élasticité $R_{e0,2}$

$R_{e0,2}$ qui correspond à un allongement plastique de 0,2% (voir Figure II.12).

II.3.4.4. L'allongement pourcent à la rupture $A\%$

L'allongement pourcent à la rupture est :

$$A\% = \frac{l_d - l_0}{l_0} \times 100 \quad \text{II.11}$$

où l_d est la longueur de l'éprouvette à la rupture en D et $\Delta l = l_d - l_0$ l'allongement maximum à la rupture

II.3.4.5. Coefficient de striction

On le déduit de la section transversale S_d de la partie rompue et de section initiale S_0 et on a :

$$Z\% = \frac{S_0 - S_d}{S_0} \times 100 \quad \text{II.12}$$

II.3.4.6. Module d'élasticité longitudinale ou module d'Young E

La pente de la partie linéaire OA (Figure II.12) représente le **module d'Young E** (en Mpa ou en GPa) ou module d'élasticité longitudinale.

On appelle **loi de Hooke** la relation : σ élastique = E ε élastique ou encore $\sigma = E \cdot \varepsilon$

$$\sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{F}{S_0} \Rightarrow E = \frac{F}{S_0} \times \frac{l_0}{\Delta l} \quad \text{II.13}$$

- Le module d'élasticité E est une caractéristique essentielle du matériau.
- Plus le module est grand, plus le matériau est rigide ou plus la déformation élastique résultant de l'application d'une contrainte donnée est faible.
- Les module d'élasticité des céramiques sont généralement plus élevés que ceux des métaux ; ils plus faibles pour les polymères.
- Lorsque la température croît, le module d'élasticité décroît.
- La rigidité d'une structure en traction, compression ($K = \frac{EA}{l}$), flexion ($K = 3 \frac{EI}{l^3}$ cas d'une poutre encastree dans une extrémité et libre dans l'autre), est proportionnelle au module d'Young.

II.3.4.7. Coefficient de Poisson

A tout allongement de l'éprouvette correspond une contraction de son diamètre (proportionnelle à l'effort de traction dans le domaine élastique).

La contraction relative s'exprime par $\varepsilon' = \frac{d_0 - d}{d_0}$ II.14

Le **coefficient de Poisson**, est le rapport sans dimension : $\nu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$ = constante pour un matériau donné. Pour la plupart des matériaux il est de l'ordre de 0,25 à 0,3.

Le tableau II.1 donne des exemples de propriétés mécaniques pour quelques matériaux.

Matériau	E (GPa)	Coefficient de Poisson	Limite d'élasticité R _{0,2} (MPa)	Résistance à la traction R _m (MPa)
Aluminium	70	0.34	40	80
Fer	210	0.29	50	200
Tungstène	410	0.28	1000	1510
Acier doux au carbone	210	0.29	220	430
Aciers au carbone (trempé)	210	0.29	250-1300	500-1800
Alliage de titane	80-130	0.33	250-1200	300-1300
Diamant	1000	0.1		7000
Carbure de Si	450	0.19	450-520	1000
Béton	40-50		20-30	50
Silice (SiO ₂) (quartz)	54	0.16	110	1200
PVC	2.4	0.3	45-50	
PMMA	3.2	0.4	60-110	110
Epoxy	2-5		30-100	30-120

Tableau II.1. : Exemples de propriétés mécaniques (à 20°C)

II.3.4.8. Module d'élasticité transversale ou module de cisaillement G ou module de Coulomb

Le **module de cisaillement G** ou module de Lamé ou module de Coulomb, exprimé en Mpa ou Gpa, définit le cisaillement élastique consécutif à l'application d'une sollicitation de cisaillement. Il varie sensiblement comme E en fonction de la température et le type de matériau.

Pour les matériaux isotopes, on a la relation : $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ II.15

II.3.5. Comportements des matériaux en traction

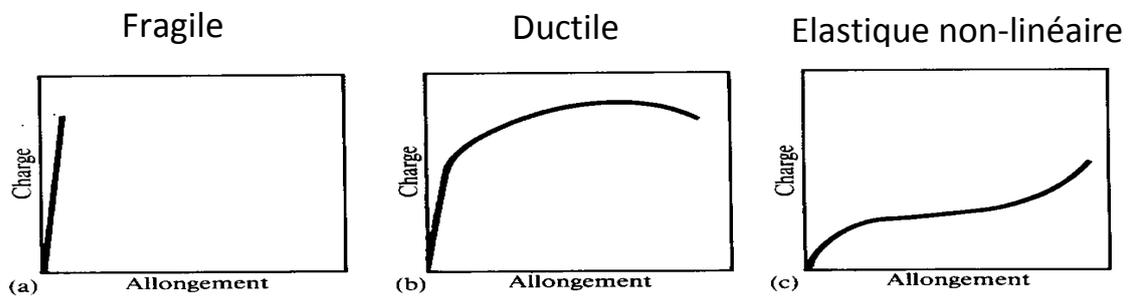


Figure II.13. : Comportements des matériaux en traction

II.3.5.1. Comportement fragile (figure II.13)

Le matériau ne présentant pas de domaine plastique, la rupture se produit alors que les déformations sont élastiques (satisfait la loi de Hooke). Exemples : verre, la fonte grise, les aciers bruts de trempe, les céramiques, le béton et les polymères thermodurcissables.

II.3.5.2. Comportement ductile (figure II.13)

Une déformation élastique réversible est suivie d'une déformation plastique irréversible et permanente, précédant la rupture du matériau. Exemples : majorité des métaux et des alliages et certains polymères thermoplastiques.

II.3.5.3. Comportement élastique non linéaire (figure II.13)

Le comportement est élastique c'est-à-dire réversible, mais l'allongement n'est pas proportionnel à la force appliquée, il n'obéit pas à la loi de Hooke. Exemples : certains polymères thermoplastiques et les élastomères tels que les caoutchoucs.

II.3.6. Exemples de variation des caractéristiques mécaniques en traction

II.3.6.1. En fonction de la vitesse de refroidissement (figure II.14 et II.15)

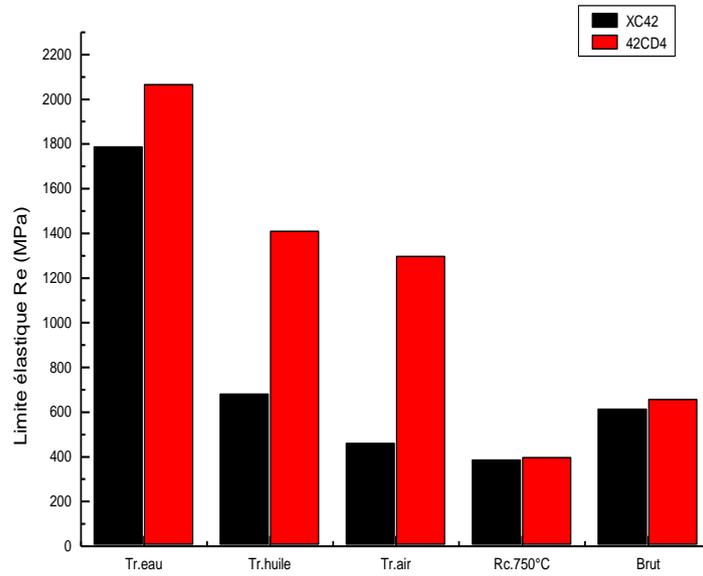


Figure II.14. : Influence de vitesse de refroidissement (sévérité du milieu de trempe) sur la limite élastique

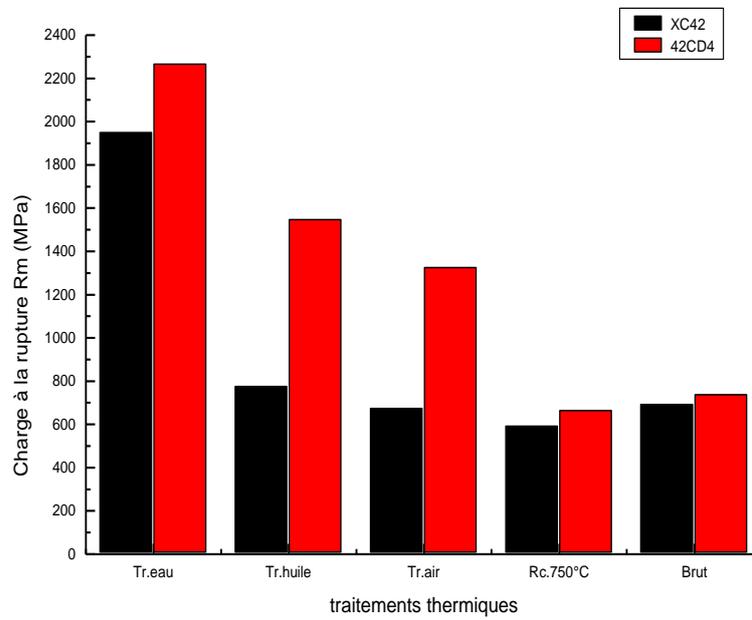


Figure II.15. : Influence de vitesse de refroidissement sur la charge à la rupture

