

OFPPT

ROYAUME DU MAROC

مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل

Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail

DIRECTION RECHERCHE ET INGENIERIE DE FORMATION

**RESUME THEORIQUE
&
GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES**

**MODULE N°: 9 RESISTANCE DES
MATERIAUX**

SECTEUR : ELECTROTECHNIQUE

**SPECIALITE : MAINTENANCE DES
MACHINES OUTILS ET
AUTRES MACHINES DE
PRODUCTION
AUTOMATISEES**

NIVEAU : TECHNICIEN SPECIALISE

ANNEE 2007

Document élaboré par :

Nom et prénom

EFP

DR

KISSIOVA-TABAKOVA
Raynitchka

CDC Génie
Electrique

DRIF

Révision linguistique

-
-
-

Validation

-
-
-

SOMMAIRE

Présentation du Module.....	6
RESUME THEORIQUE.....	7
1. DEFINITION DES NOTIONS.....	8
1.1. But et nécessité de la résistance des matériaux.....	8
1.2. Notion de statique et de contraintes.....	9
1.2.1. Forces.....	9
1.2.2. Moments de forces.....	12
1.2.3. Actions et réactions.....	15
1.2.4. Equilibre d'un solide.....	15
1.2.5. Moment statique et moment d'inertie d'une surface plane.....	16
1.2.6. Contraintes normales dans une section droite.....	22
1.2.7. Principales hypothèses de la résistance des matériaux.....	24
1.2.8. Contraintes admissibles. Coefficient de sécurité.....	27
1.3. Conditions de résistance aux différentes sollicitations.....	28
1.3.1. Traction simple et compression simple.....	28
1.3.2. Contraintes tangentielle de cisaillement.....	35
1.3.3. Contrainte tangentielle et angle unitaire de torsion.....	40
1.3.4. Contrainte normale et déformation. Flexion.....	47
1.4. Essais mécaniques.....	58
1.4.1. Définitions préliminaires.....	58
1.4.2. Essai de traction.....	59
1.4.3. Essai de résilience NF EN 10045 - 1.....	64
1.4.4. Essai de dureté.....	65
1.4.5. Essai de fluage.....	71
1.4.6. Essai de fatigue ou d'endurance.....	71
1.4.7. Extensométrie électrique, photoélasticité, vernis craquelants.....	75
2. TRAITEMENT THERMIQUE DES METAUX.....	78
2.1. Identification des différents traitements thermiques.....	79
2.1.1. Traitements d'équilibre.....	79
2.1.2. Traitements hors d'équilibre.....	79
2.1.3. Traitements thermiques modernes.....	80
2.2. Traitements thermiques des aciers.....	80
2.2.1. Durcissement par trempe.....	81
2.2.2. Revenu.....	86
2.2.3. Recuit NF A 02-010.....	86
2.3. Traitements thermiques des alliages d'aluminium (HF A 02-011).....	88
2.3.1. Trempe structurale.....	88
2.3.2. Recuit.....	89
2.4. Traitements de surface.....	89
2.4.1. Traitements mécaniques.....	89
2.4.2. Traitements thermochimiques de diffusion et d'apport (NF A 91-460).....	91
2.4.3. Traitement de conversion (NF A 91-010).....	93
2.4.4. Revêtement métallique (NF A 91-010).....	95
2.4.5. Symbolisation.....	97
2.4.6. Peinture (NF T 30-001).....	98
2.4.7. Revêtement plastique (« Peinture » en poudre) (NF T 58-100).....	98

<i>GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES</i>	99
TRACTION ET COMPRESSION.....	100
TP1 – Remorquage d’un véhicule	100
TP 2 – Etude d’une enveloppe cylindrique mince.....	103
CISAILLEMENT.....	108
TP3 – Calcul des nombres de rivets.....	108
TP4 – Dimensionnement des assemblages mécano soudés	110
FLEXION PLANE SIMPLE	112
TP5 – Calcul d’une poutre soumise à des efforts concentrés.....	112
TP6 – Calcul d’une poutre soumise à des charges réparties.....	114
TORSION	116
TP7 – Calcul des nombres de rivets.....	116
<i>EVALUATION DE FIN DE MODULE</i>	117
<i>Liste des références bibliographiques</i>	122

MODULE : 9

RESISTANCE DES MATERIAUX

Durée : 35 heures

**OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU
DE COMPORTEMENT**

COMPORTEMENT ATTENDU

Pour démontrer sa compétence le stagiaire doit **appliquer les notions des résistances des matériaux** selon les conditions, les critères et les précisions qui suivent.

CONDITIONS D'EVALUATION

- A) Individuellement
- B) A partir de
 - de plan, de croquis et des données;
 - d'un cahier des charges ;
 - des documents et données techniques ;
 - de maquettes et pièces existantes ;
 - de consignes et directives
 - des études de cas
 - d'un système mécanique
- C) À l'aide :
 - d'une calculatrice (éventuellement un logiciel de calcul)
 - de formulaires, abaques et diagrammes

CRITERES GENERAUX DE PERFORMANCE

- D) Démarche méthodique de travail
- E) Précision et exactitude des calculs
- F) Respect des hypothèses et des principes de la RDM
- G) Respect du cahier des charges et les contraintes de fonctionnement
- H) Analyse de la valeur
- I) Argumentation et justification des différents choix
- J) Traçabilité du travail et notes de calculs

**OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU
DE COMPORTEMENT**

**PRECISIONS SUR LE
COMPORTEMENT ATTENDU**

A) *Utiliser des méthodes de calcul de la résistance des matériaux pour pouvoir déterminer les conditions de résistances aux différentes sollicitations mécaniques appliquées à des systèmes industriels*

B) *Effectuer le traitement thermique des métaux*

C) *Effectuer les procédés de contrôle d'atelier*

**CRITERES PARTICULIERS DE
PERFORMANCE**

- ✓ *Compréhension professionnelle de l'utilité et la nécessité des calculs de la résistance des matériaux.*
- ✓ *Détermination exacte de la forme de la sollicitation et calcul juste des conditions de résistance.*
- ✓ *Participation efficace aux différents essais mécaniques.*

- ✓ *Influence des procédés du traitement technique sur les caractéristiques mécaniques des métaux.*

- ✓ *Procédés de contrôle pouvant être effectués dans l'atelier pour examiner les caractéristiques, l'état et l'utilité des matériaux*

Présentation du Module

« **Résistance des matériaux** » est le module qui donne aux stagiaires de la spécialité « Maintenance des machines outils et autres machines de production automatisée » les notions de base des méthodes de calcul de la résistance des matériaux que le stagiaire retrouvera ultérieurement dans la réalisation des projets industriels. L'objectif de ce dernier est non seulement d'informer le stagiaire sur la matière mais aussi de lui proposer la suite adéquate des consignes à suivre afin d'obtenir des habilités durables au calcul, au bon usage des procédés de traitement thermique des métaux et aux procédés de contrôle d'atelier.

***Module 9 : RESISTANCE DES
MATERIAUX***

RESUME THEORIQUE

1. DEFINITION DES NOTIONS

1.1. But et nécessité de la résistance des matériaux

La résistance des matériaux a pour but de donner à l'auteur d'un projet tous les éléments nécessaires pour réaliser du premier coup, et le plus économiquement, une construction stable.

C'est une science qui s'appuie évidemment sur la mécanique, et en particulier la statique. Mais, si la statique ne considère que les forces extérieures appliquées aux systèmes étudiés, la résistance des matériaux, au contraire, pénètre à l'intérieur des systèmes, pour étudier les forces élémentaires appliquées à chaque élément de la matière, et partant, des déformations qui en résultent. Car, justement, aucun solide n'est strictement indéformable. Sans parler spécialement de la dilatation des corps lors d'une augmentation de température, le lecteur a en mémoire la planche qui plie sous une charge, le fil qui s'allonge sous un effort de traction, etc.

Toutefois, si la charge n'est pas trop importante, la planche qui plie, le fil qui s'allonge, ne se rompent pas pour autant : c'est qu'il s'établit à la fois un équilibre extérieur (déterminé par la statique) et un équilibre intérieur des liaisons entre les éléments du corps solide (déterminé justement par la résistance des matériaux). Cet équilibre intérieur nous amène à définir la notion de contraintes.

La résistance des matériaux a trois objectifs principaux :

- la connaissance des caractéristiques mécaniques des matériaux. (comportement sous l'effet d'une action mécanique) ;
- l'étude de la résistance des pièces mécaniques (résistance ou rupture) ;
- l'étude de la déformation des pièces mécaniques.

Ces études permettent de choisir le matériau et les dimensions d'une pièce mécanique en fonction des conditions de déformation et de résistance requises.

1.2. Notion de statique et de contraintes

1.2.1. Forces

Quelle que soit leur nature, et quelle que soit la façon dont elles se manifestent (à distance ou au contact de deux corps), les forces sont des *grandeurs vectorielles*.

Il faudra donc, chaque fois que l'on considérera une force, rechercher :

- la *droite d'action* : elle est matérialisée par le corps sur lequel est exercée la force (le fil tendu, la tige rigide, etc.) ;
- le *sens* : le sens d'une force est celui du mouvement qu'elle tend à produire ; si la force et le mouvement sont dans le même sens, la force est dite *motrice* ; dans le cas contraire, la force est dite *résistante* ;
- le *point d'application* : si un solide est tiré par un fil ou poussé par une tige rigide, le point d'application est le point d'attache du fil ou le point de contact de la tige. Dans le cas du poids d'un corps, le point d'application est le centre de gravité de ce corps.
- *l'intensité de la force* : c'est la mesure de la grandeur de la force. Elle s'exprime en newton (N).

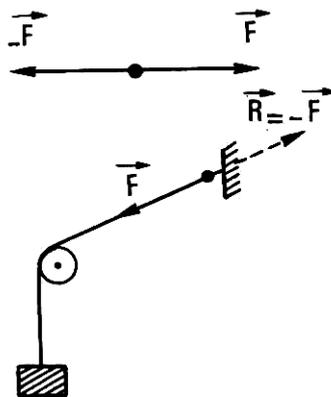


Fig. 1-1

- a) *Deux forces égales mais opposées s'équilibrent* : en effet, les vecteurs qui les représentent sont des vecteurs glissants opposés, dont la somme est nulle. L'équilibre des appuis, ou des fixations, amène ainsi à

envisager l'existence de forces de liaison (ou de réaction). Par exemple, dans le cas du crochet (fig. 1-1), sollicité par la traction du fil, l'équilibre n'est possible que s'il existe, au point de fixation, une réaction \vec{R} égale, mais opposée, à la force de sollicitation.

b) *Forces concourantes* : Ce sont des forces dont les droites d'action passent par un même point. La résultante \vec{R} de deux forces concourantes est représentée vectoriellement par la diagonale du parallélogramme construit sur les vecteurs figurant ces forces (fig. 1-2a). Si un solide est soumis à plusieurs forces concourantes, on trouve la résultante de l'ensemble de ces forces en construisant le « polygone des forces » (fig. 1-2b).

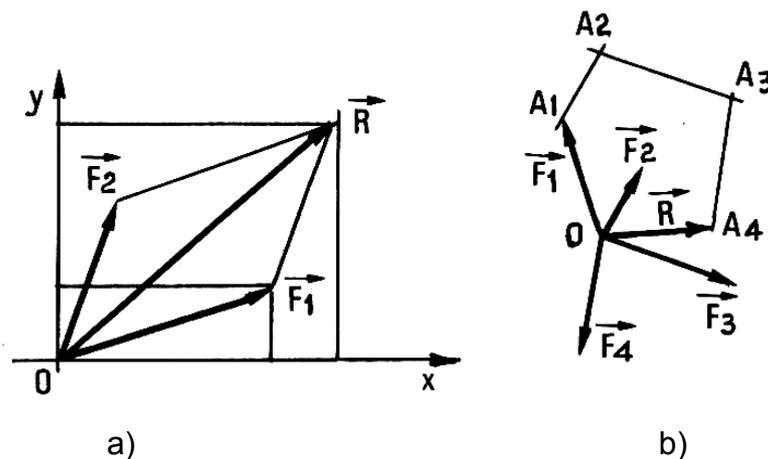


Fig. 1-2

c) *Equilibre d'un solide soumis à des forces parallèles* : La résultante de deux forces \vec{F}_A et \vec{F}_B parallèles et de mêmes sens est une force parallèle à ces forces, de même sens qu'elles, et d'intensité égale à la somme de leurs intensités (fig. 1-3a) :

$$\vec{R} = \vec{F}_A + \vec{F}_B$$

D'autre part, le point d'application de \vec{R} est un point C situé sur le segment AB, entre A et B, et tel que :

$$\vec{F}_A \times CA = \vec{F}_B \times CB$$

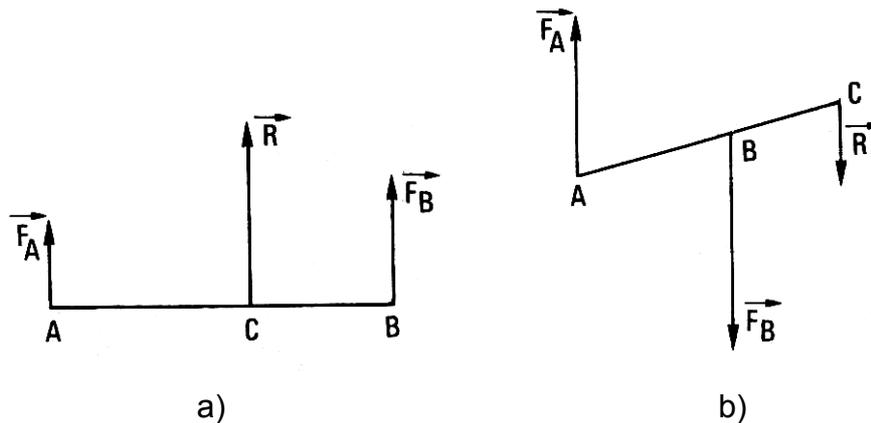


Fig. 1-3

Deux forces \vec{F}_A et \vec{F}_B parallèles et de sens contraires (fig. 1-3b) admettent une résultante parallèle à ces forces, du sens de la plus grande, et d'intensité égale à la différence de leurs intensités :

$$\vec{R} = \vec{F}_B - \vec{F}_A$$

Pour composer un nombre quelconque de forces parallèles, on considère d'abord toutes les forces ayant un certain sens, et on les compose jusqu'à trouver leur résultante. La résultante générale passe par un point appelé *centre des forces parallèles*.

Note !

Le *centre de gravité* G d'un solide, qui est le point d'application de son poids, a les propriétés d'un centre de forces parallèles.

Pour effectuer des calculs on considère que les forces sont situées dans un plan qui est, généralement, un plan de symétrie vertical de l'ouvrage étudié. Dans ce cas, les forces appliquées aux ouvrages peuvent être :

- *forces concentrées* (fig. 1-4a) : ces forces sont appliquées en réalité sur une petite surface, mais sont assimilées, pour le calcul, à des forces ponctuelles (par exemple, la réaction donnée par une articulation, l'action d'une roue d'un véhicule, etc.) ;
- *forces réparties* (fig. 1-4b) : par exemple, le poids propre d'une poutre ou la surcharge produite par une couche de neige.

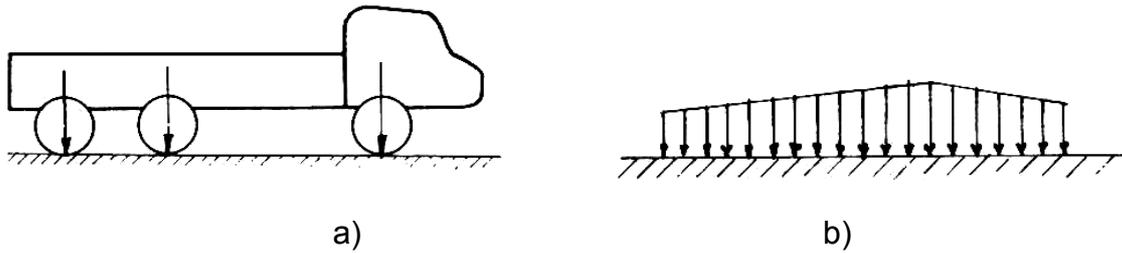


Fig. 1-4

Les forces sont représentées par des vecteurs. Elles sont comptées positivement si elles sont dirigées du bas vers le haut, et négativement dans le cas contraire.

1.2.2. Moments de forces

a) *Moment d'une force par rapport à un axe* : La roue de centre O et de rayon R (fig. 1-5) peut tourner librement autour de l'axe horizontal perpendiculaire en O au plan de la figure. Sous l'action de la force \vec{P} la roue a tendance à tourner dans le sens de rotation des aiguilles d'une montre.

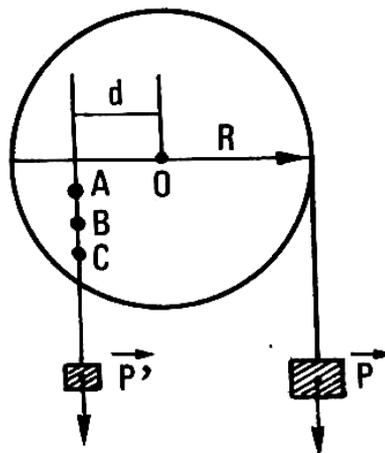


Fig. 1-5

Si l'on attache en un point quelconque A un poids \vec{P}' d'intensité suffisante, on obtient un équilibre stable. Si l'on transporte le point d'attache du poids \vec{P}' en un

autre point B ou C , *situé sur la verticale de A* , l'équilibre subsiste. D'autre part, on constate que le produit $\bar{P}' \times d$ est égal au produit $\bar{P} \times R$. Les produits $P'.d$ et $P.R$ représentent les **moments** par rapport à l'axe de rotation des poids \bar{P} et \bar{P}' .

b) *Equilibre d'un solide mobile autour d'un axe* : Un solide mobile autour d'un axe horizontal est en équilibre lorsque son centre de gravité est situé dans le plan vertical passant par l'axe.

Généralement, on obtient deux positions d'équilibre :

- une pour laquelle le centre de gravité est situé *au-dessus* de l'axe : l'équilibre correspondant est *instable* ;
- une pour laquelle le centre de gravité est situé *au-dessous* de l'axe : l'équilibre correspondant est *stable*.

c) *Théorème des moments* : Un solide mobile autour d'un axe est en équilibre quand la somme des moments, par rapport à l'axe, des forces qui tendent à le faire tourner dans un sens est égale à la somme des moments des forces qui tendent à le faire tourner en sens contraire.