II.3.6.2. En fonction de la température de revenu (figure II.16 et II.17)

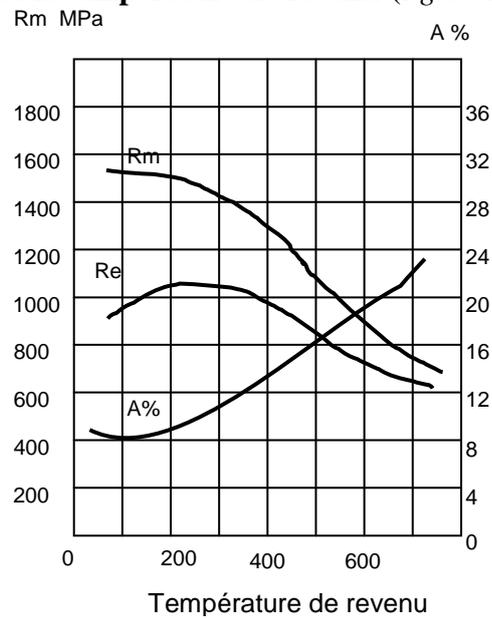


Figure II.16. : Caractéristiques mécaniques après trempe à l'eau à 850° d'un acier C40

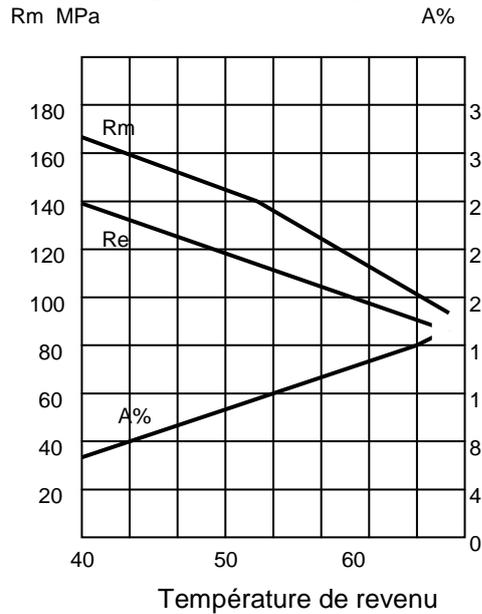


Figure II.17. : Caractéristiques mécaniques après trempe à l'huile à 850° d'un acier 42CD4

II.3.6.3. Variation du module d'élasticité en fonction de la température (figure II.18)

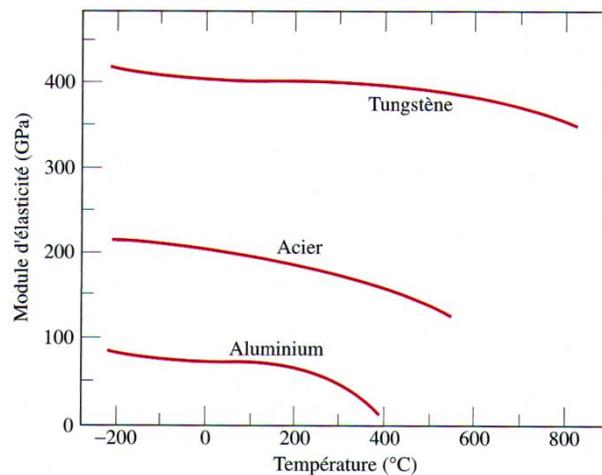


Figure II.18. : Variation du module d'élasticité (E) en fonction de la température

II.3.6.4. Effet de masse

Pour les aciers traités, un effet de masse apparaît. Il se traduit par une diminution des caractéristiques de la surface vers le coeur quand la taille des pièces augmente.

Le tableau II.2 donne les caractéristiques de deux aciers ayant une trempabilité (c'est l'aptitude à prendre la trempe ou à durcir *en profondeur*. Ce n'est pas synonyme de niveau dureté, mais plutôt moindre écart de dureté) respective moyenne et forte. Les éprouvettes sont prises à 12,5 mm de la surface.

Dimension du barreau traité (en mm)	35 CD4			35 NCD16		
	Re	Rm	A%	Re	Rm	A%
d<16	80	110	11	105	135	9
16<d<40	68	100	12	105	105	9

Tableau II.2. : Caractéristiques de deux aciers ayant une trempabilité moyenne et forte

II.3.6.5. Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers (tableau II.3)

	Résistance à la traction	Re	A%
Carbone	↗		
Cobalt		↗	
Chrome	↗	↗	↘
Manganèse	↗	↗	↘
Molybdène	↗	↗	
Nickel	↗	↗	↘
Silicium	↗	↗	
Titane	↗	↗	
Tungstène	↗	↗	
Vanadium	↗	↗	

Tableau II.3. : Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques

II.3.6.6. Influence de la vitesse de déformation sur la courbe de traction

Il est bien connu que pour un matériau de composition donnée, la courbe de traction dépend fortement de sa microstructure (écroui, recuit à doux, etc.) et de la température à laquelle l'essai est exécuté. De même la vitesse de traction, qui est à spécifier au début de l'essai, effectue une influence non négligeable sur la courbe de traction (*figure II.19*).

La courbe $\sigma(\epsilon)$ passe, au-delà de la limite d'écoulement plastique, par un niveau d'autant plus haut que la vitesse de déformation est élevée.

La vitesse de déformation recommandée pour un essai standard est de l'ordre de 0.4% par s dans le domaine plastique. Aux alentours de la limite élastique, le taux d'augmentation de la contrainte ne devrait pas dépasser une dizaine de MPa par s.

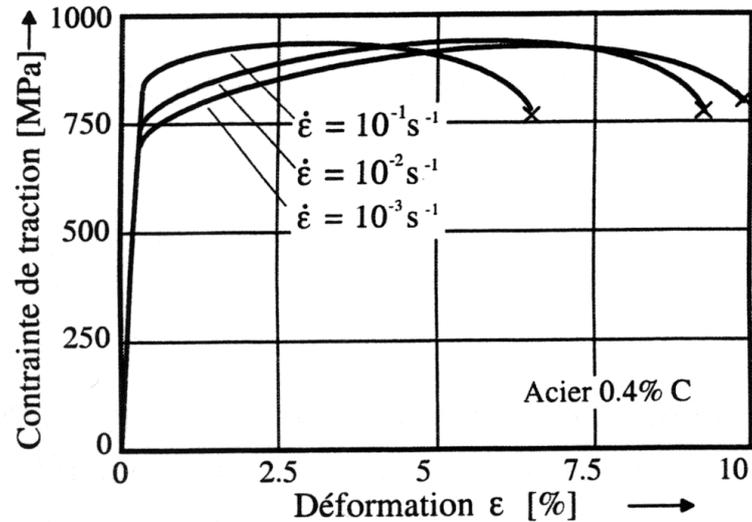


Figure II.19. : Influence de la vitesse de déformation sur la courbe de traction
 Durée de l'essai à $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 100 s et de l'essai à $\dot{\epsilon} = 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 0.7 s

II.3.6.7. Influence de la température sur la ductilité

A des températures plus en plus basses, on constate que $R_{e0,2}$ et R_m augmentent, mais, $A\%$ décroît (figure II.20).

Si l'essai de traction est effectué à une température égale ou inférieure à θ_t , on remarque que $R_{e0,2}$ et R_m ont la même valeur et que $A\%$ est nul, ce qui signifie que le matériau est devenu parfaitement fragile. A des températures plus importantes $R_{e0,2}$ et R_m diminuent et $A\%$ croît. Le matériau a un comportement ductile. La température θ_t est appelée température de transition ductile-fragile (TTDF)

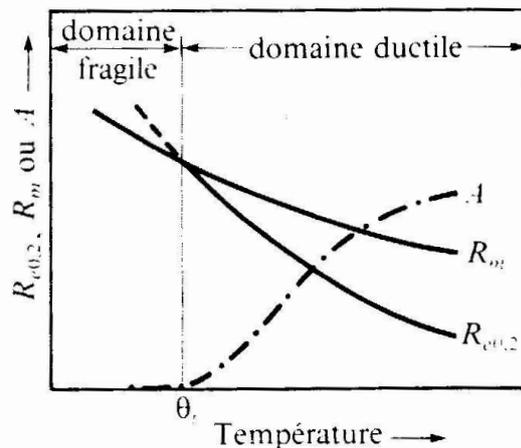


Figure II.20. : Variation de $R_{e0,2}$, R_m et de $A\%$ en de la température de l'essai de traction
 (acier doux 0,1% C)

II.3.6.8. Influence d'une entaille (effet d'entaille)

C'est l'effet d'une déformation située à la racine d'un défaut, d'une entaille mécanique ou d'un changement de section.

On remarque que $R_{e0,2}$ n'est guère influencée par la géométrie. Par contre, R_m est d'autant plus faible que l'entaille est aiguë (*figure II.21*). Cette diminution apparente de la ductilité est due à la concentration et à la triaxialité des contraintes locales engendrées par la présence de l'entaille ; le matériau fait alors preuve d'un comportement fragile à des températures plus élevées que celle pour laquelle cette fragilité (rupture sans déformation plastique généralisée apparente) se manifeste dans une éprouvette lisse. On constate aussi, que plus l'entaille est aiguë, plus la TTDF est élevée.

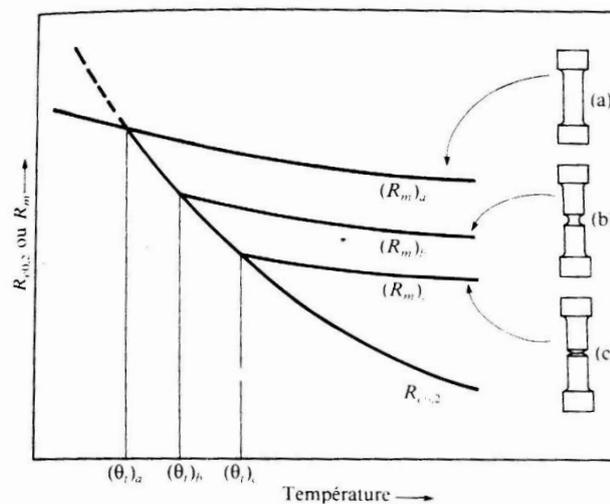


Figure II.21. : Influence d'une entaille (effet d'entaille) sur la variation de R_m en fonction de la température

II.4. Les essais de dureté

II.4.1. Définition de la dureté

La dureté est l'aptitude d'un matériau à résister à la pénétration d'un indentateur (d'un pénétrateur) plus dur.

Le pénétrateur ou indentateur, de forme et de résistance appropriées (sphère, pyramide, cône...) est appliqué progressivement sous l'action d'une force F sur la surface et maintenu pendant un temps précis. Si le matériau est plastiquement déformable, une empreinte de surface latérale S et de profondeur e subsiste après retrait de la charge. La dureté s'exprime

alors par :

$$H \text{ (Hardness)} = \frac{F}{S}$$

Bien qu'homogène à une "contrainte de résistance à la pénétration", la dureté doit être exprimée, selon les normes, comme un nombre sans dimension.



Figure II.22. : Photo d'un duromètre et son pénétrateur

Les essais de dureté sont des essais non destructifs, ils sont réalisés sur la pièce elle-même, et ils ne nécessitent pas la fabrication d'éprouvettes spécifiques. Ce sont des essais simples et rapides et les machines (duromètres) utilisées sont peu coûteuses (figure II.22). Ces essais sont applicables aux alliages métalliques et également aux céramiques.

II.4.2. Dureté Brinell

II.4.2.1. Principe de l'essai (figure II.23)

L'essai de dureté **Brinell** fait appel à une bille en acier trempé ou en carbure de tungstène, maintenue pendant un temps bien défini et avec une force bien déterminée.

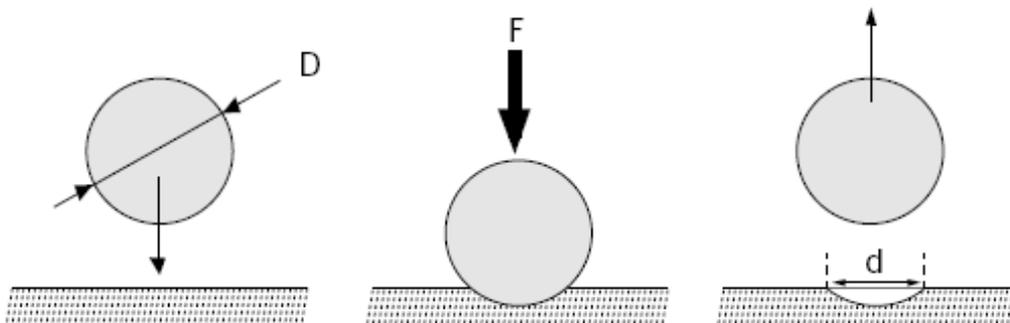


Figure II.23. : Principe de l'essai Brinell

Si F est la charge d'essai (exprimée en Newtons), D le diamètre (en millimètres) de la sphère (de la bille) et d le diamètre (en millimètres) de l'empreinte, la dureté Brinell est donnée par la relation :

$$\left. \begin{aligned} \text{HB} &= \frac{F}{S} \end{aligned} \right\} \text{HB} = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \text{II.17}$$

$$S = \frac{1}{2} \pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

L'essai doit être effectué sur une surface rendue lisse et plane, la préparation de cette surface doit être faite en prenant les précautions nécessaires pour empêcher l'échauffement de cette dernière.

II.4.2.2. Notation

1) Deux symboles sont utilisés pour indiquer une dureté Brinell :

- HBS pour l'essai effectué avec une bille en acier trempé.
- HBW pour l'essai effectué avec une bille en carbure de tungstène.

Des chiffres sont placés devant et derrière ces symboles. Le chiffre qui précède donne la valeur de la dureté. Les trois chiffres placés derrière le symbole indiquent les conditions de l'essai. Le premier donne le diamètre de la bille en mm (tableau II.4). Le second indique la valeur de la charge en N (tableau II.4). Enfin, le troisième et dernier chiffre donne la durée de maintien de la charge (en s).

Exemple 1 : 350 HBS 5/7350/20 correspond à une dureté Brinell de 350 mesurée avec une bille en acier de 5 mm de diamètre, sous une charge de 7350 N (ou encore 350 HBS 5/750/20, sous une charge de 750 kgf) maintenue pendant 20 secondes.

Exemple 2 : 600 HBW 1/294/20 correspond à une dureté Brinell de 600 mesurée avec une bille en carbure de tungstène de 1 mm de diamètre, sous une charge de 294 N (ou 600 HBW 1/30/20, sous une charge de 30 kgf) maintenue pendant 20 secondes.

2) Si aucun chiffre ne figure derrière le symbole HBS ou HBW, cela signifie que l'essai a été réalisé dans des conditions "normales", c'est-à-dire avec une bille de 10 mm de diamètre et sous une charge de 29400 N appliquée pendant 10 à 15 s. Exemple, 400 HB.

F (N)	D (mm)
29400 (3000 kgf)	10
7350	5
4704	4
2646	3
1837,5	2,5
1176	2
294 (Cas des aciers)	1

Tableau II.4. : Charges *F* à appliquer dans l'essai Brinell selon le diamètre *D* des billes

II.4.2.3. Détermination de la dureté Brinell

La dureté Brinell est déterminée :

1) soit des tableaux établis d'avance pour les différentes valeurs de d (diamètre de l'empreinte) (tableau II.5).

d [mm]	HB [N/mm ²]	d [mm]	HB [N/mm ²]	d [mm]	HB [N/mm ²]
2	9460	3,5	3020	5	1430
2,5	6000	4	2280	5,5	1160
3	4180	4,5	1790	6,0	950

Tableau II.5. : Détermination de la dureté Brinell pour différentes valeurs de d

2) soit à partir de la formule II.17, à savoir que :

- le diamètre de l'empreinte d est déterminé à l'aide d'un microscope à oculaire micrométrique,
- la charge F est fonction du diamètre de la bille (D) donnée par le tableau II.6.

Diamètre D en [mm]	Charge F exprimée en [N]			
	$F = 300D^2$	$F = 100D^2$	$F = 50D^2$	$F = 20D^2$
1	300	100	50	20
2,5	1875	625	312,5	125
5	7500	2500	1250	500
10	30000	10000	5000	2000

Tableau II.6. : Charges F est fonction du diamètre de la bille D

Les conditions d'emploi des différentes charges sont donnés par le tableau II.7.