On trouve une application de ce théorème dans l'équilibre des balances, mais également dans l'équilibre de certaines poutres.

d) *Couples de force* : un couple est un ensemble de deux forces parallèles, de sens contraire et de même intensité. Le plan qui contient les droites d'action des deux forces du couple est appelé plan du couple (fig. 1-6a).

L'effet du couple sur le solide est indépendant de la position des droites d'action des forces du couple par rapport à l'axe de rotation, *pourvu que la distance d de ces droites d'action ne change pas* (fig. 1-6b).

En effet :

- s'agissant d'un couple, la résultante générale des forces est nulle ;

- quant au moment, il est égal à $d_1 \times F + d_2 \times F = (d_1 + d_2) \cdot F = d \cdot F$ quelles que soient les valeurs respectives de d_1 et de d_2 .

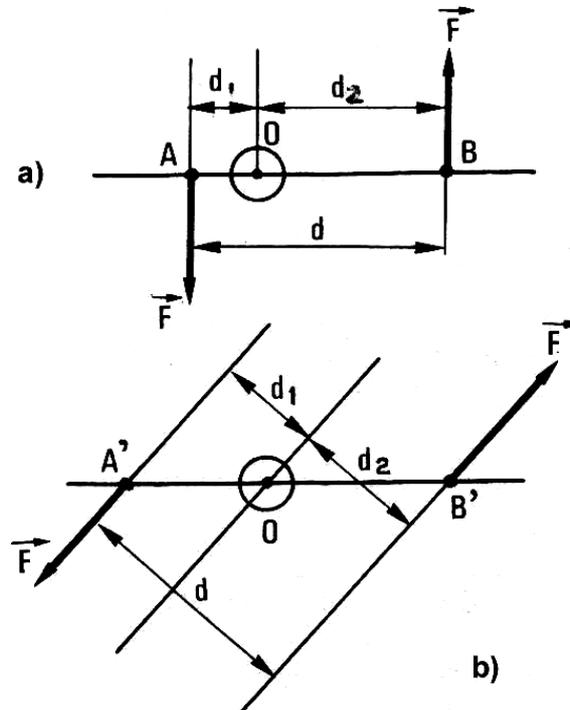


Fig. 1-6

On constate que le *moment d'un couple de forces* est le *produit de la distance des droites d'action des deux forces* (appelée souvent « bras de levier du couple ») *par leur intensité commune*.

D'autre part, si on fait varier simultanément F et d , de telle façon que le produit $d \cdot F$ reste constant, l'effet du couple reste le même ; il en résulte que la *grandeur caractéristique d'un couple est son moment*.

L'unité de moment est le mètre x newton (m.N). Le moment d'une force est *positif* si la force est dirigée vers la droite pour un observateur situé au point par rapport auquel est pris le moment, *négatif* si elle est dirigée vers la gauche.

1.2.3. Actions et réactions

Si on considère une masse ponctuelle quelconque, celle-ci est en équilibre :

- soit, si elle n'est soumise à aucune action (ou force) ;
- soit, si la somme des actions (ou forces) qui lui sont appliquées est nulle.

Ainsi, une petite boule placée sur le sol horizontal reste en équilibre parce que le sol exerce sur la petite surface de contact avec cette boule, une réaction \vec{R} égale et opposée au poids \vec{P} de la boule (fig. 1-7a). De même, une boule A attachée en B , par un fil, exerce sur le point d'attache B une action dirigée vers le bas, égale au poids \vec{P} de la boule (si on néglige le poids du fil). Il n'y aura d'équilibre que si l'attache B maintient une réaction \vec{R} égale et opposée au poids \vec{P} de la boule (fig. 1-7b).

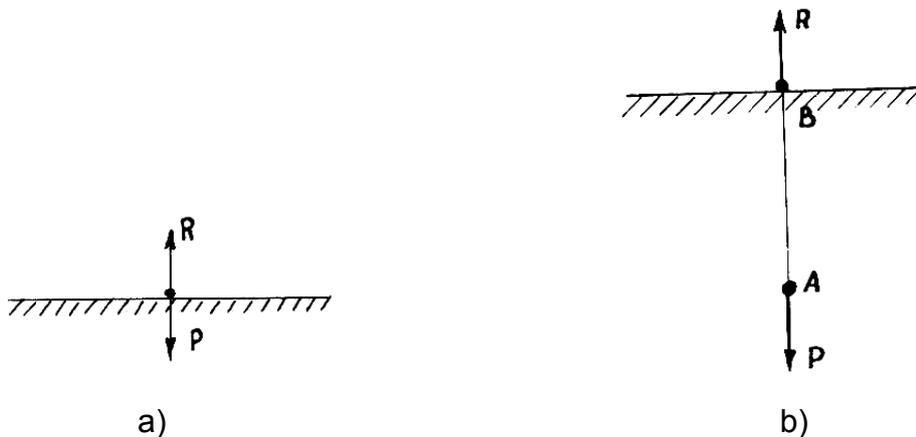


Fig. 1-7

1.2.4. Equilibre d'un solide

Si, pour une masse ponctuelle toutes les forces appliquées à cette masse peuvent se ramener à une seule force \wedge passant par le point représentatif de la masse, et appelée *résultante*, il n'en est pas de même pour un corps solide. Celui-ci est en effet composé d'un grand nombre de masses quasi ponctuelles, à chacune desquelles est appliquée une force unique.

On démontre que l'ensemble de ces forces peut se ramener à :

- une force unique (*résultante générale*) ;
- et un couple (dont le moment est appelé *moment résultant*).

On démontre également que les conditions nécessaires et suffisantes d'équilibre d'un solide indéformable sont exprimées par les deux conditions suivantes :

- La *résultante générale* des forces (*actions* et *réactions*) appliquées à ce solide **doit être nulle**.
- Le *moment résultant* de toutes les forces (*actions* et *réactions*), pris par rapport à un point quelconque **doit être nul**.

Dans le cas particulier de forces situées dans un même plan vertical, ces deux conditions s'expriment par trois équations :

- La somme des projections des forces sur un axe Ox horizontal du plan, est nulle.
- La somme des projections des forces sur un axe Oy vertical du plan, est nulle.
- La somme des moments pris par rapport à un point quelconque du plan, est nulle.

Lorsque le nombre d'inconnues est égal au nombre d'équations d'équilibre, le système considéré est dit **isostatique**. Dans le cas où le nombre d'inconnues est supérieur à ce nombre d'équations, il n'est pas possible de résoudre le problème par les seules équations de la statique : on dit que le système est **hyperstatique**.

1.2.5. Moment statique et moment d'inertie d'une surface plane

Si on considère une surface plane (S) et un axe xx' (fig. 1-8). Soit s une petite surface élémentaire à l'intérieur de (S).

- a) *Moment statique* : On appelle moment statique de s par rapport à xx' , le produit $s.y$ de la grandeur s de la surface par sa distance y à l'axe

considéré ; y doit être affecté d'un signe conventionnel + ou - selon que s est d'un côté ou de l'autre de xx' .

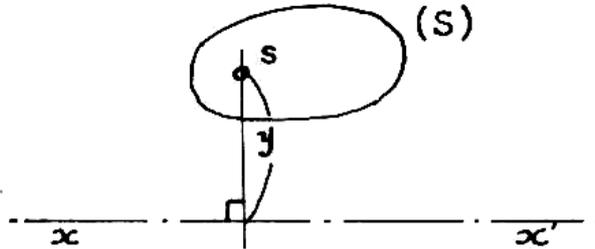


Fig. 1-8

Par extension, le moment statique de la surface (S) est la somme de tous les moment statiques des surfaces élémentaire soit :

$$m(S) /_{xx'} = \Sigma (s.y)$$

Le centre de gravité de la surface est un point G tel que, par rapport à un axe quelconque passant par ce point, le moment statique soit nul. Si xx' est un axe passant par G , on a :

$$m(S) /_{xx'} = \Sigma s.y_0 = 0$$

Remarques :

- 1) Si on considère le moment statique par rapport à un autre axe yy' parallèle à xx' et distant de d de celui-ci (fig. 1-9), le moment statique par rapport à yy' est égal au moment statique par rapport à xx' augmenté du produit $S.d$, de la surface S par la distance d des deux axes. Il y a lieu toutefois de faire attention au signe d suivant les positions respectives de xx' et yy' par rapport à (S).

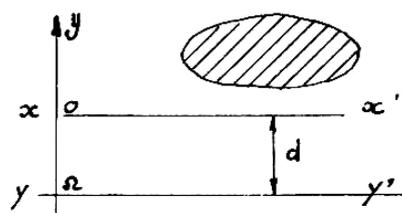


Fig. 1-9

- 2) Le moment statique d'une surface par rapport à un axe de symétrie est nul puisque cet axe passe par le centre de gravité (fig. 1-10).

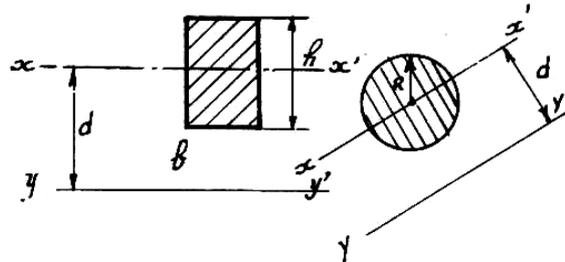


Fig. 1-10

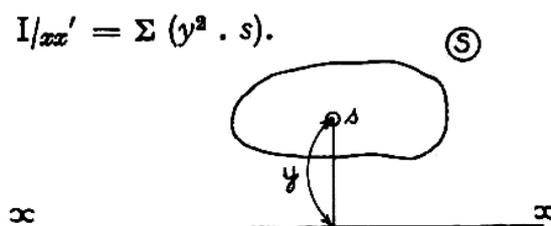
En appliquant les deux remarques précédentes et en tenant compte du signe des moments, on voit que le moment statique du rectangle par rapport à l'axe xx' est nul, d'où le moment statique par rapport à yy' est égal à $b.h.d$.

De même, le moment statique du cercle par rapport à yy' est égal à :

$$\pi . R^2 . d$$

Le moment statique est homogène à un volume Il s'exprime en cm^3 , m^3 , etc.

- b) *Moment d'inertie (Moment quadratique polaire)* : Le moment d'inertie d'une surface (S) plane (fig. 1-11), par rapport à un axe xx' , est la somme des produits des surfaces élémentaires s *infiniment petites*, par le carré de leur distance à cet axe.



$$I_{xx'} = \Sigma (y^2 . s).$$

Fig. 1-11

Le moment d'inertie d'une surface plane par rapport à un axe quelconque situé dans le plan de cette surface (fig. 1-12), est égal au moment d'inertie par rapport à un axe parallèle passant par le centre de gravité, augmenté du produit de la grandeur de la surface par le carré de la distance des deux axes :

$$I_{xx'} = I_{x_1x_1'} + S \cdot d^2$$

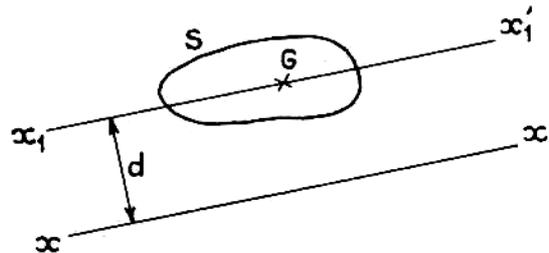


Fig. 1-12

Le moment d'inertie est homogène à une longueur à la puissance quatre. Il s'exprime en m^4 ou en cm^4 , etc.

- c) *Module d'inertie* : On appelle module d'inertie, le quotient du moment d'inertie (fig. 1-13) par la distance de la fibre extrême à l'axe passant par le centre de gravité. Si v est cette distance, le module d'inertie est $\frac{I}{v}$.

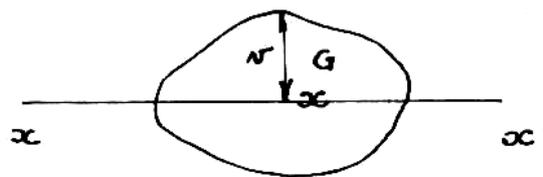


Fig. 1-13

On l'appelle également *module de résistance*, car il intervient pour le calcul des contraintes dans les pièces fléchis.

Il n'y a évidemment qu'un seul module d'inertie pour une section symétrique, mais il y en a deux pour une section dissymétrique (fig. 1-14) : $\frac{I}{v}$ et $\frac{I}{v'}$, correspondant aux deux fibres extrêmes.

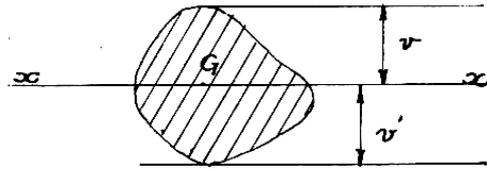


Fig. 1-14

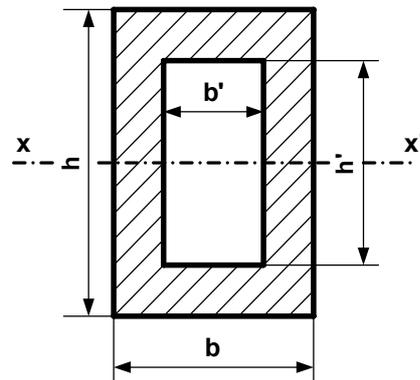
Figures	Moment statique	Moment d'inertie	Module d'inertie
	nul	$\frac{b h^3}{12}$	$\frac{b h^3}{6}$
	$\frac{b h^2}{2}$	$\frac{b h^3}{3}$	$\frac{b h^2}{3}$
	nul	$\frac{\pi d^4}{64}$	$\frac{\pi d^3}{32}$
	nul	$\frac{\pi (d^4 - d'^4)}{64}$	$\frac{\pi (d^4 - d'^4)}{32 d}$
	nul	$\frac{b a^3 - b' a'^3}{12}$	$\frac{b a^3 - b' a'^3}{6 a}$

Le tableau ci-dessus présente les formules des différents moments et modules pour les figures simples :

Un module d'inertie est homogène à une longueur à la puissance trois. Il s'exprime, comme un volume, en m^3 , cm^3 , etc.

Exercice :

1. Calculer le moment d'inertie et le module d'inertie par rapport à l'axe de symétrie xx' du rectangle évidé défini par la figure :



Corrigé :

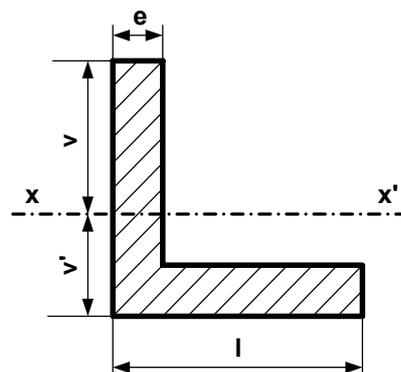
Ce moment d'inertie est égal au moment d'inertie du grand rectangle, diminué du moment d'inertie du rectangle intérieur, soit :

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} - \frac{b' \cdot h'^3}{12}$$

Quant au module d'inertie, il est égal au quotient du moment d'inertie par la plus grande distance à l'axe xx' , soit $h/2$:

$$\frac{I}{v} = \frac{b \cdot h^3 - b' \cdot h'^3}{6h}$$

2. Calculer le moment d'inertie et le module d'inertie de la cornière, défini par la figure, par rapport à l'axe xx' :



Corrigé :

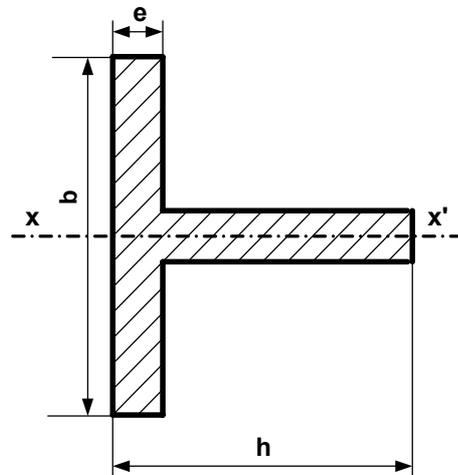
Calculer le moment d'inertie des rectangles circonscrits et en déduire les vides :

$$I = \frac{e \cdot v^3 + l \cdot v'^3 - (l - e) \cdot (v' - e)^3}{3}$$

Le module d'inertie est égal à :

$$\frac{I}{v} = \frac{e \cdot v^3 + l \cdot v'^3 - (l - e) \cdot (v' - e)^3}{3v}$$

3. Calculer le moment d'inertie et le module d'inertie pour le fer en té, défini par la figure, par rapport à l'axe xx' :



Corrigé :

Calculer le moment d'inertie des rectangles circonscrits et en déduire les vides :

$$I = \frac{e \cdot b^3 + (h - e) \cdot e^3}{12}$$

Le module d'inertie est égal à :

$$\frac{I}{v} = \frac{e \cdot b^3 + (h - e) \cdot e^3}{6b}$$

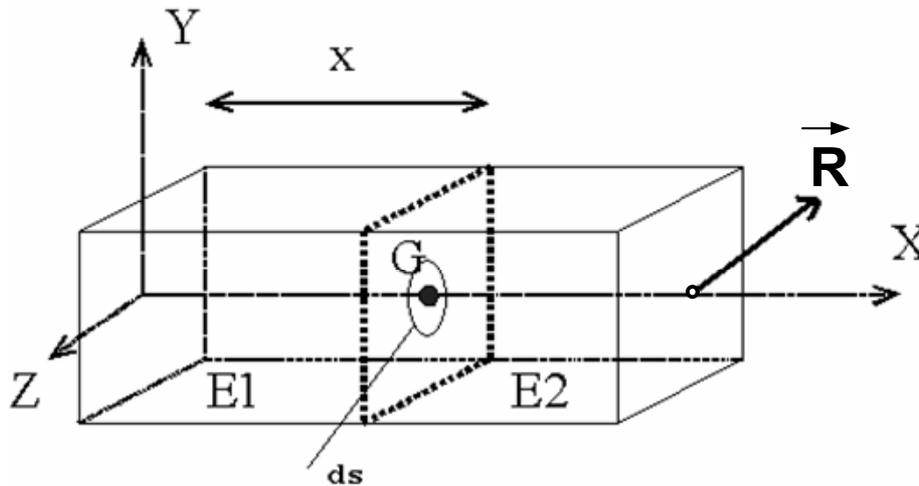
1.2.6. Contraintes normales dans une section droite

Considérons un solide quelconque en équilibre sous l'action de forces extérieures (fig. 1-15a). Ces forces comprennent, en général :

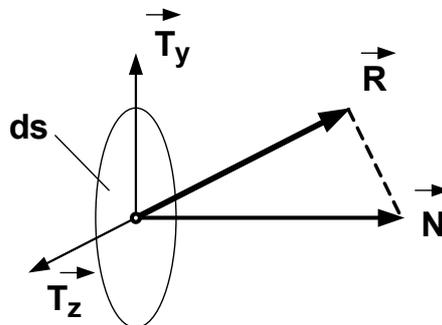
- des forces de volumes (forces de pesanteur, forces d'inertie) appliquées à chaque élément de volume du corps ;

- des forces de surface (pression d'un fluide, poussée d'un remblai, surcharge d'une poutre), appliquées sur la surface extérieure du corps.

Si le corps est en équilibre, le système des forces de volume et des forces de surface est équivalent à zéro.



a)



b)

Fig. 1-15

Si on imagine (fig. 1-15b) une surface G qui le décompose en deux parties $E1$ et $E2$. La partie $E2$ est en équilibre sous l'action des forces extérieures (de volume et de surface) qui lui sont directement appliquées, et des réactions exercées par la partie $E1$ sur la partie $E2$. L'action exercée par la partie $E1$ sur la partie $E2$ est la suivante : sur chaque élément ds de la surface de séparation G , $E1$ exerce sur $E2$

une force dite force élastique $\vec{f}_s \cdot ds$ appliquée au centre de l'élément ds . Par définition, $\vec{f} = \vec{R}$ est le **vecteur contrainte** relatif à l'élément de surface G .

Le vecteur $\vec{f} = \vec{R}$, dont la direction est quelconque dans l'espace, peut être décomposé :

- en sa projection sur la normale à l'élément G ; cette projection, \vec{N} , est la **contrainte normale**, ou *pression*. Elle peut être une *compression* ou une *traction*, suivant que les parties $E1$ et $E2$ sont pressées ou non l'une vers l'autre à travers l'élément de surface G (la mesure algébrique N du vecteur \vec{N} est positive dans le cas d'une compression et négative, dans le cas d'une traction).
- en sa projection sur le plan tangent à l'élément G , qui est appelée *contrainte tangentielle* \vec{T} .

L'ensemble des forces $\vec{f} = \vec{R}$ appliquées à la surface G forme un système équivalent au système des forces extérieures directement appliquées à la partie $E1$. En effet, l'un ou l'autre de ces systèmes ajoutés au système des forces extérieures appliquées à la partie $E2$ forme un système équivalent à zéro.

La dimension d'une contrainte est celle d'une force divisée par une surface. L'unité est donc l'unité de pression, soit le *Pa* (ou le *bar*).

1.2.7. Principales hypothèses de la résistance des matériaux

a) *Matériaux* :

- *Continuité* : la matière est supposée continue car son aspect moléculaire est trop "fin" pour l'étude qui nous intéresse ;
- *Homogénéité* : on supposera que tous les éléments de la matière, aussi petits soient ils, sont identiques. (hypothèse non applicable pour le béton ou le bois) ;

- *Isotropie* : on supposera qu'en tout point et dans toutes les directions, la matière a les mêmes propriétés mécaniques. (hypothèse non applicable pour le bois ou les matériaux composites)

b) *Notion de poutre*

La résistance des matériaux (RDM) étudie des pièces dont les formes sont relativement simples. Ces pièces sont désignées sous le terme de « poutres ». On appelle **poutre** (fig. 1-16) un solide engendré par une surface plane (S) dont le centre de surface G décrit une courbe plane (C) appelée ligne moyenne.

Les caractéristiques de la poutre sont :

- ligne moyenne droite ou à grand rayon de courbure (C) ;
- section droite (S) constante ou variant progressivement ;
- grande longueur par rapport aux dimensions transversales (en général 10 fois) ;
- existence d'un plan de symétrie.

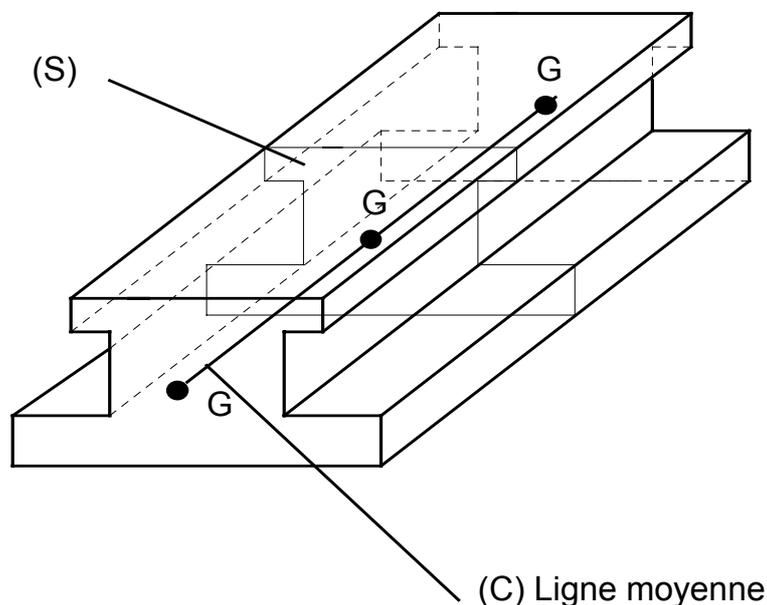


Fig. 1-16

c) *Forces extérieures* :

- *Plan de symétrie* : les forces extérieures seront situées dans le plan de symétrie de la poutre ou alors disposées symétriquement par rapport à ce plan ;
- *Types d'actions mécaniques extérieures* : deux types d'actions mécaniques peuvent s'exercer sur la poutre (fig. 1-17) :
 - charges concentrées (\vec{F}_1 ou moment \vec{M}_c)
 - charges réparties p sur DE. (exprimées en N/m).

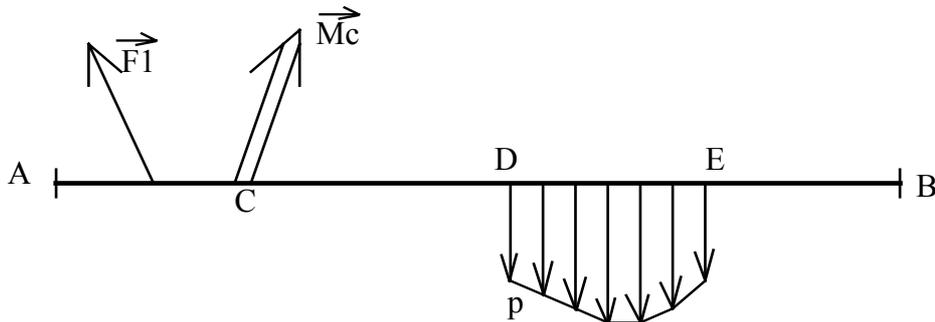


Fig. 1-17

d) *Déformations*

Les déformations étant petites devant les dimensions de la poutre, les actions s'exerçant sur celle-ci seront calculées à partir du principe fondamental de la statique :

- Les supports des forces seront eux considérés comme constants (fig. 1-18).

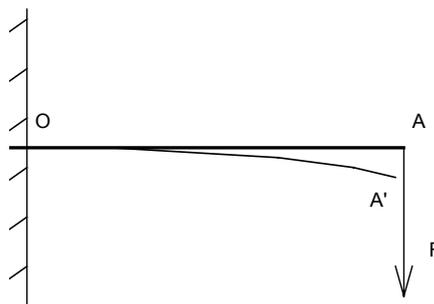


Fig. 1-18

- Les sections planes normales aux fibres avant déformation demeurent planes et normales aux fibres après déformation (fig. 1-19).

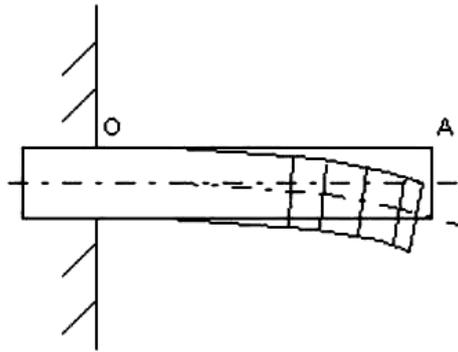


Fig. 1-19

- Les résultats obtenus par la RDM ne s'appliquent valablement qu'à une distance suffisamment éloignée de la région d'application des efforts concentrés.

L'étude de la relation contrainte – déformation montre que pendant la charge mécanique (application des forces) la déformation suit trois phases : élastique (la loi de Hooke, module de Young et coefficient de Poisson, plastique (la déformation plastique est environ 20 fois plus grande que la déformation élastique) et rupture.

1.2.8. Contraintes admissibles. Coefficient de sécurité

Lorsqu'on examine les constructions qui donnent satisfaction, on trouve presque toujours des zones dans lesquelles les contraintes permises ont été dépassées. Ceci s'explique très aisément par les considérations indiquées à propos des déformations plastiques des matériaux : si, en un point, la contrainte produit un écoulement, mais si, réciproquement, cet écoulement local diminue la contrainte, il peut s'établir un équilibre définitif dans le corps, celui-ci s'étant *adapté* à sa fonction.

On peut donc déterminer ainsi les contraintes maximales à ne pas dépasser, de façon à ne pas entraîner la ruine de la construction. En fait, les constructeurs fixent le maximum des contraintes à un niveau beaucoup plus faible, introduisant ainsi un *coefficient de sécurité*. Par exemple, la contrainte admissible pour l'acier doux est

1600 bar, alors que la limite de rupture est de 3900 à 4200 bar et la limite d'élasticité de 2400 bar.

Les coefficients de sécurité varient suivant les règlements. Les principales raisons motivant l'introduction d'un coefficient de sécurité sont :

- Les caractéristiques des matériaux ne sont connues qu'avec une certaine *dispersion*. Cette dispersion peut être forte dans certains cas, comme par exemple, la résistance à la compression des bétons.
- Les sollicitations auxquelles sont soumis les constructions, ne sont pas toujours connues avec précision (par exemple, effort exercé par le vent).
- Souvent le calcul correct des contraintes est inextricable, du fait de la complexité de la construction. On est alors obligé de recourir à des méthodes simplistes ne donnant qu'une valeur approchée des contraintes.
- Les constructions ne présentent que rarement dans leurs parties d'images fidèles des éprouvettes sur lesquelles ont été mesurées les caractéristiques physiques des matériaux.
- Les matériaux peuvent s'altérer au cours du temps (corrosion des aciers).
- Enfin, le projecteur peut envisager l'avenir en pensant, par exemple, à l'augmentation du poids des trains ou des camions (coefficient de sécurité par rapport à l'utilisation).

1.3. Conditions de résistance aux différentes sollicitations

1.3.1. Traction simple et compression simple

Une poutre est sollicitée à la *traction simple* lorsqu'elle est soumise à deux forces directement opposées, appliquées au centre de surface des sections extrêmes G (au centre de gravité) et qui tendent à l'allonger (fig. 1-20a). La valeur de cette

contrainte uniforme est $\sigma = \frac{N}{S}$

L'élément de fibre de longueur Δx subit un allongement égal à $\Delta l = -\frac{N}{E.S} \Delta x$ (loi de Hooke). Les deux sections se déplacent pendant la déformation, parallèlement entre elles, sans rotation de l'une par rapport à l'autre (fig. 1-20b).

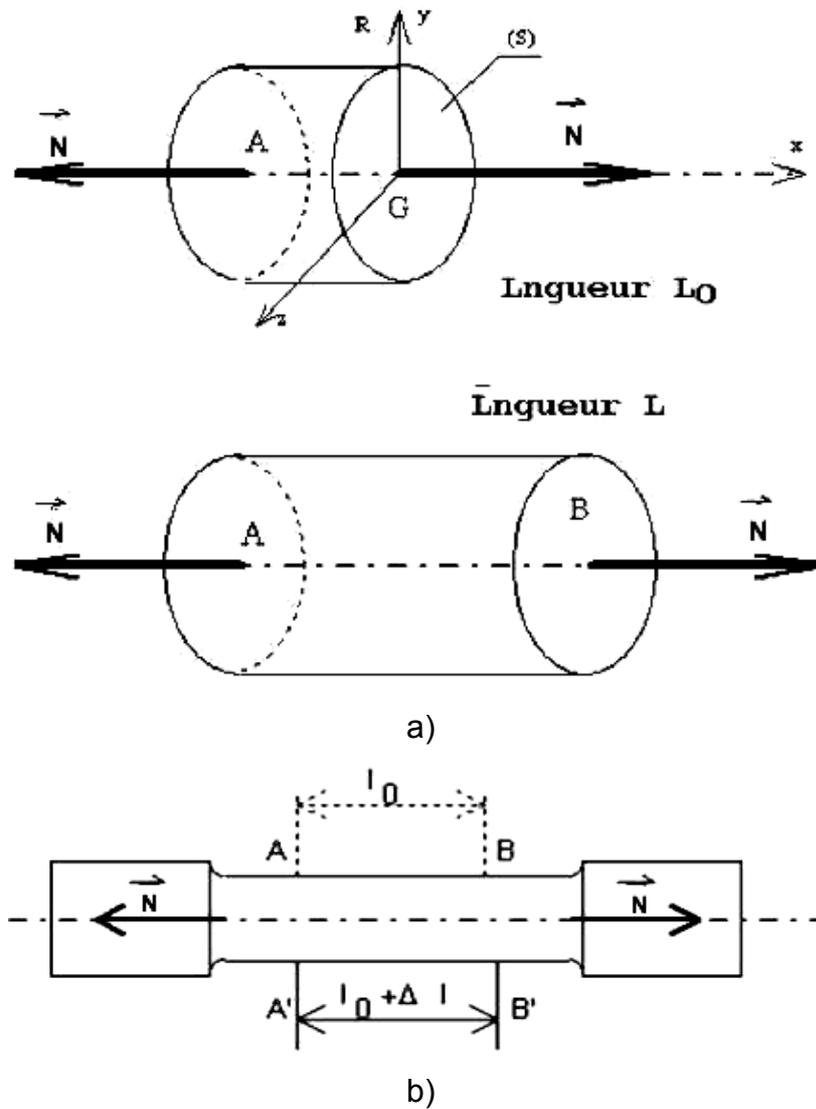


Fig. 1-20

Une poutre est sollicitée à la *compression simple* lorsqu'elle est soumise à deux forces directement opposées, appliquées au centre de surface des sections extrêmes et qui tendent à la raccourcir (fig. 1-21). La valeur de la contrainte est la même, mais le signe est + (selon les conventions).

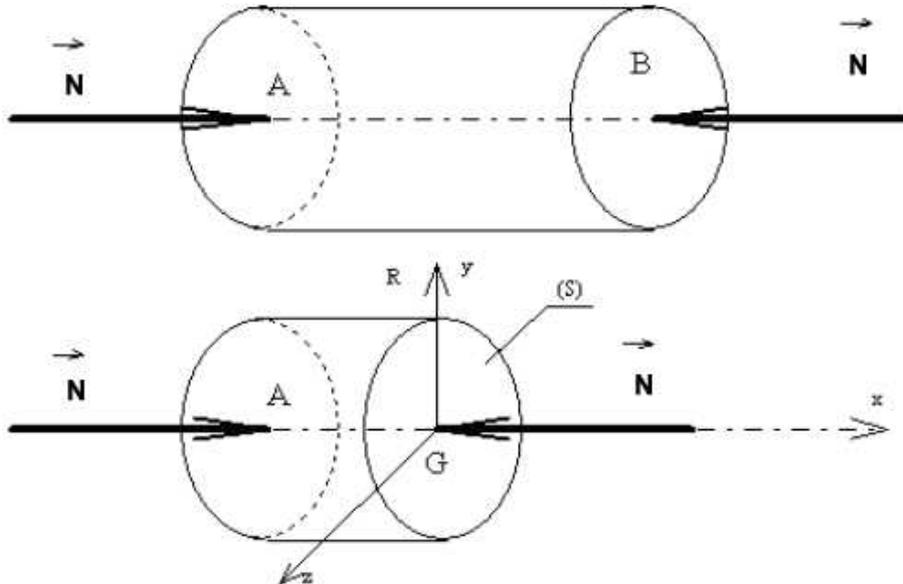


Fig. 1-21

Les formules ci-dessus peuvent être expliquées et développées par les essais de traction. Une éprouvette normalisée en acier est sollicitée à la traction par une machine d'essai, qui permet de déterminer l'allongement de l'éprouvette en fonction de l'effort qui lui est appliqué. L'éprouvette est en général un barreau cylindrique rectifié terminé par deux têtes cylindriques. La partie médiane a pour section $S_0 = 150 \text{ mm}^2$ et longueur $l_0 = 100 \text{ mm}$ (fig. 1-20b).

Cet essai permet de déterminer certaines caractéristiques mécaniques essentielles des matériaux. Les extrémités de l'éprouvette sont pincées dans les mâchoires d'une machine de traction comportant un mécanisme enregistreur (tambour et stylet). La machine fournit un effort de traction F variable dont l'action s'exerce jusqu'à la rupture de l'éprouvette. (La vitesse de traction est environ $10 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{sec}$).

On obtient un diagramme représentant la relation de l'effort F (en N) et les allongements Δl (en mm) (fig. 1-22). L'analyse de la courbe obtenue donne :

- Zone **OA** : c'est la zone des *déformations élastiques*. Si l'on réduit la valeur de F jusqu'à une valeur nulle, l'éprouvette retrouve sa longueur initiale. Dans cette zone, l'allongement est proportionnel à l'effort d'extension. Des essais effectués avec des éprouvettes de différentes dimensions permettent de

constater que pour un même matériau, l'allongement unitaire ($\Delta l/l_0$) est proportionnel à l'effort unitaire (F/S_0). Les sections droites et planes de l'éprouvette restent droites et planes pendant l'essai.