Charge	Métaux et alliages
$300D^2$	Aciers et fontes
$100D^2$	Laiton, bronze, alliages légers spéciaux
$50D^2$	Cuivre, zinc et alliages
$20D^2$	Etain et plomb

Tableau II.7. : Choix des charges F est fonction des métaux et des alliages testés

II.4.3. Dureté Rockwell

II.4.3.1. Principe de l'essai (figure II.24)

Simple d'utilisation, les duretés Rockwell font appel à deux types de pénétrateurs :

- Le premier est un cône en diamant d'angle au sommet 120° , à pointe arrondie sphérique (rayon de 0,2 mm).

– Le second est une bille en acier trempé, polie, de diamètre 1,59 mm ou 3,18 mm (figure II.24).

Pour réaliser un essai Rockwell, il est préférable de travailler sur des surfaces présentant un fini satisfaisant, exemptes de rayures.

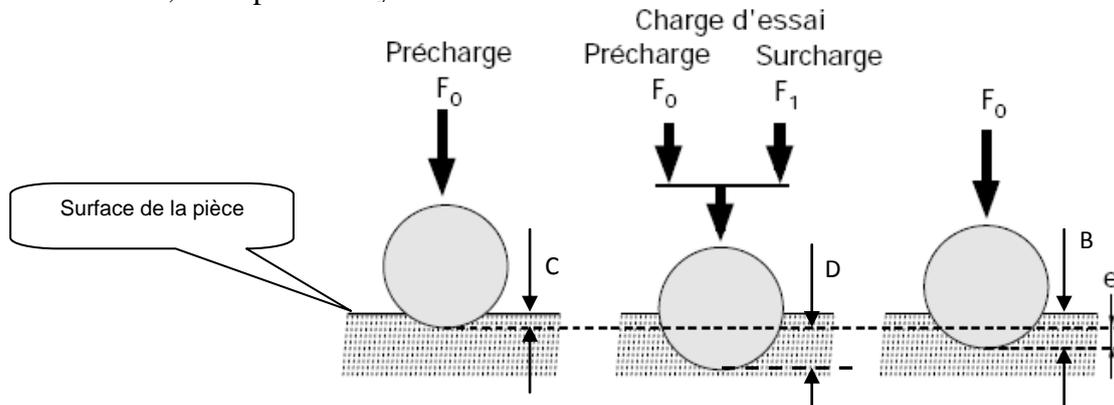


Figure II.24. : Principe de l'essai de dureté Rockwell

L'essai se ramène à une mesure de longueur de l'enfoncement rémanent e (ou l'accroissement rémanent de la profondeur de pénétration) du pénétrateur sous la charge initiale après enlèvement de la surcharge.

La procédure d'essai comporte trois étapes :

1ère étape: prise d'une origine de mesure

Tout d'abord, le pénétrateur est mis en contact avec la surface du matériau à mesurer. Une précharge F_0 de 100 N (cas d'un pénétrateur en bille ou en cône) lui est appliquée et l'indicateur d'enfoncement est mis à zéro.

2ème étape: réalisation de l'empreinte

La deuxième étape consiste à appliquer une surcharge F_1 permettant d'atteindre la charge d'essai.

3ème étape: lecture de la dureté

La dernière étape consiste à retirer la surcharge (mais laisser la précharge) et de lire la valeur de l'enfoncement.

II.4.3.2. Notation

La combinaison de divers pénétrateurs et de diverses charges conduit à utiliser plusieurs échelles Rockwell, symbolisées par HR suivi d'une lettre. Deux sont plus particulièrement utilisées :

– **Echelle Rockwell C (HRC).** Le pénétrateur est un cône de diamant auquel est appliqué une charge d'essai de 1500 N (ce qui donne une surcharge de $F_1 = 1400$ N). Cette échelle est destinée aux métaux durs ayant une résistance supérieure à 1000 N/mm^2 .

La dureté Rockwell est désignée par le symbole HR précédé de la valeur de dureté et suivi de l'échelle utilisée. Par exemple, une 85 HRC correspond à une dureté de 85 exprimée dans l'échelle C de Rockwell.

– **Echelle Rockwell B (HRB).** Le pénétrateur est ici une bille d'acier de 1,6 mm de diamètre soumise à une charge de 1000 N ((ce qui donne une surcharge de $F_1 = 900$ N). Cette échelle est utilisée pour mesurer les aciers dont la résistance est comprise entre 340 et 1000 N/mm^2 .

Il existe aussi les échelles HRE (bille de 3,18 mm de diamètre, charge de 1000 N) et HRF (bille de 1,59 mm de diamètre, charge de 600 N).

II.4.3.3. Détermination de la dureté Rockwell

La dureté Rockwell est déterminée de 2 façons :

- 1) les duretés correspondantes sont lues directement sur le cadran de la machine gradué en unités Rockwell. Une unité Rockwell (chaque division du comparateur) correspond à un enfoncement (un déplacement du pénétrateur) de 0,002 mm.
- 2) Ou bien, en déterminant l'enfoncement e en millimètres du pénétrateur,

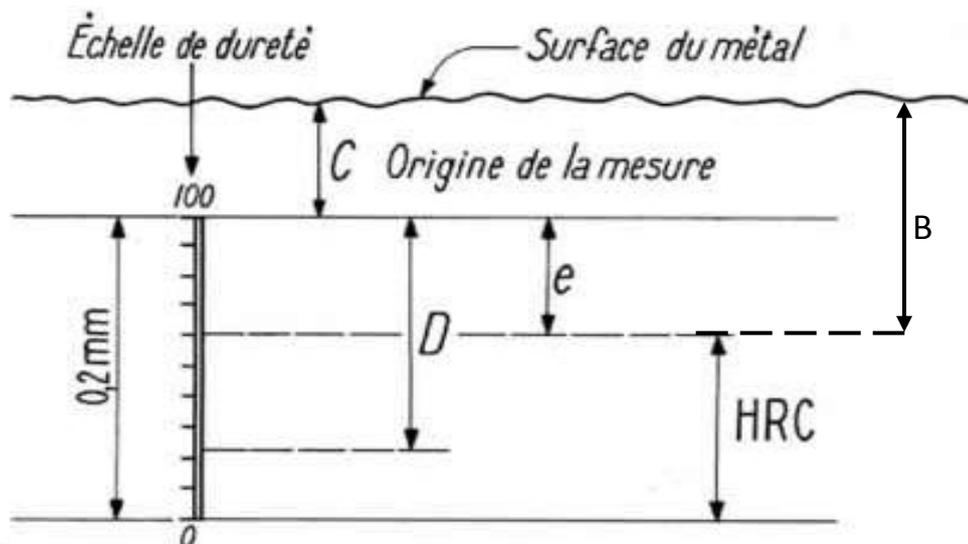


Figure II.25. : Calcul de l'accroissement rémanent de la profondeur de pénétration

L'accroissement rémanent de la profondeur de pénétration (figure II.25) est égal :

$$e = B - C$$

La dureté Rockwell est donnée par les relations :

$$HR = 100 - 5 \cdot 10^2 e \text{ (Rockwell C)} = \text{HRC} \quad \text{II.19}$$

$$HR = 130 - 5 \cdot 10^2 e \text{ (Rockwell B, E et F)} = \text{HRB} \quad \text{II.20}$$

Remarque

La dureté Rockwell peut être étendue aux faibles charges pour, par exemple, réaliser des essais sur des produits minces. Il existe notamment les échelles HRN et HRTB elles-mêmes divisées en trois sous-échelles précisant la charge appliquée (exprimée en kgf) :

- Echelle HRN : le pénétrateur est une bille d'acier de 1,6 mm de diamètre (comme pour HRB), et la charge appliquée est ici de 150 N (HR15N), 300 N (HR30N) ou 450 N (HR45N).
- Echelle HRT : le pénétrateur est un cône de diamant (comme pour HRC), et la charge appliquée ici est de 150 N (HR15T), 300 N (HR30T) ou 450 N (HR45T).

Pour ces échelles HRN et HRT, la dureté Rockwell est donnée par la relation :

$$HR = 100 - e \quad \text{II.21}$$

où e est bien sûr l'enfoncement, exprimé ici en μm . Une unité Rockwell HRN ou HRT correspond donc à un enfoncement de 1 μm .