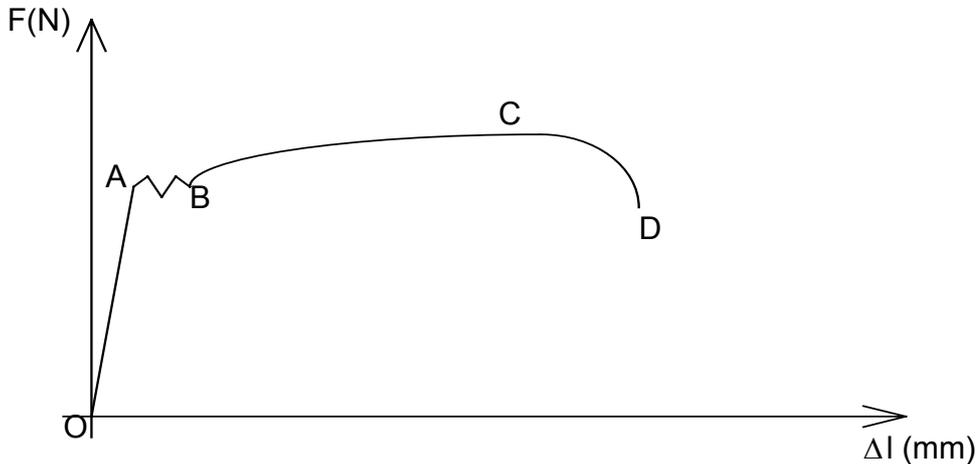


Fig. 1-22

- Zone **ABCD** : c'est la zone des *déformations permanentes*. Si l'on réduit la valeur de F jusqu'à une valeur nulle, l'éprouvette ne retrouve pas sa longueur initiale.

Pour les calculs pratiques c'est la zone des déformations élastiques qui est intéressante. Pour cette zone on peut établir la relation :

$$\frac{N}{S} = E \frac{\Delta l}{l}$$

- Où :
- N = force de traction, en N ;
 - S = section, en mm^2 ;
 - E = *module d'élasticité longitudinal* (ou *module de Young*), en MPa (N/mm^2) ;
 - Δl = allongement de l'éprouvette, en mm ;
 - l = longueur de l'éprouvette, en mm.

Matériau	Fontes	Aciers	Cuivre	Aluminium	Tungstène
E (MPa)	60000à160000	200000	120000	70000	400000

Lors de cet essai, on met aussi en évidence une autre caractéristique de l'élasticité ; il existe un rapport constant entre la contraction relative transversale ($\Delta d/d$) et l'allongement relatif longitudinal ($\Delta l/l$). On peut écrire :

$$\frac{\Delta d}{d} = \nu \frac{\Delta l}{l}$$

ν est aussi une caractéristique du matériau (*coefficient de Poisson*), il est de l'ordre de 0,3 pour les métaux.

Soit ($E1$) le tronçon de la poutre (E) issu de sa coupure par un plan orthogonal à sa ligne moyenne (fig. 1-23).

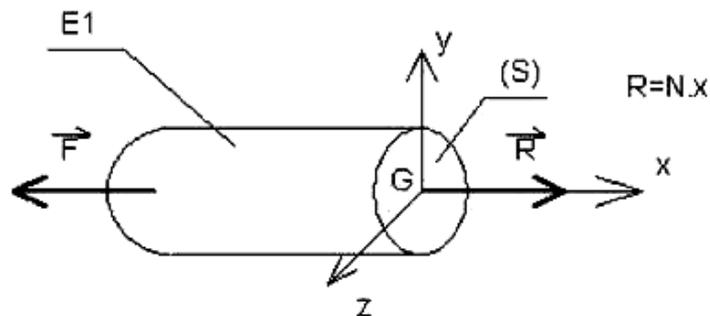


Fig. 1-23

Le tronçon ($E1$) est en équilibre sous l'action de F et des efforts de cohésion dans la section droite (S). Soit S l'aire de la section droite (S). On définit la contrainte σ dans la section droite (S) par la relation :

$$\sigma = \frac{N}{S}$$

avec σ : *contrainte normale d'extension* ($\sigma > 0$), en MPa ;

N : effort normal d'extension, en N ;

S : aire de la section droite (S), en mm².

La contrainte permet de "neutraliser" la surface et par conséquent de comparer des éprouvettes de sections différentes.

Des deux formules : $\sigma = \frac{N}{S}$ et $\frac{N}{S} = E \frac{\Delta l}{l}$, on peut en déduire :

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} = E \cdot \varepsilon \quad \text{loi de Hooke}$$

L'allongement élastique unitaire $\frac{\Delta l}{l}$ suivant l'axe x , généralement est noté ε .

Dans la pratique on utilise pour les matériaux les caractéristiques mécaniques suivante :

- *Contrainte limite élastique en extension* σ_e : C'est la valeur limite de la contrainte dans le domaine élastique, appelée aussi limite d'élasticité R_e . Pour l'acier, cette valeur est voisine de 300 MPa.
- *Contrainte limite de rupture en extension* σ_r : C'est la valeur limite de la contrainte avant rupture de l'éprouvette, appelée aussi résistance à la traction R . Pour l'acier, cette valeur est voisine de 480 MPa.
- *Allongement* $A\%$: $A\% = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100\%$, avec : l_0 - longueur initiale de l'éprouvette, l - longueur de l'éprouvette à sa rupture. Pour l'acier, on constate des valeurs de $A\%$ voisines de 20%.

Pour des raisons de sécurité, la *contrainte normale* σ doit rester inférieure à une valeur limite appelée *contrainte pratique à l'extension* σ_{pe} . On a :

$$\sigma_{pe} = \frac{\sigma_e}{s}$$

s est un coefficient de sécurité qui varie de 1,1 à 10 selon les domaines d'application.

La *condition de résistance* exprime simplement le fait que la *contrainte réelle* ne doit pas dépasser le seuil précédent, soit :

$$\sigma_{réelle} = \frac{N}{S} < \sigma_{pe}$$

Si le solide étudié présente de fortes variations de sections, les relations précédentes ne s'appliquent plus. On dit qu'il y a *concentration de contraintes*. On doit alors pondérer les résultats à l'aide d'un coefficient k (coefficient de concentration de contraintes) en posant :

$$\sigma_{\max} = k \cdot \sigma$$

Sur la fig. 1-24 sont présentés quelques exemples de cas de concentration de contrainte :

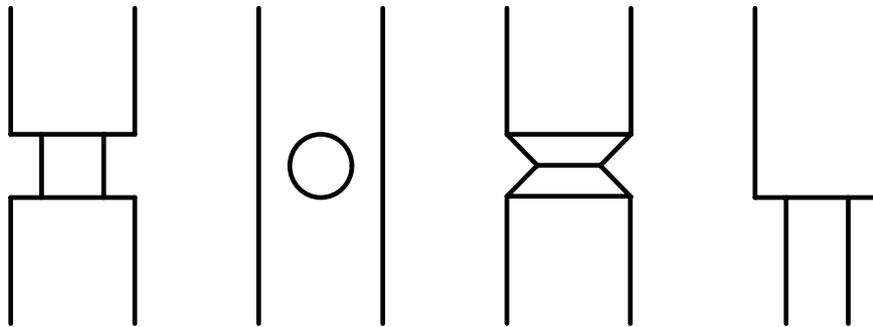
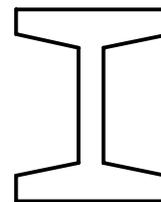


Fig. 1-24

Exercice :

Considérons une poutre métallique constituée par un profilé IPN de 120 mm de hauteur. Un tel profilé a une section de $14,2 \text{ cm}^2$ et un moment d'inertie de 328 cm^4 . Calculer les contraintes sur les fibres extrêmes dans le cas où la poutre est soumise à un effort de compression de 100000 N.



Corrigé :

La contrainte due à l'effort normal est :

$$\sigma = \frac{N}{S} = \frac{100000 \text{ N}}{14,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 7 \cdot 10^7 \text{ Pa} = 700 \text{ bar}$$

1.3.2. Contraintes tangentielle de cisaillement

L'effort tranchant relatif à une section de poutre a pour l'effet de faire glisser la partie gauche de la poutre par rapport à la partie droite, le long de cette section : l'effort tranchant produit dans la section des efforts tangentiels, appelés aussi efforts de cisaillement.

Une poutre subit une sollicitation de cisaillement simple (fig. 1-25) lorsqu'elle est soumise à deux systèmes d'action de liaison qui se réduisent dans un plan (P) perpendiculaire à la ligne moyenne à deux forces directement opposées.

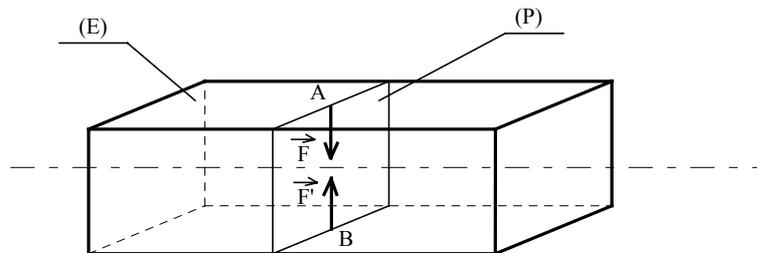


Fig. 1-25

Sous l'action de ces deux forces (fig. 1-26a) la poutre tend à se séparer en deux tronçons $E1$ et $E2$ glissant l'un par rapport à l'autre dans le plan de section droite (P).

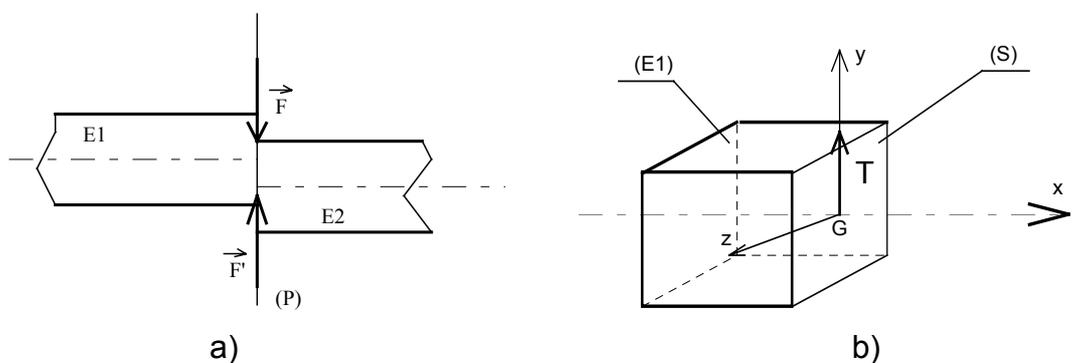


Fig. 1-26

Dans le cas de poutre à plan moyen, l'effort tranchant T est dirigé suivant Gy (fig. 1-26b).

Il est physiquement impossible de réaliser du cisaillement pur au sens de la définition précédente. Les essais et les résultats qui suivent permettent toutefois de rendre compte des actions tangentielles dans une section droite et serviront ainsi dans le calcul de pièces soumises au cisaillement. On se gardera cependant le droit d'adopter des coefficients de sécurités majorés pour tenir compte de l'imperfection de la modélisation.

Si on considère une poutre (E) parfaitement encastree et on lui applique un effort de cisaillement \vec{F} uniformément réparti dans le plan (P) de la section droite (S) distante de Δx du plan (S_0) d'encastrement (fig. 1-27a et b), on se rapproche des conditions du cisaillement réel.

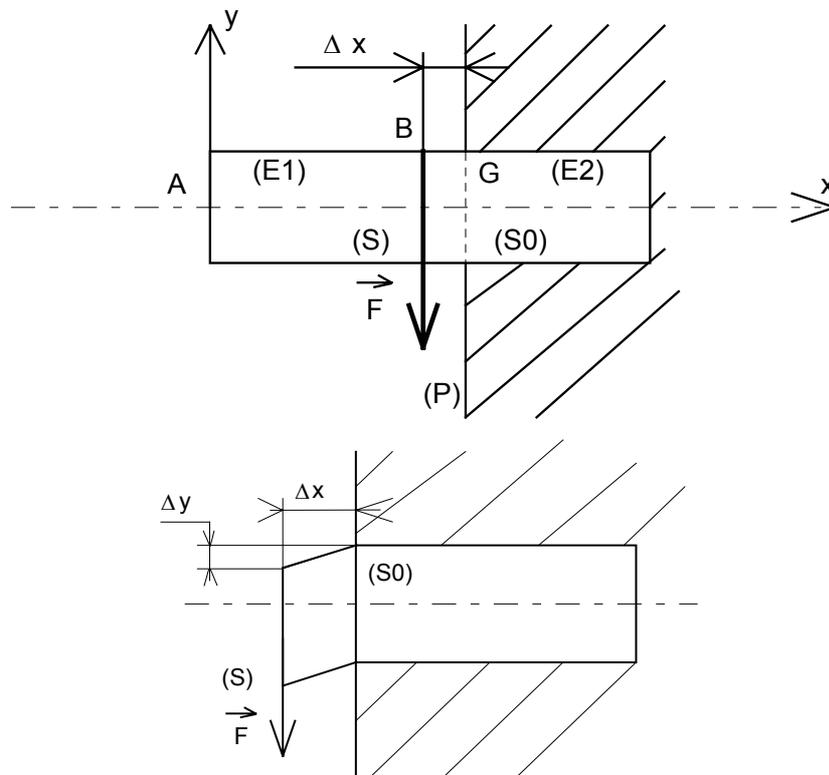


Fig. 1-27

La courbe obtenue (fig. 1-28) présente les zones suivantes :

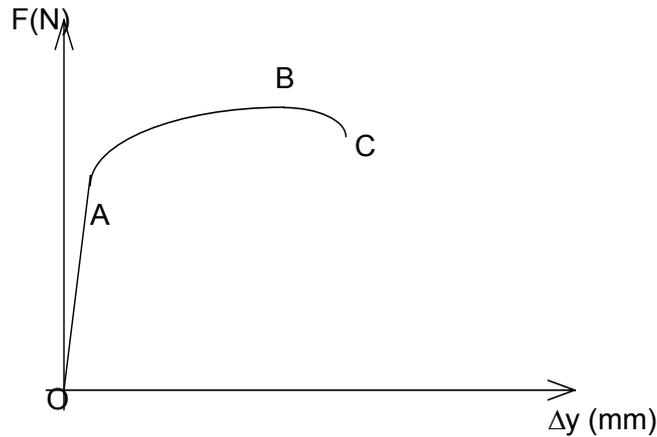


Fig. 1-28

- **Zone OA** : c'est la zone des *déformations élastiques*. Si l'on réduit la valeur de F jusqu'à une valeur nulle, l'éprouvette retrouve sa forme initiale.
- **Zone ABC** : c'est la zone des *déformations permanentes*. Si l'on réduit la valeur de F jusqu'à une valeur nulle, l'éprouvette ne retrouve pas sa forme initiale (déformations plastiques).

Pour la zone des déformations élastiques l'essai précédent a permis pour différents matériaux d'établir la relation :

$$\frac{F}{S} = G \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

Où : F = force, en N ;

S = section, en mm^2

G = module d'élasticité transversale ou module de Coulomb, en MPa ;

Δy et Δx = déformations, en mm.

Dans le tableau sont présentés les modules d'élasticité transversale pour certains matériaux :

Matériau	Fontes	Aciers	Laiton	Duralumin	Plexiglas
G (MPa)	40000	80000	34000	32000	11000

On définit la contrainte tangentielle τ dans une section droite (S) par la relation :

$$\tau = \frac{T}{S}$$

Avec : τ = contrainte tangentielle de cisaillement, en MPa (valeur moyenne) ;
 T = effort tranchant, en N ;
 S = aire de la section droite (S), en mm².

Des deux formules précédentes : $\tau = \frac{T}{S}$ et $\frac{F}{S} = G \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x}$ pour $F = T$, on déduit :

$$\tau = G \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x} = G \cdot \gamma \quad \text{Loi de Hooke}$$

La grandeur $\gamma = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ est appelée *glissement relatif*.

Dans la pratique on utilise pour les matériaux les caractéristiques mécaniques suivante :

- *Contrainte tangentielle de limite élastique* τ_e ou R_{pg} . C'est la valeur limite de la contrainte dans le domaine élastique. Pour l'acier, cette valeur est comprise entre 250 MPa et 600 MPa.
- *Contrainte tangentielle de rupture* τ_r . C'est la valeur limite de la contrainte avant rupture de l'éprouvette.

Pour des raisons de sécurité, la contrainte normale τ doit rester inférieure à une valeur limite appelée **contrainte pratique de cisaillement** τ_p . On a :

$$\tau_p = \frac{\tau_e}{s}$$

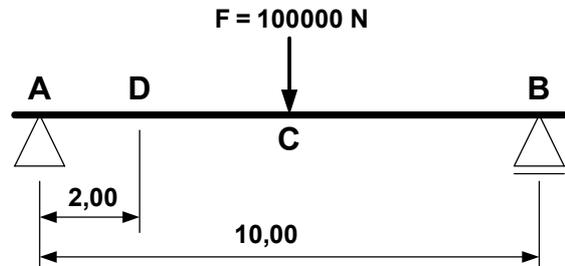
s est un coefficient de sécurité qui varie de 1,1 à 10 selon les domaines d'application.

La *condition de résistance* exprime simplement le fait que la *contrainte réelle* ne doit pas dépasser le seuil précédent, soit :

$$\tau_{réelle} = \frac{T}{S} < \tau_p$$

Exercice :

Considérons une poutre métallique de section rectangulaire de hauteur 1 m et de largeur 0,50 m. Cette poutre, de longueur 10 m, est placée à ses extrémités sur des appuis simples A et B. Sachant qu'elle supporte en son milieu C une charge concentrée de 100000 N, calculer au point D d'abscisse 2 m par rapport à A :



- La contrainte maximale de compression σ ;
- La contrainte moyenne de cisaillement τ

Corrigé :

Il faut d'abord calculer les réactions d'appui. Le point C étant au milieu de A et B, les réactions en A et B seront égales à :

$$\frac{100000}{2} = 50000 \text{ N}$$

Le moment fléchissant en D est égal au moment de la seule force à gauche qu'est la réaction en A, soit :

$$M = 50000 \times 2 = 100000 \text{ N.m}$$

L'effort tranchant est égal à la réaction en A, soit :

$$T = 50000 \text{ N}$$

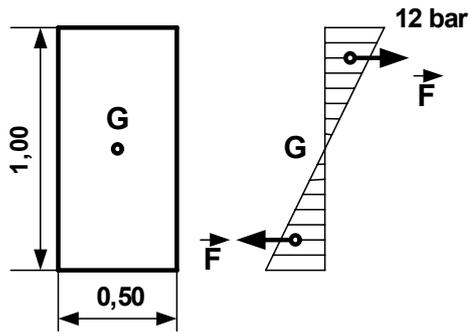
Le moment d'inertie de la section est :

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0,50 \times 1^3}{12}$$

La contrainte normale est donnée par :

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot y$$

Elle est nulle en G, et maximale aux bords supérieur et inférieur de la poutre. La contrainte maximale de compression est :



$$\sigma = \frac{100000}{\frac{0,50}{12}} \times 0,50 = 1200000 \text{ Pa} = 12 \text{ bar}$$

La contrainte moyenne de cisaillement est :

$$\tau = \frac{T}{S} = \frac{50000}{0,50 \times 1,00} = 100000 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$$

1.3.3. Contrainte tangentielle et angle unitaire de torsion

Une poutre est sollicitée en torsion simple (fig. 1-29) lorsqu'elle est soumise à ses deux extrémités à des liaisons dont les efforts associés se réduisent à deux couples opposés dont les moments sont parallèles à l'axe du cylindre (on suppose la poutre comme cylindrique et de section circulaire constante).