II.4.4. Dureté Vickers

II.4.4.1. Principe de l'essai (figure II.26)

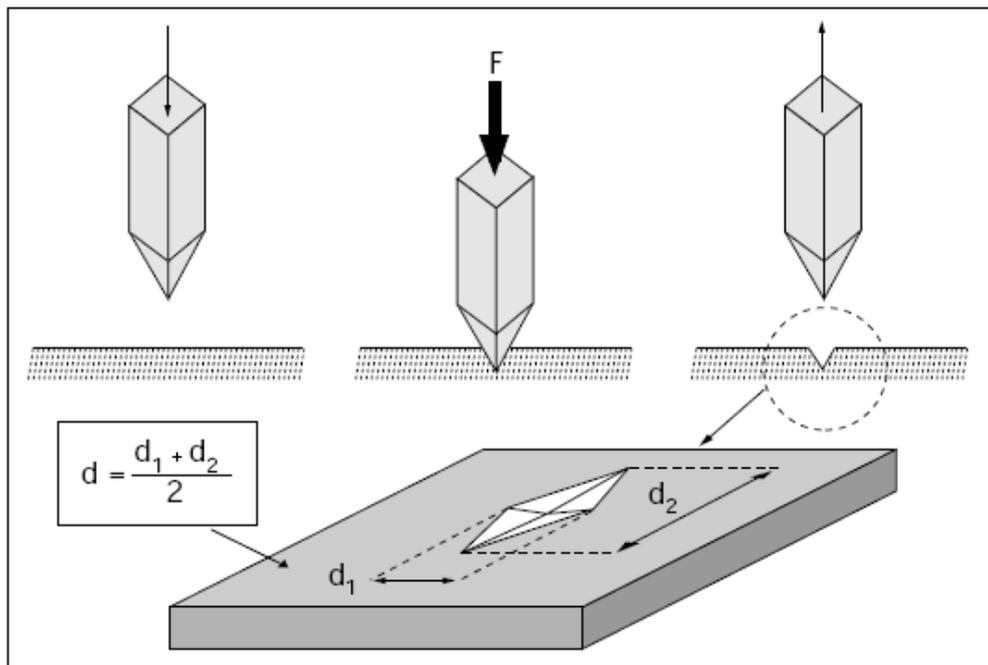


Figure II.26. : Principe de l'essai de dureté Vickers

Le principe de l'essai de dureté Vickers est le même que celui de l'essai Brinell, mais le pénétrateur est ici une pyramide en diamant à base carrée d'angle au sommet 136 °, appliquée avec une force F de 50 à 1000 N. On mesure la longueur d moyenne des deux diagonales de l'empreinte, à l'aide d'un système optique approprié. La dureté Vickers HV est donnée par la relation suivante :

$$HV = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2} \quad \text{II.22}$$

où F est exprimée en N, et d en mm.

II.4.4.2. Notation

La formulation d'une dureté Vickers est assez proche de celle de la dureté Brinell. A gauche du symbole HV se trouve un chiffre donnant la valeur de la dureté. A droite du symbole HV peuvent figurer jusqu'à deux chiffres. Le premier donne la valeur de la charge d'essai (en Newtons). Le second donne la durée (en secondes) d'application de la charge.

Par exemple, l'expression 640 HV 500/20 signifie que la dureté Vickers de 640 a été obtenue en appliquant une charge de 500 N (ou encore 640 HV 50/20, 50 kgf) pendant 20 secondes.

Lorsque la durée d'application de la charge est de 10 à 15 secondes, elle n'est pas précisée.

Par exemple, l'expression 640 HV 300 signifie que la dureté Vickers 640 a été déterminée sous une charge de 300 N (640 HV 30, 30 kgf) appliquée pendant 10 à 15 secondes.

La dureté Vickers peut être étendue aux faibles charges. Pour une charge de 2 à 50 N (HV0,2 à HV5) on parle d'essai de **dureté Vickers sous charge réduite**. Pour des charges inférieures à 2 N (HV0,2 et en dessous), on parle **d'essai de microdureté Vickers**.

II.4.5. Correspondances approximatives de quelques indices de dureté entre eux et avec Rm (tableau II.8) et comparaison entre ces méthodes (figure II.27)

(Tableau d'après la norme allemande DIN 50-150)

HV	HB	HRC	Rm	HV	HB	HRC	Rm	HV	HB	HRC	Rm	HV	HB	HRC	Rm
				155	147		495	230	219		740	310	295	31,0	995
				160	152		510	235	223		755	320	304	32,2	1030
90	85		285	165	156		530	240	228	20,3	770	330	314	33,3	1060
95	90		305	170	162		545	245	233	21,3	785	340	323	34,4	1095
100	95		320	175	166		560	250	236	22,2	800	350	333	35,5	1125
				180	171		575	255	242	23,1	820	360	342	36,6	1155
				185	176		595	260	247	24,0	835	370	352	27,7	1190
				190	181		610	265	252	24,8	850	380	361	28,8	1220
				195	185		625	270	257	25,6	865	390	371	39,8	1255
				200	190		640	275	261	26,4	880	400	380	40,1	1290
				205	195		660	280	266	27,1	900	410	390	41,8	1320
				210	199		675	285	271	27,8	915	420	400	42,7	1350
				215	204		690	290	276	28,5	930	430	410	43,6	1385
				220	209		705	295	280	29,2	950	440	418	44,5	1420
				225	214		720	300	285	29,8	965	450	428	45,3	1455

Tableau II.8. : Correspondances approximatives de quelques indices de dureté entre eux et avec Rm

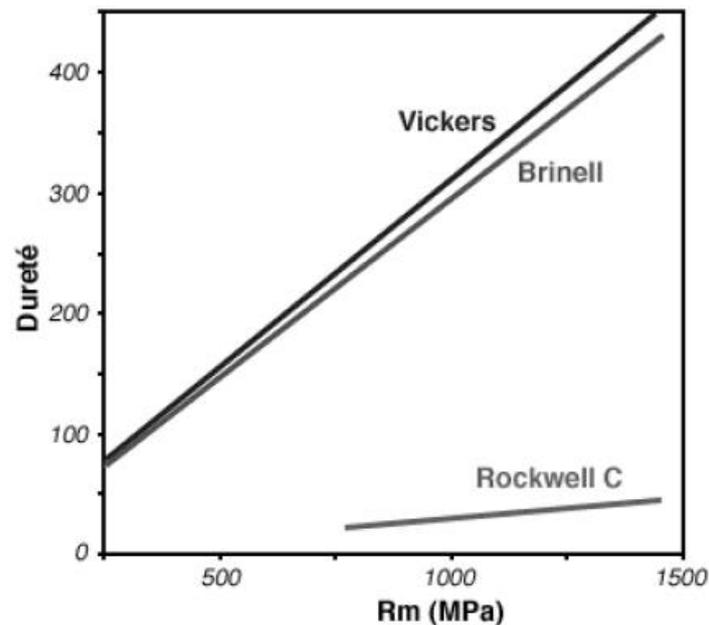


Figure II.27. : Comparaison entre les duretés HB, HRC et HV

Le tableau II.9 donne une comparaison entre les méthodes par pénétration concernant la préparation des pièces à testées et l'utilisation principale de ces méthodes en atelier ou en laboratoire.

Type d'essai	Préparation de la pièce	Utilisation principale	Commentaire
Brinell	La surface de la pièce ne nécessite pas une préparation extrêmement soignée (tournage)	En atelier	La méthode ayant la mise en œuvre la plus facile des trois méthodes.

	ou meulage).		
Rockwell	Bonne préparation de surface (au papier de verre 00 par exemple). La présence de rayures donne des valeurs sous estimées.	En atelier	L'essai est simple et rapide. Convient bien pour des duretés plus élevées (supérieures à 400 Brinell). Elle est plutôt utilisée pour les petites pièces (il est nécessaire que la pièce soit parfaitement stable). La dureté Rockwell présente l'inconvénient d'avoir une dispersion relativement importante.
Vickers	État de surface très soigné (on obtient de petites empreintes, la présence d'irrégularité gêne la lecture).	En laboratoire	C'est un essai assez polyvalent qui convient aux matériaux tendres ou très durs. Il est utilisé généralement pour des pièces de petites dimensions. La lecture des longueurs de diagonale est généralement lente.

Tableau II.9. : Comparaison entre les méthodes par pénétration

II.4.6. D'autres méthodes

II.4.6.1. Dureté Shore

La **dureté Shore** est une mesure par **rebondissement**. Une masse de forme sphérique, plus dure que le matériau à tester, tombe d'une hauteur déterminée normalement à la surface. La hauteur de rebondissement, exprimée en % de la hauteur de départ, est d'autant plus importante que le métal est dur (peu d'énergie absorbée par la déformation plastique). Cette mesure est utilisée aussi dans le domaine des élastomères. Aucune normalisation n'existe.

II.4.6.2. Dureté Knoop (HK)

Pour l'obtenir, le pénétrateur utilisé est une forme de pyramide à base losange très allongée. L'angle au sommet dans le sens de la grandeur diagonale est de $172^{\circ}30'$ et l'angle transversal de 130° . La mesure porte sur la grande diagonale D imprimée (en mm) par une force F exprimée en Newtons (*figure II.28*).

$$HK = 14,23 \cdot \frac{F}{D^2} \quad \text{II.23}$$

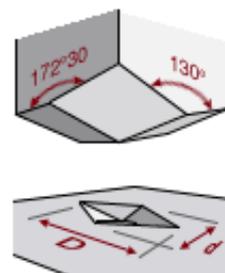


Figure II.28. : Pénétrateur Knoop et mesure de D .

L'essai de Knoop permet la mesure de dureté des matériaux fragiles comme le verre et la céramique (tableau II.10).

Matériau	Dureté Knoop (HK)
diamant (C)	8000
nitrure de bore (BN)	4500
carbure de silicium (SiC)	2700
alumine (Al ₂ O ₃)	2500

Tableau II.10. : Dureté Knoop pour quelques céramiques

II.4.6.3. Dureté Mohs

Une échelle de duretés relatives concernant les minéraux est utilisée (tableau II.11). Chaque minéral se voit attribué un indice entre 1 (talc) et 10 (diamant) : chaque minéral de l'échelle "raye" celui qui se trouve immédiatement en dessous de lui dans l'échelle (et a fortiori les autres).

Dureté	Minéral	
1	Talc	Très fragile
2	Gypse	se raye à l'ongle
3	Calcite	Fragile
4	Fluorite	se raye par le cuivre
5	Apatite	Moyennement dur
6	Orthoclase	se raye par le verre ou l'acier
7	Quartz	Dur
8	Topaze	
9	Corindon	Très dur
10	Diamant	

Tableau II.11. : Échelle de duretés adoptée pour mesurer la dureté Mohs

Une comparaison des duretés en fonction de certains matériaux est donnée à la figure II.29.

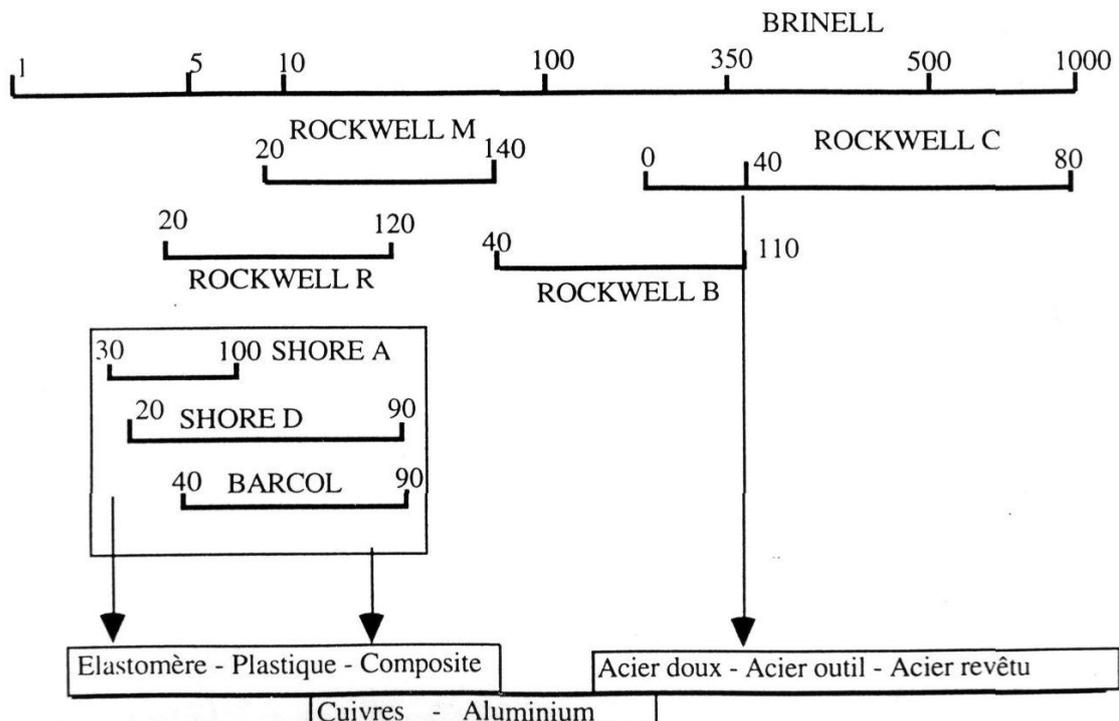


Figure II.29. : Comparaison des duretés en fonction de quelques matériaux

II.4.7. Corrélations entre la dureté et les caractéristiques de traction

II.4.7.1. Première relation

Modèle de TABOR : $HV = 3 \sigma_{8\%}$

II.24

$\sigma_{8\%}$: contrainte correspondant à une déformation plastique de 8%

II.4.7.2. Deuxième relation

$HV = 0,3.R_m$ (cas des aciers)

II.25

II.4.7.3. Troisième relation (figure II.30)

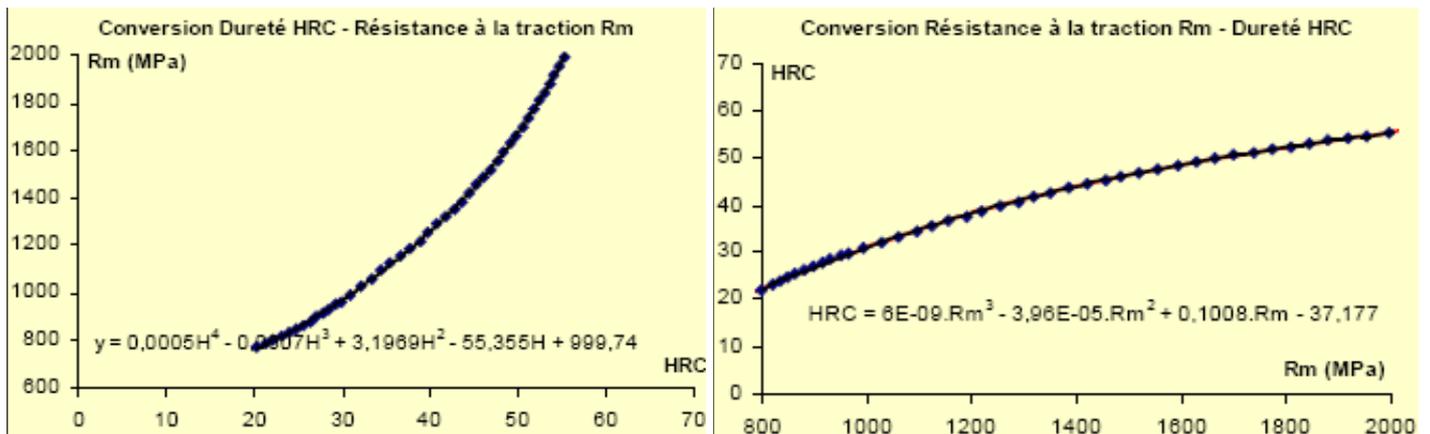


Figure II.30. : Corrélation entre la dureté HRC et la résistance à la traction R_m

4.5.4. Quatrième relation

On constate expérimentalement et dans le cas des aciers que :

$$R_m = C HB$$

II.26

Avec $C = 0,362$ pour $HB < 175$

$C = 0,344$ pour $HB > 175$

II.4.8. Exemples de variation de la dureté

II.4.8.1. En fonction de la température (figure II.31)