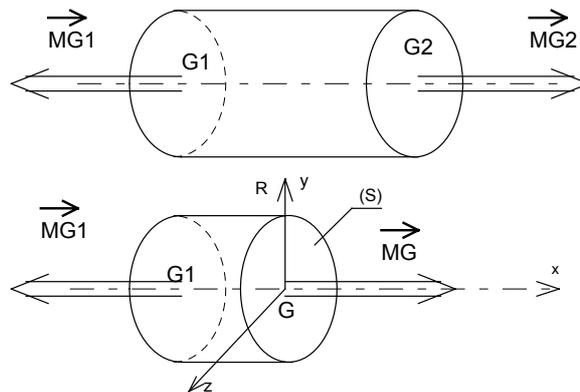


Fig. 1-29

Un dispositif permet d'effectuer un essai de torsion sur une poutre encastree à son extrémité $G1$ et soumise à un couple de torsion à son extrémité $G2$. Cette machine permet de tracer le graphe du moment appliqué en $G2$ en fonction de l'angle de rotation d'une section droite (fig. 1-30).

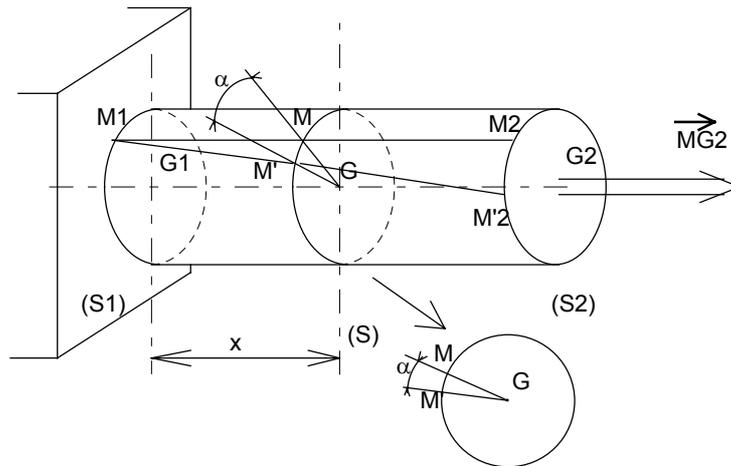


Fig. 1-30

On note lors de l'essai que, pour une même valeur du moment, l'angle α croit de façon linéaire avec x . L'abscisse de la section droite étudiée est : $\alpha = k.x$

L'analyse de la courbe obtenue (fig. 1-31) présente les zones suivantes :

- **Zone OA** : c'est la zone des déformations élastiques. Si l'on réduit la valeur du moment jusqu'à une valeur nulle, l'éprouvette retrouve sa forme initiale. Dans cette zone, l'angle α de torsion est proportionnel au couple appliqué. Les sections droites et planes de l'éprouvette restent droites et planes pendant l'essai.
- **Zone AB** : c'est la zone des déformations permanentes. L'éprouvette ne retrouve pas sa forme initiale après déformation.

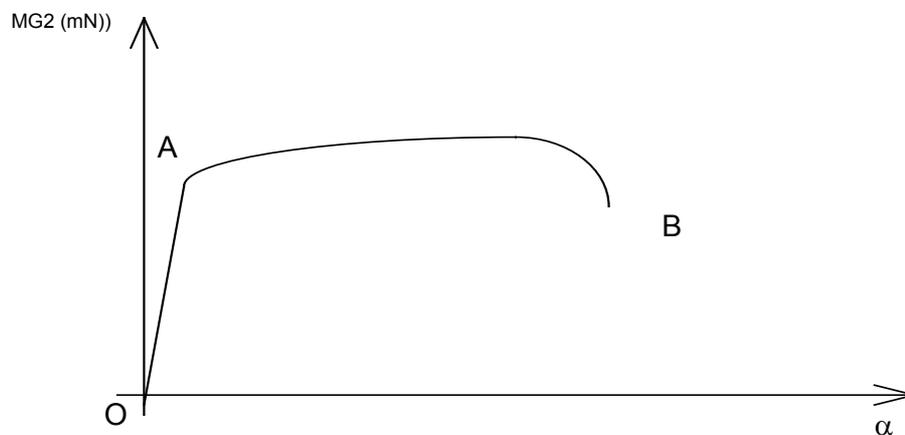


Fig. 1-31

Pour la zone des déformations élastiques l'essai précédent a permis pour différents matériaux d'établir la relation :

$$\alpha = \frac{M_t \cdot x}{G \cdot I_0}$$

Où : M_t = moment de torsion en N.mm ;

G = module d'élasticité transversal en MPa ;

α = angle de torsion, en rad ;

I_0 = moment quadratique polaire de la section (S) en mm⁴

En définissant l'angle unitaire de torsion par : $\vartheta = \alpha / x$ (exprimé en rad/mm), la relation devient :

$$M_t = G \cdot \theta \cdot I$$

Soit M un point de la section droite (S) de la poutre, situé à une distance ρ du centre G de la section (fig. 1-32). On définit la contrainte de torsion τ en M par la relation :

$$\tau_M = \frac{M_t}{\left(\frac{I_0}{\rho}\right)}$$

Avec : τ_M = contrainte tangentielle, en MPa ;

M_t = moment de torsion en N.mm ;

I_0 = moment quadratique polaire de la section (S) en mm⁴

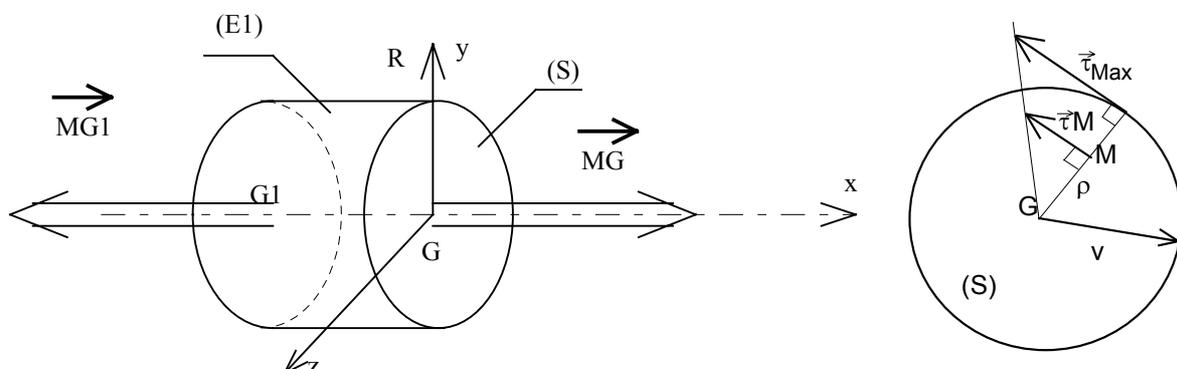


Fig. 1-32

Contrairement aux phénomènes étudiés jusqu'à maintenant, la contrainte varie en fonction du point choisi dans une section droite. Plus ce point est éloigné du centre de la section, plus la contrainte y sera importante. La contrainte est maximale pour $\rho = \rho_{\max}$, soit :

$$\tau_M = \frac{M_t}{\left(\frac{I_0}{\rho_{\max}} \right)}$$

Pour des raisons de sécurité, la contrainte normale τ doit rester inférieure à une valeur limite appelée contrainte pratique τ_p (voisine de la contrainte pratique de cisaillement). On a :

$$\tau_p = \frac{\tau_c}{s}$$

s est un coefficient de sécurité.

La condition de résistance indique simplement le fait que la contrainte réelle ne doit pas dépasser le seuil précédent, soit :

$$\tau_{\text{réelle}} = \frac{M_t}{\left(\frac{I_0}{\rho_{\max}} \right)} < \tau_p$$

Si le solide étudié présente de fortes variations de sections, les relations précédentes ne s'appliquent plus. Il faut alors appliquer un coefficient de concentration de contraintes (fig. 1-33) (exemple : épaulement)

r/D	0,1	0,05	0,02
D/d			
1,09	1,3	1,5	1,7
1,2	1,5	1,7	2,5
1,5	1,7	2,2	2,7

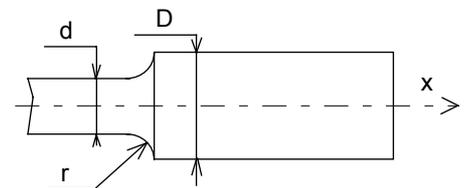


Fig. 1-33

La théorie élémentaire de la torsion donnant des résultats inexacts, et la théorie correcte étant très compliquée, on utilise les résultats de cette dernière relatifs à des sections simples.

Le moment de torsion est un moment qui tend à faire tourner chaque section dans son propre plan (fig. 1-34).

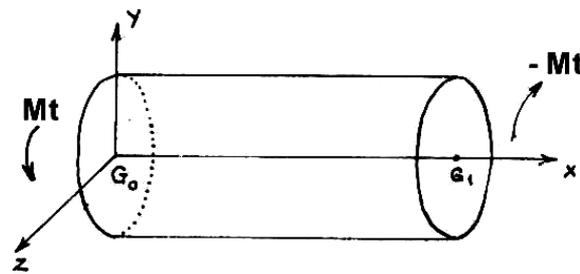


Fig. 1-34

En fait, contrairement à ce que suppose la théorie élémentaire, les sections ne restent en général pas planes dans la déformation, ce qui complique les résultats. Les contraintes sont uniquement des *contraintes de cisaillement*.

a) *Section elliptique*

Soit M_t la valeur du moment de torsion. Les composantes de la contraintes de cisaillement en un point M , de coordonnées y et z , sont :

$$\tau_z = -\frac{2 \cdot M_{tz}}{\pi a b^3} \qquad \tau_y = \frac{2 \cdot M_{ty}}{\pi a^3 b}$$

Il en résulte que, si P est un point du contour (fig. 1-35) :

- en un point M de GP , la contrainte de cisaillement est parallèle à la tangente en P au contour ;
- le long de GP , la contrainte de cisaillement est proportionnelle à la distance à G .

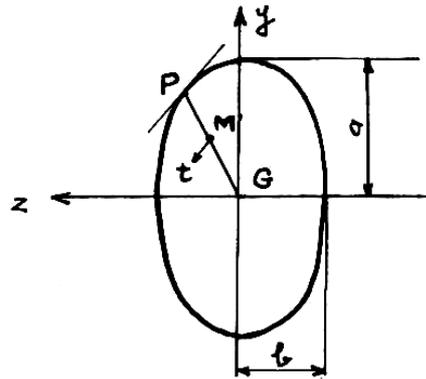


Fig. 1-35

La plus grande contrainte de cisaillement a lieu à l'extrémité du petit axe et a pour valeur :

$$\tau_m = \frac{-2 M_t}{\pi a b^2}$$

b) Section circulaire

Il suffit de remplacer dans les formules précédentes : $a = b = R$. On obtient :

$$\tau_z = \frac{-2 M_{tz}}{\pi R^4} \quad \tau_y = \frac{2 M_{ty}}{\pi R^4}$$

On peut aussi démontrer qu'une section plane reste plane.

c) Section rectangulaire

Les résultats sont très complexes. On va étudier que le cas d'un rectangle très étroit (fig. 1-36), de hauteur b et d'épaisseur e (e étant très petit par rapport à b).

La contrainte maximale de cisaillement est alors :

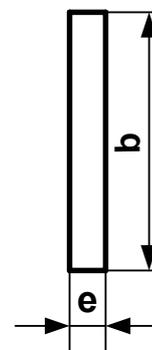


Fig. 1-36

$$\tau = \frac{M_t}{\frac{1}{3} b e^2}$$

Exercices :

1. Sur un barreau circulaire de \varnothing 100 mm on applique à l'extrémité d'une clé, de bras de levier $d = 200$ mm, une force $F = 10000$ N, qui produit un couple de torsion à l'extrémité B du barreau (fig. 1-37). L'extrémité A est solidement bloquée ce qui produit en A un couple de réaction égal et opposé au couple exercé en B.

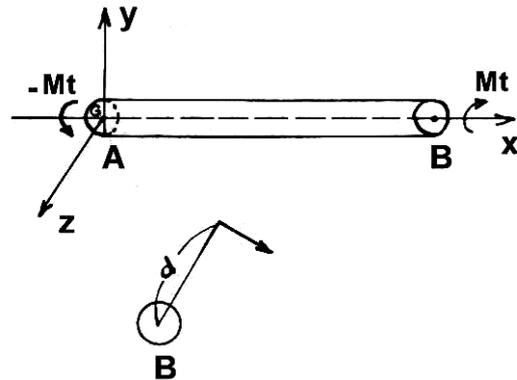


Fig. 1-37

Calculer la contrainte de cisaillement dans une section quelconque :

- au centre de gravité de la section ;
- en un point du pourtour de la section.

Corrigé :

Le couple de torsion est égal à :

$$M_t = F \times d = 10000 \text{ N} \times 0,2 \text{ m} = 2000 \text{ N.m}$$

Les contraintes de cisaillement :

- au centre de gravité (c'est-à-dire sur l'axe longitudinal du barreau)

On a : $y = 0$ et $z = 0$, d'où : $\tau = 0$, ce qui est normal puisque la torsion s'effectue autour de cet axe.

- sur le pourtour, on a :

$$\tau = \sqrt{\tau_y^2 + \tau_z^2} = \frac{2 M_t}{\pi R^4} \sqrt{y^2 + z^2} = \frac{2 M_t}{\pi R^4} \cdot R = \frac{2 M}{\pi R^3}$$

Soit :

$$\tau = \frac{4000}{\pi \cdot 0,05^3} = 5,1 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 5,1 \text{ bar}$$

2. Sur les extrémités A et B d'une tôle d'acier de 10 mm d'épaisseur et de 1 m de largeur, sont appliquées deux forces F égales et opposées (fig. 1-38).

Calculer la contrainte maximale de cisaillement dans la tôle, si la force $F = 10000 \text{ N}$

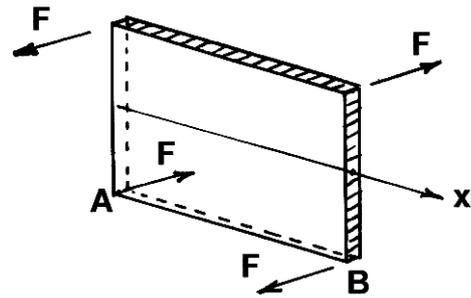


Fig. 1-38

Corrigé :

Le couple : $M_t = 1000 \text{ N} \times 1 \text{ m} = 1000 \text{ N.m}$

La contrainte maximale de cisaillement est :

$$\tau = \frac{M_t}{\frac{1}{3} b e^2} = \frac{1000}{\frac{1}{3} \cdot 1.0,01^2} = 3 \cdot 10^7 \text{ Pa} = 300 \text{ bar}$$

1.3.4. Contrainte normale et déformation. Flexion

Une poutre est sollicitée en flexion plane simple lorsque le système des forces extérieures se réduit à un système coplanaire et que toutes les forces sont perpendiculaires à la ligne moyenne (fig. 1-39).

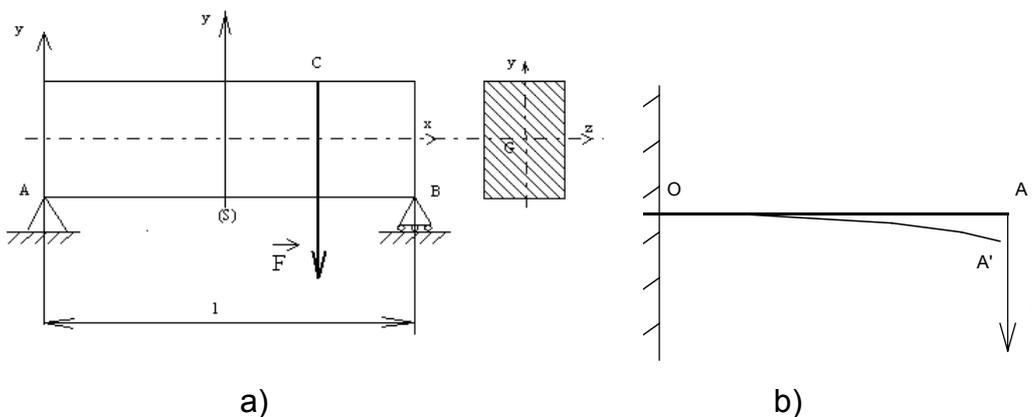


Fig. 1-39

a) Modélisation des forces extérieures

- Contact ponctuel (sans adhérence) : image (fig. 1-40a) et modèle (fig. 1-40b)

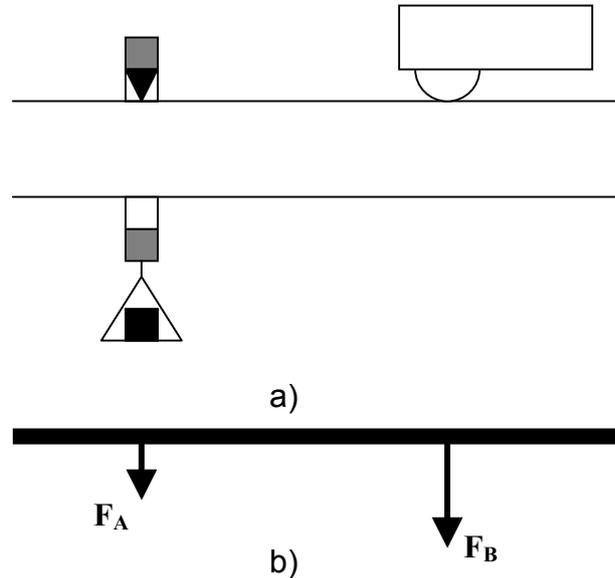


Fig. 1-40

- Contact linéique (sans adhérence) :

- Contact court $a < l/10$: image (fig. 1-41a) et modèle (fig. 1-41b) ;