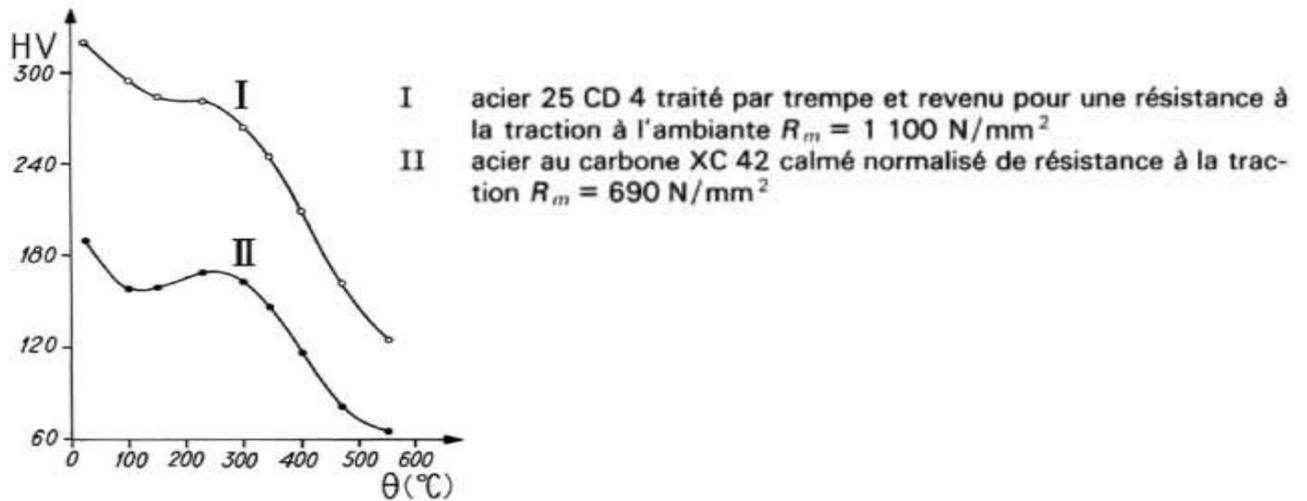


Figure II.31. : Variation de la dureté Vickers HV_{10} en fonction de la température d'essai θ pour deux aciers

II.4.8.2. En fonction de la distance à la surface (trempabilité)

La figure II.32 illustre le résultat de la trempe dans la masse de deux aciers. On remarque que l'écart de dureté entre le cœur et la surface du 35CrMo4 est plus faible que celui du C50. On peut conclure que le 35CrMo4 a une meilleure trempabilité que le C50. Le chrome est un élément d'addition qui améliore la trempabilité des aciers.

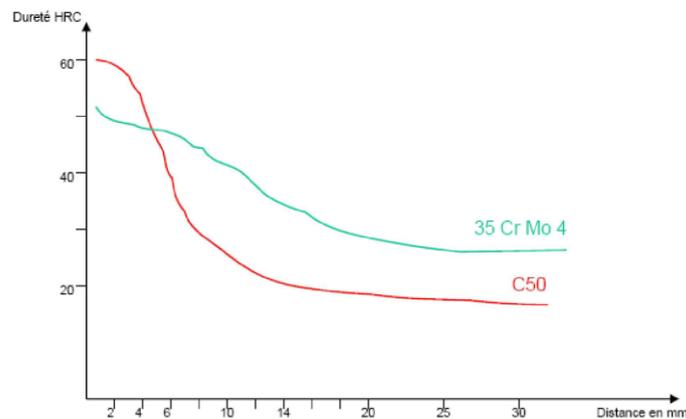


Figure II. 32. : Trempe dans la masse de deux aciers

II.5. La résilience

II.5.1. Conditions d'essai

L'essai de rupture sous choc (essai de résilience) consiste à rompre une éprouvette entaillée par un choc. Il permet de tester le matériau dans des conditions de fragilisation :

- vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$ élevée ;
- concentrations de contrainte (éprouvette entaillée) ;
- diverses conditions de température : comme c'est un essai rapide, l'éprouvette n'a pas le temps de refroidir ni de se réchauffer.

II.5.2. Appareil d'essai

L'appareil d'essai est appelé « mouton CHARPY » (figure II.33) : un balancier se terminant par un « marteau », appelé « couteau », est lâché d'une certaine hauteur (correspondant à une énergie de départ $W_0 = 300 \text{ J}$) et vient frapper l'éprouvette. Le balancier remonte moins haut que sa hauteur de lâcher ce qui permet de déterminer l'énergie K_C absorbée par la rupture de l'éprouvette : c'est la perte d'énergie mécanique $\Delta E = W$:

$$W = \Delta E = mg \cdot \Delta h = W_0 - W_1 = W = P (h_0 - h_1) \quad \text{II.27}$$

Où :

- m est la masse du balancier+couteau ;
- g est l'accélération de la gravité ($9,81 \text{ m/s}^2$) ;
- Δh est la perte d'altitude.

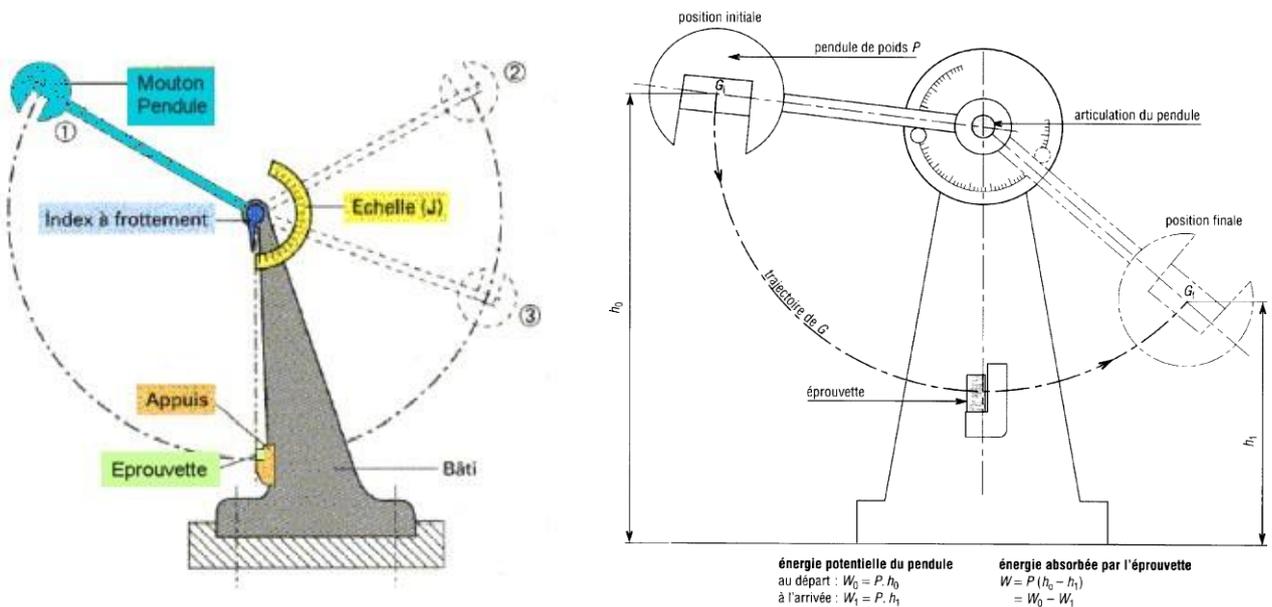


Figure II.33. : Mouton CHARPY, Machine d'essai de résilience

II.5.3. Principe de l'essai

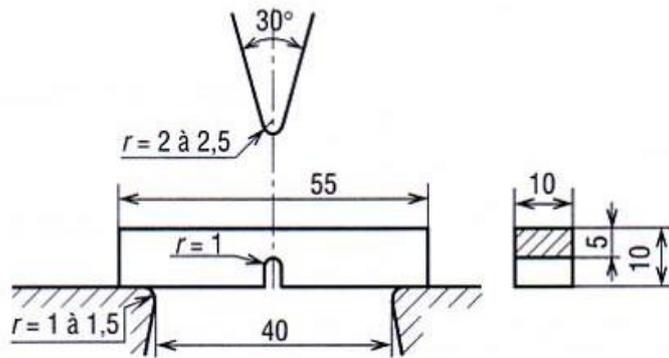
L'essai de résilience consiste à rompre brutalement une éprouvette et mesure l'énergie qui provoque la rupture en flexion de cette éprouvette entaillée en U ou V (figure II.34). La résilience est caractérisée par l'expression suivante :

$$K_C = \frac{\text{Energie nécessaire pour rompre l'éprouvette (l'énergie absorbée par l'éprouvette)}}{\text{Section rompue}} \quad \left(\frac{\text{J}}{\text{cm}^2} \right)$$

II.28

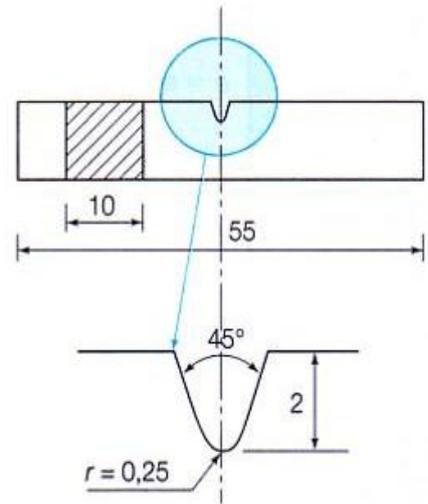
On l'appelle K_{CU} si l'éprouvette est entaillée en U, et K_{CV} si elle est entaillée en V.

• KCU

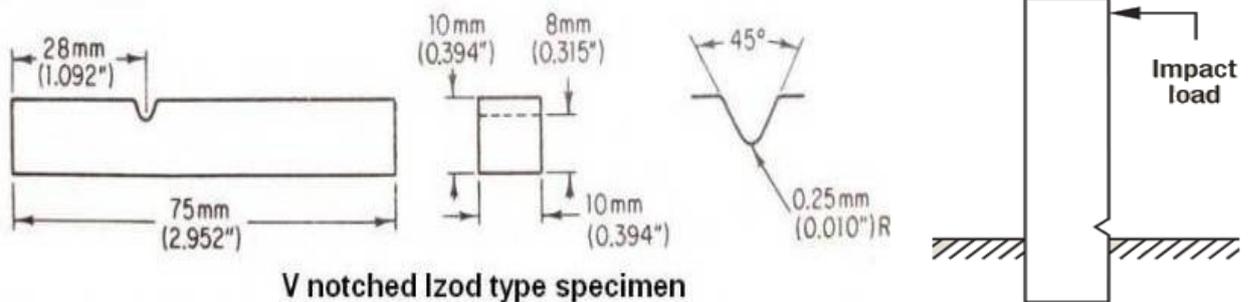


- Éprouvette carrée 10 × 10, longueur 55 cm.
- Écartement des appuis 40 mm.
- Profondeur de l'entaille 5 mm.
- Section rompue 0,5 cm².

• KCV



" Essai de Charpy "



" Essai Izod "

Figure II.34. : Éprouvette Charpy entaillée en U et en V et Izod

L'essai de **résilience** (essai Charpy) permet de déterminer la température de transition d'un matériau qui sépare la rupture ductile, à énergie élevée, et la rupture fragile du type clivage, de faible énergie (figure II.35).

Les ruptures ductiles sont fibreuses, tourmentées (déformation plastique) caractérisées par un pliage de l'éprouvette avant rupture (figure II.36) ; les ruptures fragiles sont plates ou cristallographiques et il n'y a pas de pliage de l'éprouvette avant la rupture (figure II.37).

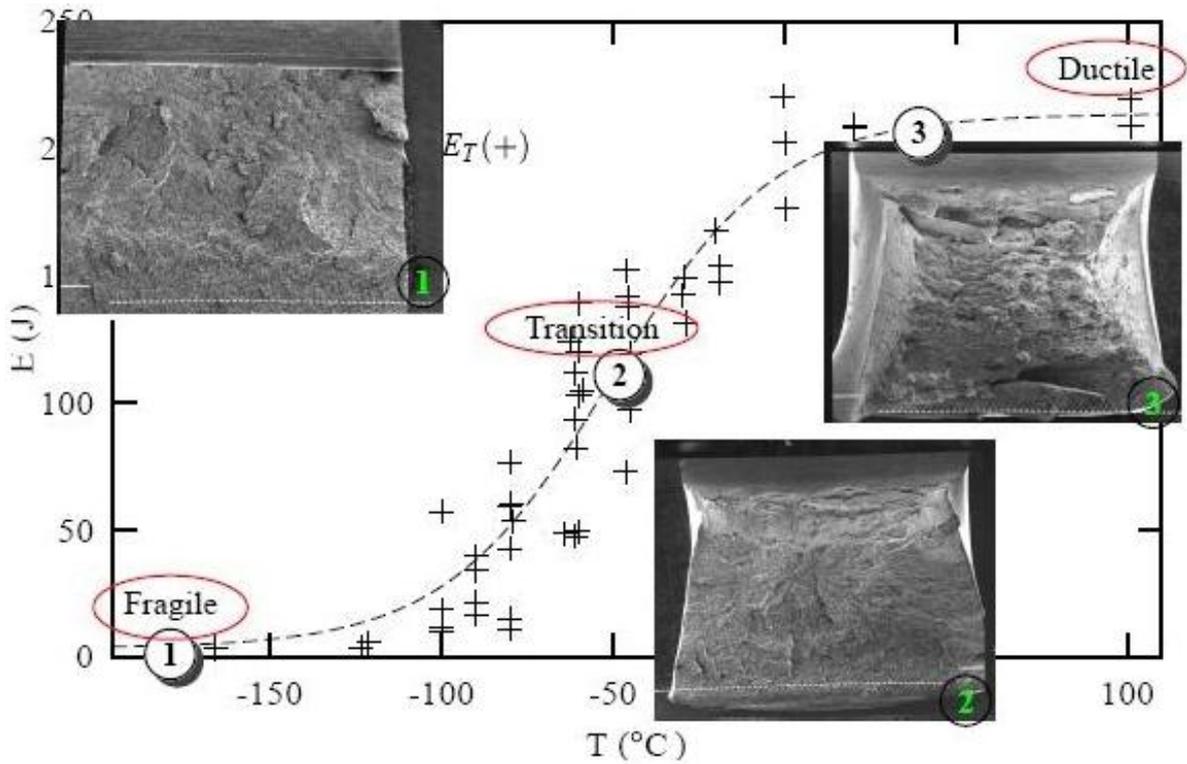


Figure II.35. : Courbe de transition de la résilience fragile/ductile avec facies de rupture



Figure II.36. : Rupture ductile. Pliage avant rupture



Figure II.37. : Rupture fragile. Il n'y a pas de pliage avant la rupture

La figure II.38 donne des exemples de courbes de transition pour quelques matériaux.

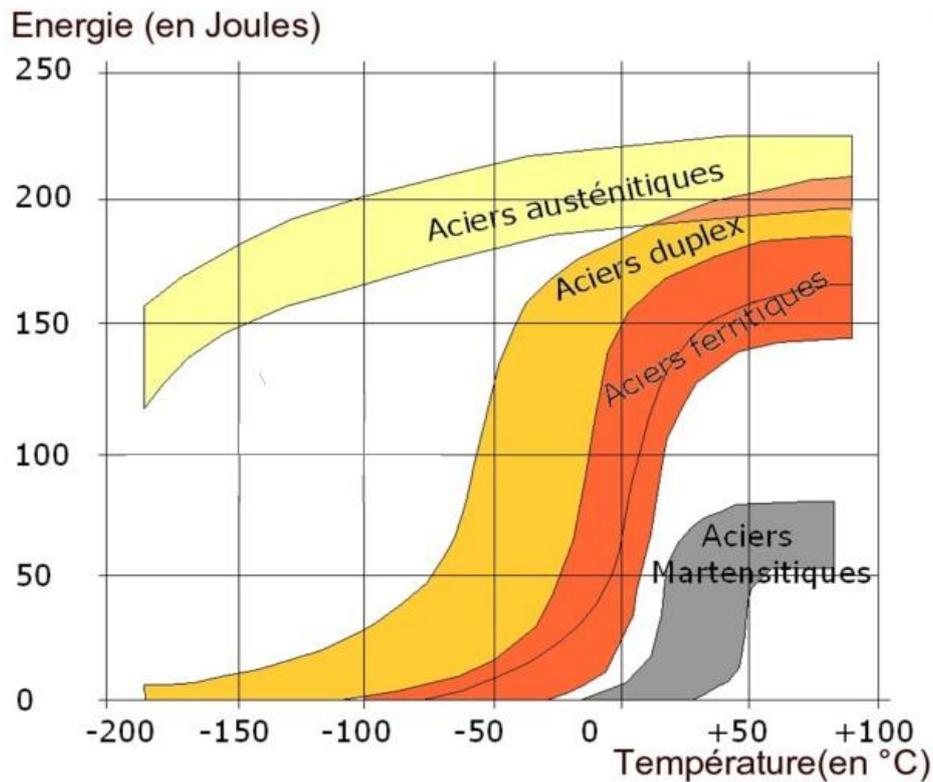


Figure II.38. : Évolution de la résilience en fonction des températures pour quelques matériaux

II.6. Variabilité des propriétés des matériaux

Généralement, les données fournies par des éprouvettes d'un même matériau présentent une certaine dispersion ou une certaine variabilité. Les divergences des résultats résultent des incertitudes dans les mesures, qui sont liées à un grand nombre de facteurs, à savoir : la méthode d'essai, les variations des procédés de fabrication des éprouvettes, les erreurs de l'opérateur, l'étalonnage de l'appareil de mesure et les inhomogénéités de la composition chimique par exemple dans un même lot de matériaux.

Pour atténuer le problème de dispersion et de variabilité des propriétés des matériaux, les données sont traitées statistiquement ou selon les règles de probabilité, en déterminant par exemple :

La moyenne arithmétique : $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$

II.29

Et l'écart type : $\sigma = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \right]^{1/2}$