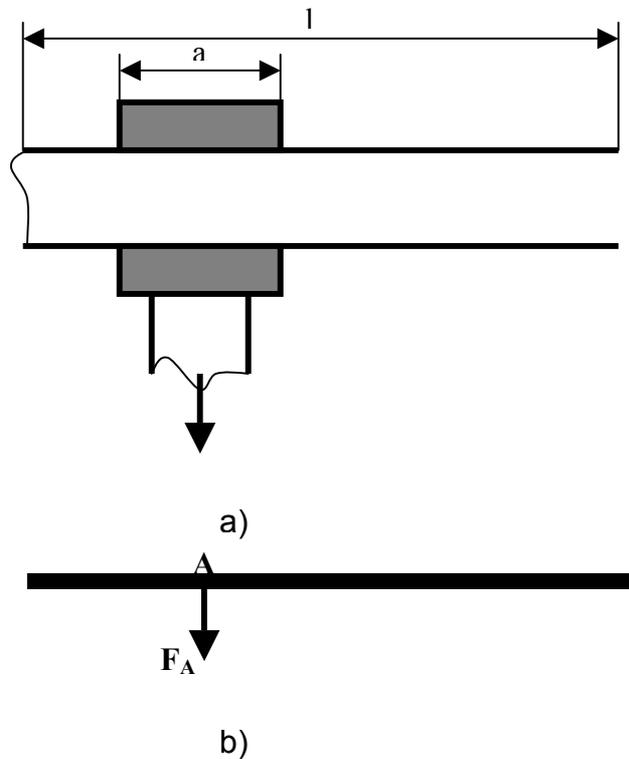


Fig. 1-41

- Actions réparties linéairement $a > l/10$: image (fig. 1-42a) et modèle (fig. 1-42b) ;

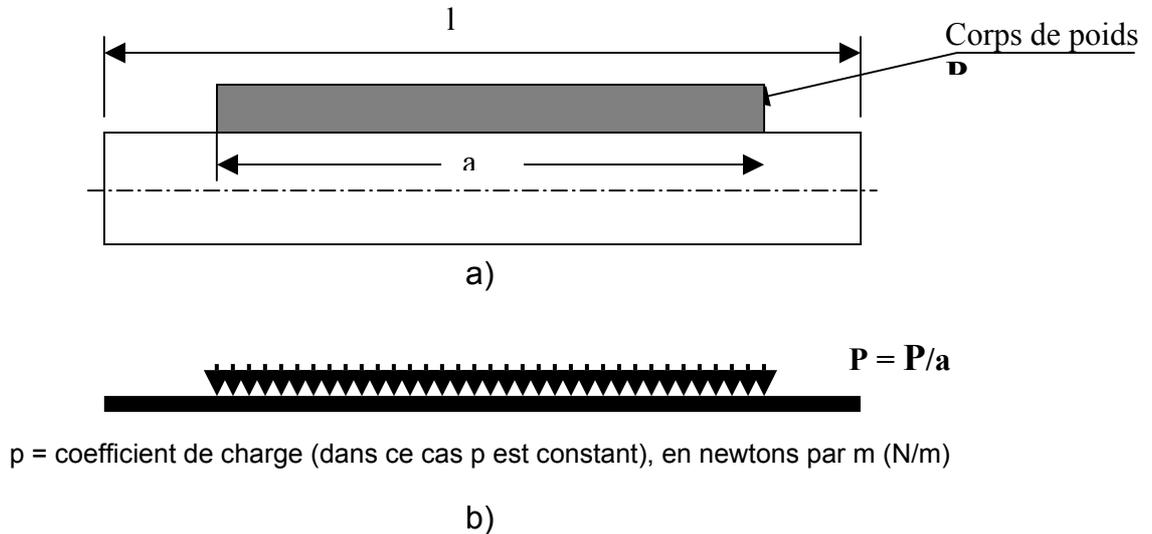
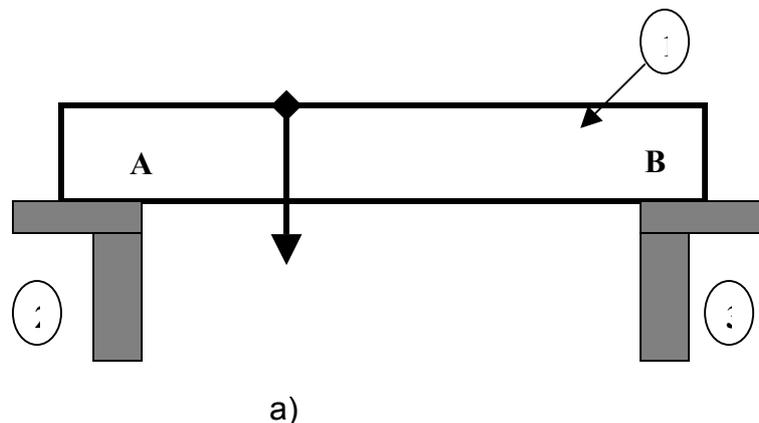


Fig. 1-42

b) Modélisation des liaisons

Lorsqu'on étudie l'équilibre et la déformation d'une poutre droite chargée de façon simple, c'est-à-dire dans le plan longitudinal de symétrie et perpendiculairement à la ligne moyenne, la nature des liaisons mécaniques de la poutre avec le milieu extérieur intervient aussi bien dans la détermination des sollicitations que dans l'étude des déformations. On doit modéliser convenablement les actions de liaisons (ou action des appuis).

- Appui simple : image (fig. 1-43a) et modèle (fig. 1-43b et c) ;



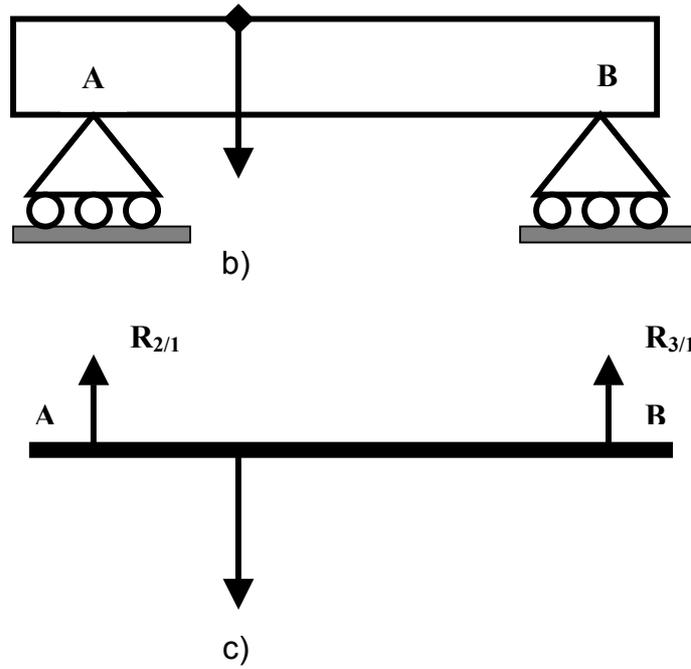


Fig. 1-43

- Articulation cylindrique : image (fig. 1-44a) et modèle (fig. 1-44b et c) ;

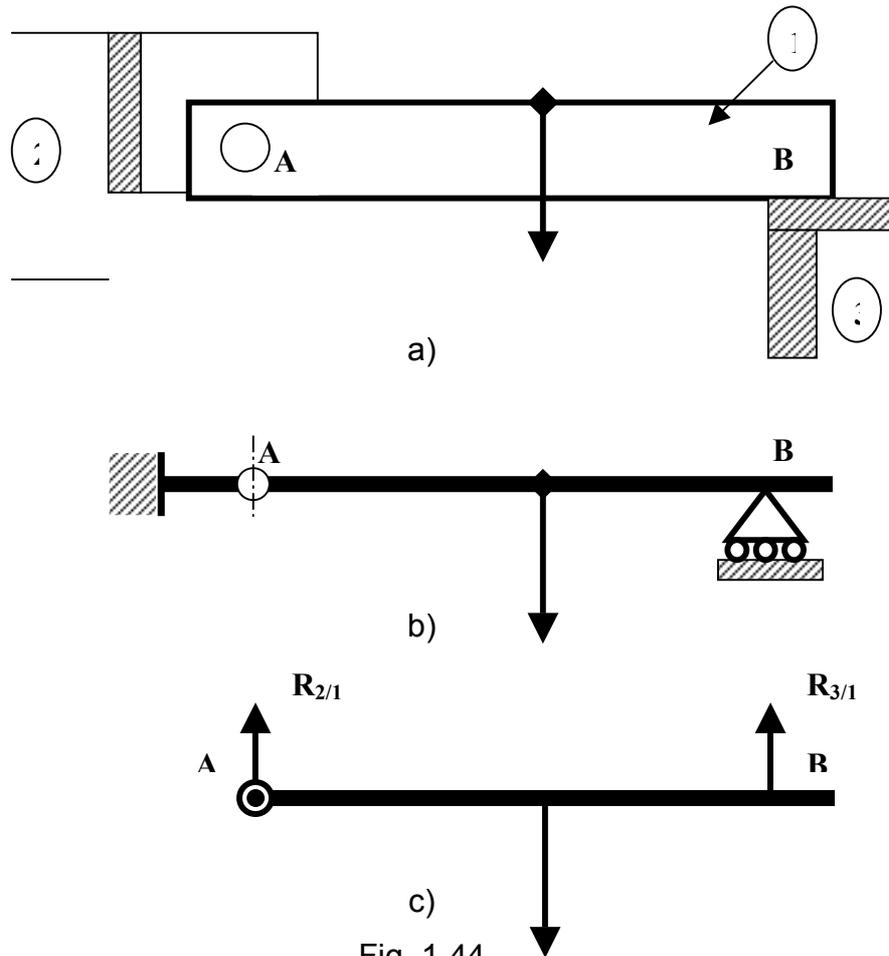


Fig. 1-44

- Encastrement parfait : image (fig. 1-45a) et modèle (fig. 1-45b) ;

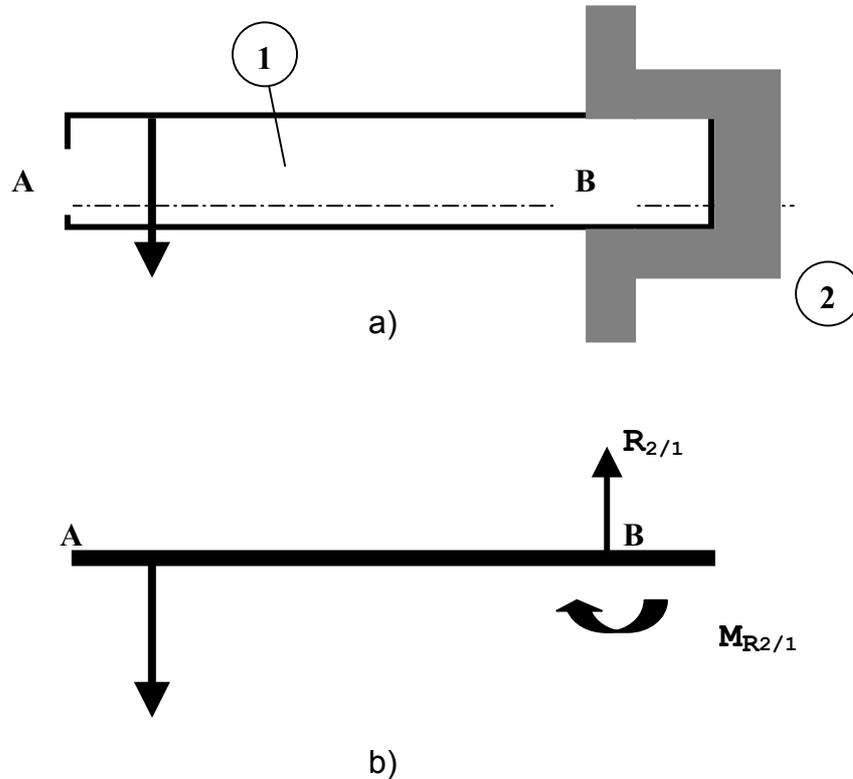


Fig. 1-45

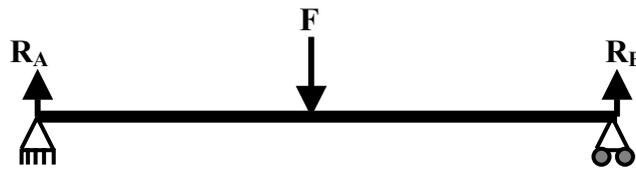
- c) Conditions de résistance à la flexion simple (poutre fléchie en équilibre isostatique ou hyperstatique)

Définitions :

- Une poutre est en équilibre isostatique lorsque le nombre des liaisons de la poutre avec le milieu extérieur est juste suffisant pour assurer son équilibre.
- Une poutre est en équilibre hyperstatique lorsque le nombre de liaisons de la poutre avec le milieu extérieur est supérieur au strict nécessaire pour maintenir l'équilibre.

Soit P le nombre de réactions inconnues et N le nombre d'équations d'équilibre (lois fondamentales) :

- Si $P - N = 0$, l'équilibre est dit *isostatique* (fig. 1-46) ;



Réactions inconnues : R_A et R_B donc $P = 2$

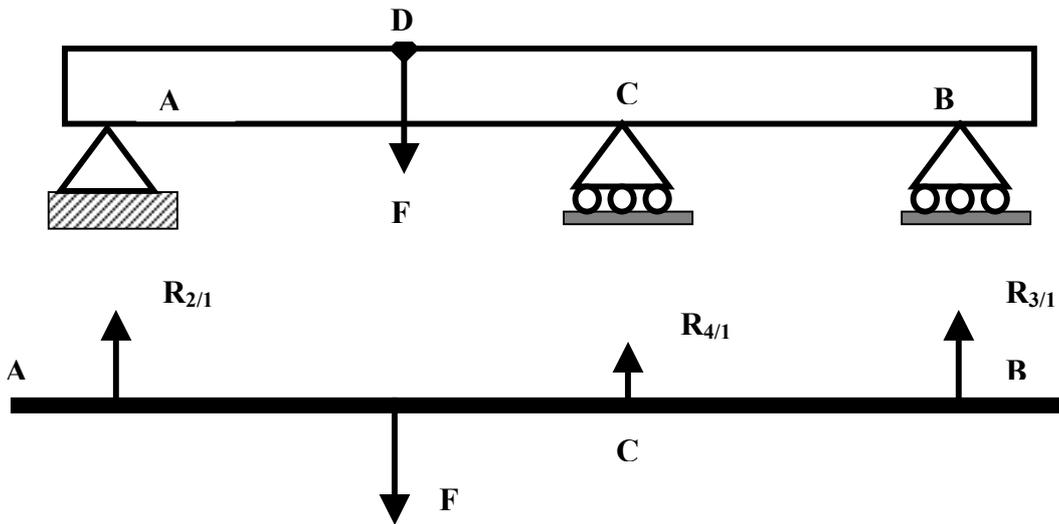
Equations d'équilibre $N = 2$: $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0} \Rightarrow R_A + R_B - F = 0$

$\sum \vec{M}_{Az}(\vec{F}_{\text{ext}}) = \vec{0} \Rightarrow F \cdot d - R_B \cdot l = 0$

Poutre en équilibre sur deux appuis simples

Fig. 1-46

- Si $P - N = 1$, l'équilibre est dit *hyperstatique* d'ordre 1 (fig. 1-47) ;



Réactions inconnues : R_A , R_B et R_C , donc $P = 3$

Equations d'équilibre $N = 2$: $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0} \Rightarrow R_A + R_B + R_C - F = 0$

$\sum \vec{M}_{Az}(\vec{F}_{\text{ext}}) = \vec{0} \Rightarrow F \cdot d - R_B \cdot l - R_C \cdot a = 0$

$P - N = 1$, l'équilibre de la poutre est hyperstatique d'ordre 1.

Poutre en équilibre sur trois appuis simples

Fig. 1-47

- Si $P - N = n$, l'équilibre est dit *hyperstatique* d'ordre n .

d) Effort tranchant et moment de flexion

- Repères utilisés en RDM

On considère une poutre reposant sur deux appuis simples sans adhérence et supportant une charge F concentrée en C (fig. 1-48).

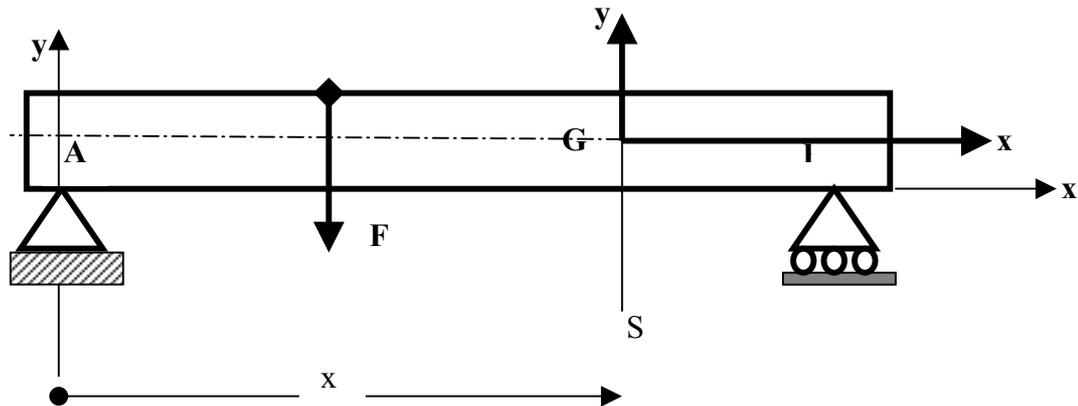


Fig. 1-48

Soit une section droite S et soit G son centre de gravité. Le repère (A, x, y, z) permet de repérer sans ambiguïté la section S . Ce repère est appelé *repère de position*. C'est également dans ce repère que se résolvent les équations d'équilibre de la poutre.

Le repère (G, x, y, z) d'origine G , centre de gravité, S considérée tel que Gx soit la normale extérieur en G , permet de connaître les éléments de réduction du système de forces extérieures situées d'un même côté de S . Ce repère est appelé *repère de projection*.

- Effort tranchant et moment fléchissant

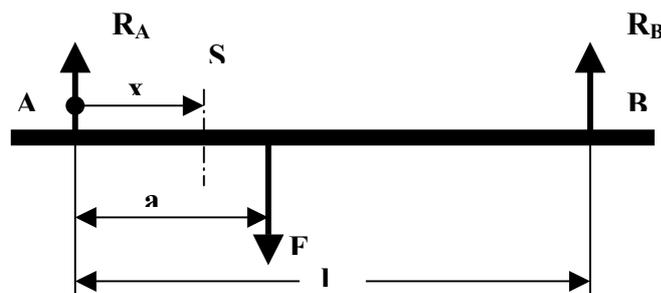


Fig. 1-49

Définitions :

- L'effort tranchant T_y dans une section S de la poutre est la somme algébrique de tous les efforts extérieurs situés à gauche de S .
- Le moment fléchissant dans M_{fz} est la somme algébrique des moments par rapport à Gz (G est le centre de section S) de tous les efforts extérieurs situés à gauche de S .

Application : Etude du cas de la poutre (fig. 1-49)

Les équations de l'équilibre dans le repère (A, x, y, z) sont :

$$R_A = F \cdot (1 - a/l) \quad \text{et} \quad R_B = F \cdot a/l$$

Pour $0 < x < a$, le système de force à gauche de S se réduit à R_A

$$T_y = R_A$$

$$M_{fz} = - R_A \cdot x$$

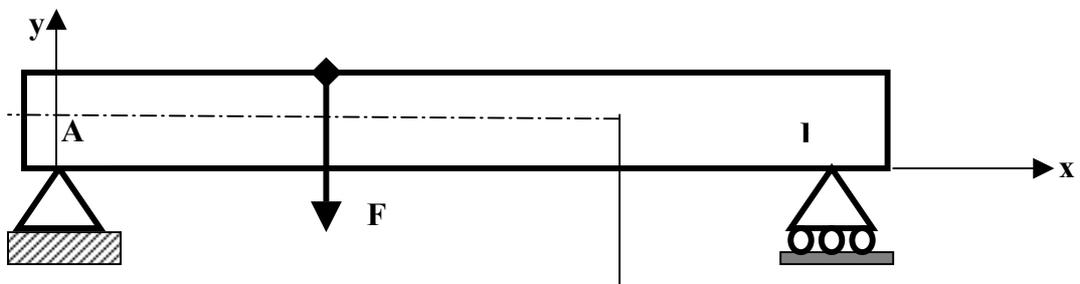
Pour $a < x < l$:

$$T_y = R_A - F$$

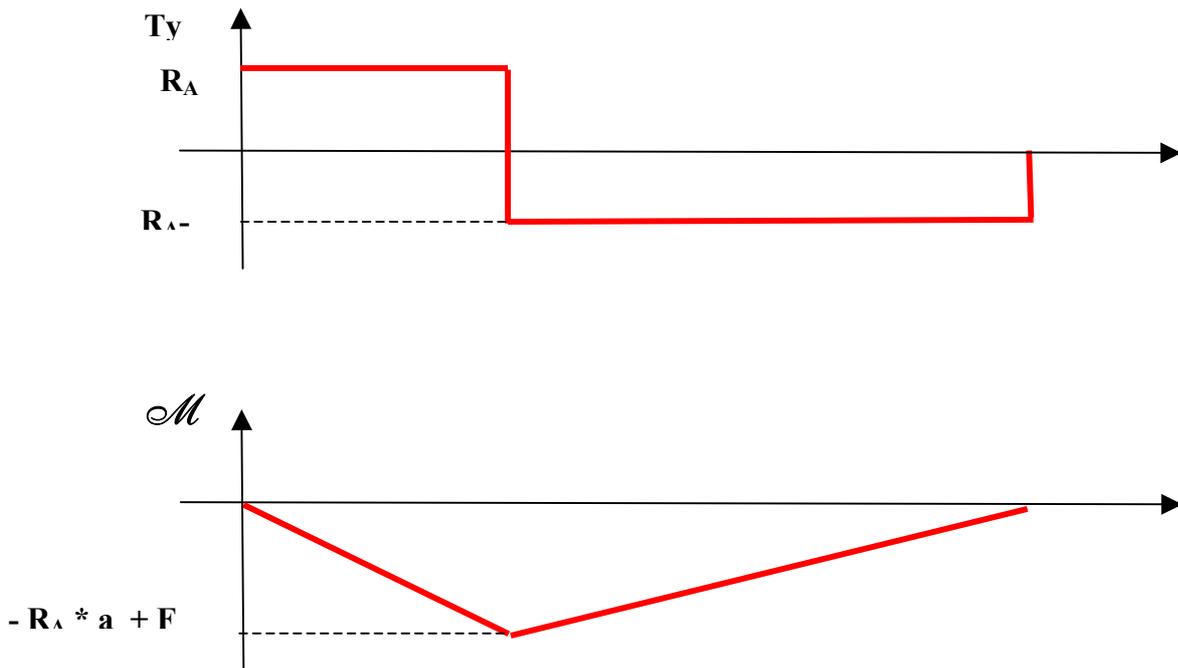
$$M_{fz} = - R_A \cdot x + F \cdot (x - a)$$

- Diagramme des efforts tranchants et moments fléchissants

Les diagrammes représentent les graphiques des fonctions $T_y(x)$ et $M_{fz}(x)$ (fig. 1-50b).



a)



b)

Fig. 1-50

e) *Etude de la déformée*

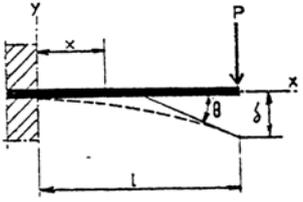
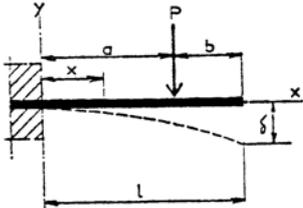
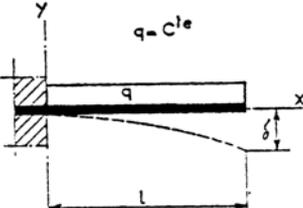
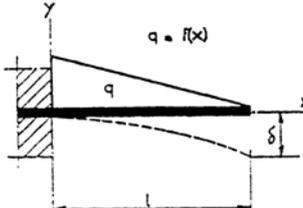
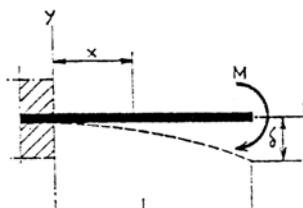
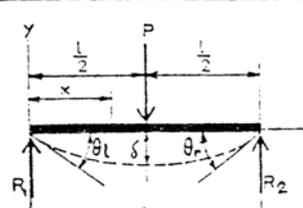
Cette étude permet de donner l'équation de la déformée de la poutre sous la forme $y = f(x)$. Elle est principalement basée sur la résolution de l'équation différentielle suivante :

$$M_r = E \cdot I \cdot y''$$

Il faut alors procéder à deux intégrations successives. Les constantes d'intégration sont obtenues grâce aux conditions aux limites (appuis, encastremets, etc.), comme par exemple :

Appui simple	$y = 0$	
Encastrement	$y = 0$	$y' = 0$

Les tableaux suivants donnent les efforts tranchants et le moment fléchissant et la flèche pour chaque type de sollicitation.

Type de poutre	Moment réel maximal	Pente en extrémité en radians	Equation de la flèche (sens positif vers le bas)	Flèche maximale
	$M_e = - Pl$	$\theta = \frac{Pl^2}{2EI}$	$EIv = \frac{Px^3}{6} (3l - x)$	$\delta = \frac{Pl^3}{3EI}$
	$M_e = - Pa$	$\theta = \frac{Pa^2}{2EI}$	$EIv = \frac{Px^3}{6} (3a - x)$ pour $0 < x < a$. $EIv = \frac{Pa^3}{6} (3x - a)$ pour $a < x < l$.	$\delta = \frac{Pa^3}{6EI} (3l - a)$
	$M_e = - \frac{ql^2}{2}$	$\theta = \frac{ql^2}{6EI}$	$EIv = \frac{qx^3}{24} (6l^2 - 4lx + x^2)$	$\delta = \frac{ql^4}{8EI}$
	$M_e = - \frac{ql^2}{6}$	$\theta = \frac{ql^2}{24EI}$	$EIv = \frac{qx^3}{120l} (10l^2 - 10l^2x + 5lx^2 - x^3)$	$\delta = \frac{ql^4}{30EI}$
	$M_e = - M_e$	$\theta = \frac{Ml}{EI}$	$EIv = \frac{Mx^2}{2}$	$\delta = \frac{Ml^2}{2EI}$
	$M_e = \frac{Pl}{4}$	$\theta_l = \theta_r = \frac{Pl^2}{16EI}$	$EIv = \frac{Px}{12} (\frac{3}{4}l^2 - x^2)$ pour $0 < x < \frac{l}{2}$	$\delta = \frac{Pl^3}{48EI}$

Type de poutre	Moment réel maximal	Pente en extrémité en radians	Équation de la flèche (sens positif vers le bas)	Flèche maximale
	$M_m = \frac{Pab}{l}$ à $x = a$	$\theta_1 = \frac{Pb(l^2 - b^2)}{6EI}$ $\theta_r = \frac{Pa(l^2 - a^2)}{6EI}$	$EIv = \frac{Pbx}{6l}(l^3 - x^3 - b^3)$ pour $0 < x < a$. $EIv = \frac{Pb}{6l} \left[\frac{l}{b}(x-a)^3 + (l^3 - b^3)x - x^3 \right]$ pour $a < x < l$.	$\delta = \frac{Pb(l^2 - b^2)^{3/2}}{9\sqrt{3}EI}$ à $x = \sqrt{\frac{l^3 - b^3}{3}}$ $\delta = \frac{Pb}{48EI}(3l^3 - 4b^3)$ pour $a > b$ la flèche n'est pas maxi au milieu de l .
	$M_m = \frac{ql^2}{8}$	$\theta_1 = \theta_r = \frac{ql^2}{24EI}$	$EIv = \frac{qx}{24}(l^3 - 2lx^2 + x^3)$	$\delta = \frac{5ql^4}{384EI}$
	$M_m = \frac{ql^2}{9\sqrt{3}}$	$\theta_1 = \frac{7ql^2}{360EI}$ $\theta_r = \frac{8ql^2}{360EI}$	$EIv = \frac{qx}{360l}(7l^4 - 10l^2x^2 + 3x^4)$	$\delta = \frac{25ql^4}{384EI}$ la flèche n'est pas maxi au milieu de l .
	$M_m = \frac{ql^2}{12}$	$\theta_1 = \theta_r = \frac{5ql^2}{192EI}$	$EIv = \frac{qx}{960l}(25l^4 - 40l^2x^2 + 16x^4)$ pour $0 < x < \frac{l}{2}$	$\delta = \frac{ql^4}{120EI}$
	$M_m = M$	$\theta_1 = \frac{Ml}{6EI}$ $\theta_r = \frac{Ml}{3EI}$	$EIv = \frac{Mx}{6} \left(1 - \frac{x^2}{l^2} \right)$	$\delta = \frac{Ml^3}{9\sqrt{3}EI}$ à $x = \frac{l}{\sqrt{3}}$ la flèche n'est pas maxi au milieu de l . $\delta = \frac{Ml^3}{16EI}$
	$M_m = M$	$\theta_1 = \frac{Ml}{3EI}$ $\theta_r = \frac{Ml}{6EI}$	$EIv = \frac{Mx}{6l}(l-x)(2l-x)$	$\delta = \frac{Ml^3}{9\sqrt{3}EI}$ à $x = l - \frac{l}{\sqrt{3}}$ la flèche n'est pas maxi au milieu de l . $\delta = \frac{Ml^3}{16EI}$

1.4. Essais mécaniques

Les essais, en laboratoire ou sur le terrain, apportent des renseignements précis et fiables sur la qualité et les performances d'un matériau. Il en existe un grand nombre ; des normes internationales règlent la plupart.

Principaux essais : essais mécaniques (traction, dureté, résilience, fatigue, fluage...), essais pour la productique (emboutissage, pliage, usinabilité...), essais sur les surfaces (abrasion, rayures, rugosité, adhérence...), essais sur les fluides (viscosité, écoulements...), essais non destructifs (radiographie, ultrasons, magnétoscopie, acoustique d'étanchéité, ressuage...).

1.4.1. Définitions préliminaires

Homogénéité : un matériau est homogène s'il possède, en tous points, les mêmes propriétés chimiques et physiques. La plupart des métaux et des alliages sont considérés comme homogènes. Le bois et les composites ne le sont pas, ils sont hétérogènes.

Contraintes (unités : N/mm² ou MPa) : elles caractérisent par des indications chiffrées les efforts de cohésion qui existent entre les grains de matière. On trouve des contraintes normales, ou de tension, ayant pour symbole σ (sigma) et des contraintes de cisaillement, ayant- pour symbole τ (tau).

Déformations : elles résultent et varient avec les charges appliquées sur les objets. Elles sont mises en évidence par la variation des dimensions, et peuvent être élastiques ou plastiques. (*Exemples* : allongement, raccourcissement, fléchissement, torsion, glissement).

Isotropie : un matériau est isotrope s'il présente les mêmes caractéristiques mécaniques dans toutes les directions de la matière. Les métaux et les alliages sont généralement isotropes. Les matières plastiques, les matériaux composites et

le bois ne sont pas isotropes. Le bois est plus résistant dans le sens des fibres que dans le sens perpendiculaire aux fibres.

Elasticité : elle caractérise l'aptitude qu'a un matériau à reprendre sa forme et ses dimensions initiales après avoir été déformé. Un ressort, chargé normalement, a un comportement élastique. La propriété contraire est la plasticité.

Plasticité : un matériau qui ne reprend pas sa forme et ses dimensions initiales après avoir été déformé est dit plastique. La pâte à modeler a un comportement plastique. La plupart des métaux et des alliages ont un comportement élastique sous charges modérées et plastique sous charges excessives.

Ductilité : c'est l'aptitude qu'a un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre. Elle est caractérisée par l'allongement pour cent A% (plus A% est grand, plus le matériau est ductile).

- Si $A \% \geq 5 \%$ les matériaux sont considérés comme ductiles.
- Si $A \% < 5 \%$ les matériaux sont considérés comme fragiles ou «cassants».
- Z% (striction) et K (résilience) sont également des indicateurs.

La ductilité est une propriété déterminante pour les matériaux devant être déformés à froid (emboutissage, pliage...).

Malléabilité : cette propriété est identique à la ductilité mais appliquée à la compression. L'aluminium, le cuivre, l'or, certains laitons et certains aciers inoxydables sont très malléables ($A \% > 35 \%$) et acceptent des emboutissages profonds.

1.4.2. Essai de traction

C'est l'essai le plus classique, qui consiste à exercer sur une éprouvette normalisée (pièce de dimensions normalisées fabriquée dans le matériau à tester), cylindrique ou parallélépipédique (plate), deux forces égales et opposées qui vont la déformer progressivement puis la rompre.

Principe : L'essai est réalisé sur une machine de traction (fig. 1-51). On applique progressivement et lentement (sans choc) à une éprouvette cylindrique de formes et de dimensions normalisées (fig. 1-52a et b), un effort de traction croissant.

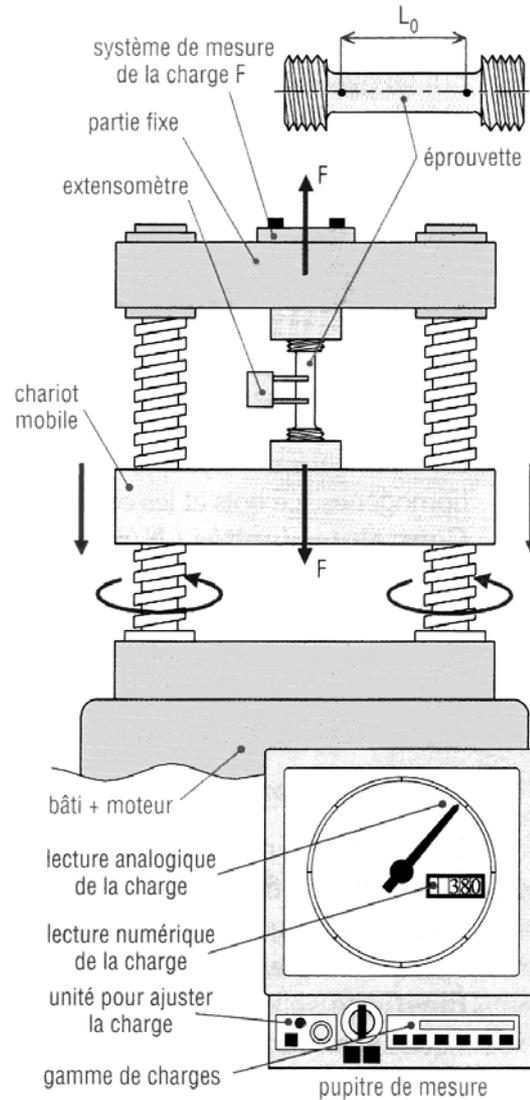
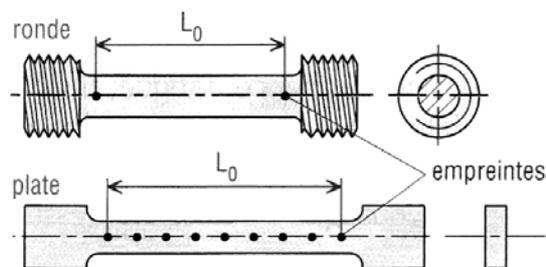
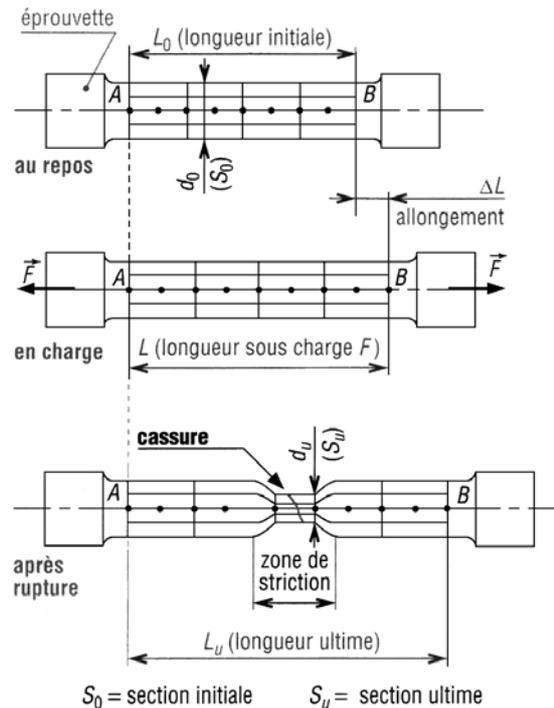


Fig. 1-51



a)



b)

Fig. 1-52

Caractéristiques mesurées :

- Les deux points A et B sont situés sur l'éprouvette.
- L_0 : Longueur initiale de l'éprouvette au repos (sans charge).
- L : Longueur de l'éprouvette mesurée sous charge F .
- F : Force exercée par la machine d'essai sur l'éprouvette.

Résultats de l'essai : Les grandeurs fondamentales définies par l'essai de traction sont les suivantes :

Résistance élastique : $R_e = \frac{F_e}{S_0}$ $\left\{ \begin{array}{l} F_e \text{ en N} \\ S_0 \text{ en mm}^2 \\ R_e \text{ en MPa} \end{array} \right.$

Résistance à la rupture : $R_r = \frac{F_r}{S_0}$

Allongement pour cent : $A\% = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%$,

Où : L_u : Longueur ultime après rupture

Module d'élasticité longitudinal : $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$, avec $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ et $\sigma = \frac{F}{S}$ (loi de Hooke)

Coefficient de striction : $Z\% = 100 \frac{S_u - S_0}{S_0}$

Module d'élasticité transversal : $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, avec ν = coefficient de Poisson

Courbes de contraintes et déformations typiques : Pour un grand nombre de matériaux, comme les métaux et les alliages, les courbes obtenues (fig. 1-53) présentent une zone, appelée domaine élastique, où le graphe est une droite (segment OA). Pour tous les points de cette droite, la déformation, ou l'allongement, est proportionnelle à la contrainte, ou à l'effort exercé, et le matériau (l'éprouvette) est parfaitement élastique (se comporte comme un ressort parfait).

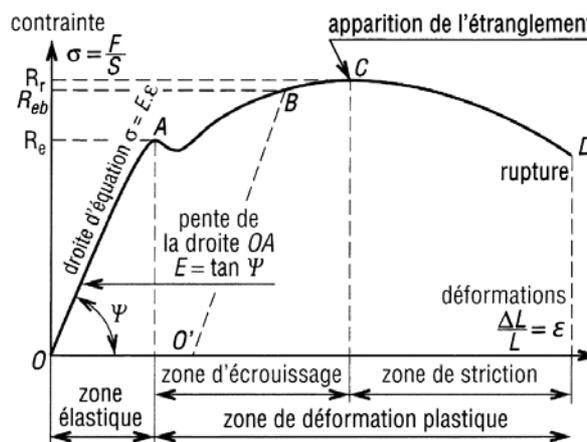


Fig. 1-53

Module d'élasticité longitudinale E (N/mm^2) : il caractérise la pente de la droite de proportionnalité précédente et l'élasticité du matériau testé. Plus E est grand, plus le matériau est rigide et inversement.

Exemples : $E_{acier} = 200\ 000\ N/mm^2$, $E_{élastomères} = 1\ N/mm^2$.

Loi de Hooke ($\sigma = E\varepsilon$) : cette loi, ou équation de la droite QA, traduit la proportionnalité précédente (σ en N/mm^2 , E en N/mm^2 et ε sans unité). Elle est à la résistance des matériaux ce qu'est la loi d'Ohm à l'électricité.

Limite élastique R_e (N/mm^2) : elle marque la fin du domaine élastique (« point A »). Pour les valeurs supérieures le matériau ne se déforme plus élastiquement mais plastiquement (l'éprouvette ne retrouve plus ses dimensions initiales après déchargement, il subsiste un allongement permanent).

Limite conventionnelle d'élasticité $R_{e0,2}$ ou $R_{p0,2}$ (N/mm^2) : Variante de la précédente (R_e), elle tient compte des imprécisions de la mesure, c'est-à-dire des imperfections de la droite OA et des appareils de mesure (fig. 1-54). Pour la mesure de R_e on tolère une légère déformation permanente de 0,2 % ($A\% = 0,2$).

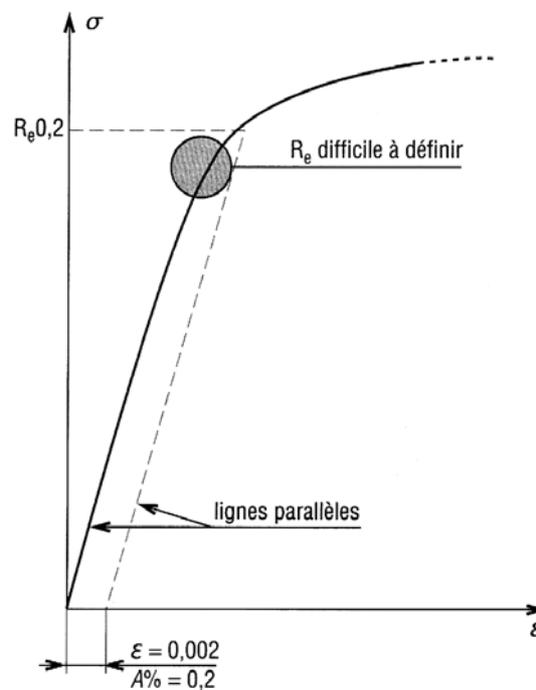


Fig. 1-54

Phénomène d'écrouissage : Surtout employé en compression, il permet d'augmenter la limite élastique R_e sans modifier la résistance à la rupture R_r . Dans un premier temps le matériau est déformé plastiquement (avant point de striction C : chemin OAB). Au relâchement le déchargement se fait suivant la droite BO', parallèle à QA (fig. 1-53).

À la remise en charge la nouvelle courbe caractéristique du matériau est devenu O'BC avec R_{eb} comme nouvelle limite élastique.

1.4.3. Essai de résilience NF EN 10045 - 1

La résilience, de symbole général K , caractérise la capacité d'un matériau à absorber les chocs sans se rompre ; ce risque est amplifié aux basses températures.

Elle est mesurée sur des machines du type Charpy (fig. 1-54a) avec une éprouvette sur deux appuis (fig. 1-54b) ou Izod (éprouvette encastrée). Une jauge peut être collée sur le couteau (courbes : force - déplacement). L'essai, qui est un essai comparatif entre matériaux, mesure l'énergie qu'il faut fournir à un pendule pesant pour briser une éprouvette entaillée du matériau à tester.

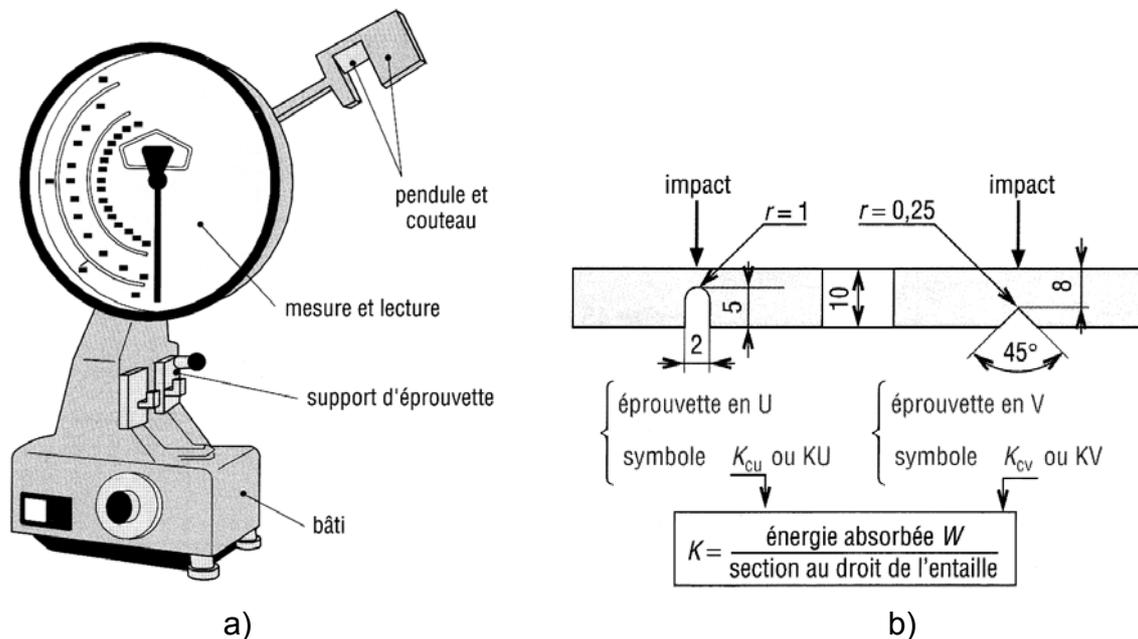


Fig. 1-54

L'énergie absorbée par l'éprouvette (W) est égale à la différence des énergies potentielles du pendule entre le départ ($W_0 = P \cdot h_0$) et l'arrivée ($W_1 = P \cdot h_1$) avec une vitesse d'impact $V = \sqrt{2gL(1 - \cos \alpha)}$ (fig. 1-55) :

$$W = P \cdot h_0 - P \cdot h_1 = P \cdot (h_0 - h_1)$$

La résilience est égale au rapport de W sur l'aire de la section au droit de l'entaille (fig. 1-54a).

Exemple : $KV = 121$ (pour énergie nominale 300 J ; entaille V ; énergie absorbée 121 J).

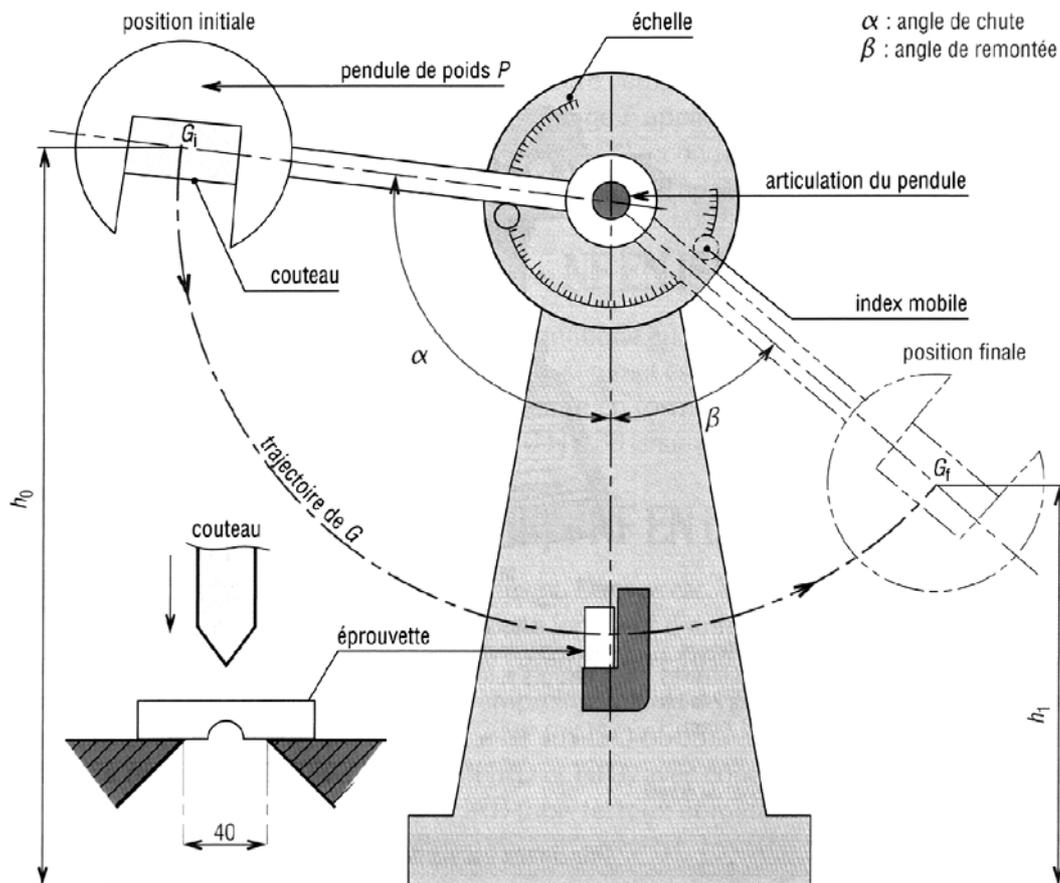


Fig. 1-55

1.4.4. Essai de dureté

La dureté, de symbole général H , caractérise la capacité d'un matériau à résister au marquage (empreintes, rayures...), à l'usure et à l'érosion. Elle peut être évaluée en mesurant une empreinte laissée en surface par un poinçon agissant sous l'action d'une force connue (essais Brinell, Vickers et Rockwell) mais aussi par une hauteur de rebondissement d'un objet très dur sur la surface à tester (essai Shore pour élastomères et plastiques) (fig. 1-56).

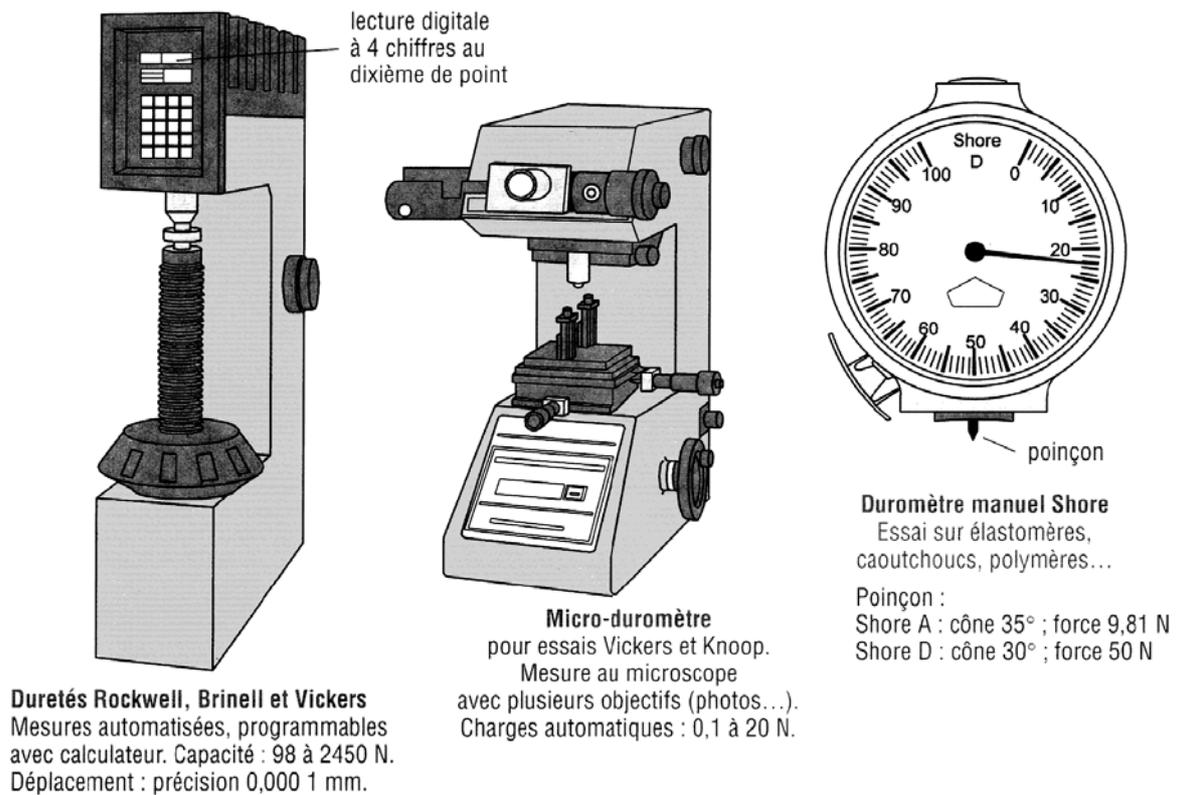


Fig. 1-56

- Dureté Brinell (symbole HBW) - NF EN ISO 6506 (fig. 1-57)

essai	symbole s	principe et conduite de l'essai	
Brinell HB	HBW	<p>bille $\varnothing d$ en carbure</p> <p>surface</p> <p>$\varnothing a$</p>	$HBW = \frac{0,102 \times F}{S}$ <p>avec</p> $S = \frac{\pi d}{2} (d - \sqrt{d^2 - a^2})$ <p>(F en N, a et d en mm) 0,981 ≤ F ≤ 2 942 daN</p>

Fig. 1-57

Principe : Il consiste à imprimer dans le métal étudié, une bille d'acier très dur de diamètre D sous l'action d'une charge F . D et F dépendent du matériau à essayer. Les valeurs les plus courantes sont $D = 10$ mm et $F = 29\,420$ N, elles sont utilisées surtout pour les essais des métaux ferreux et des bronzes. Après essai, on mesure

l'empreinte laissée par une bille en carbure (diamètre : 1–2, 5–5–10 mm) et la valeur de la charge F appliquée pour obtenir cette empreinte.

Exemple : F 3000 daN, $d = 10$ mm, pendant 20 secondes, symbole HBW 10/3000/20.

Utilisation : tous métaux (Norme NF EN ISO 6506) ; temps d'application 2 à 8 s ; maintien 10 à 15 s.

Application :

H 2,5 – 1 840 – 15

$D = 2,5$ mm ; $F = 1\,840$ N ; durée 15 s.

Mesure : Diamètre (d) de l'empreinte.

Résultat : La dureté Brinell HB est un nombre proportionnel au rapport :

$$\frac{F \text{ (charge en N)}}{S \text{ (aire de l'empreinte en mm}^2\text{)}}$$

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

Remarques :

- L'empreinte laissée par la bille est importante : $d \approx 3$ mm.
- La dureté du matériau doit être inférieure à celle de la bille (la solution est déconseillée si $HB \geq 250$).
- L'épaisseur $e \geq 10 h$ pour éviter les déformations.
- L'essai de traction est destructif, il faut prélever sur la pièce un échantillon. L'essai de dureté n'est pas destructif.
- Pour les aciers non alliés la dureté Brinell est liée à la résistance à la traction par la relation :

$$R_m = 3,5 HB$$
$$N / mm^2$$

- Domaine d'utilisation : Pièces brutes de laminage ou de moulage.

- Dureté Vickers (symbole HV) - NF EN 150 6507 (fig. 1-58)

essai	symbole s	principe et conduite de l'essai									
Vickers HV	HV 100	<table border="1" style="margin: 10px auto;"> <tr> <td>HV</td> <td>HV 100</td> <td>HV 50</td> <td>etc.</td> </tr> <tr> <td>F (N)</td> <td>980,7</td> <td>490,3</td> <td>...</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">pour HV 100, F = 100 kg</p>	HV	HV 100	HV 50	etc.	F (N)	980,7	490,3	...	$HV = 0,189 \frac{F}{d^2}$ avec $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ <p>(F en N, d_1 et d_2 en mm)</p> <p>Variante : essai Knoop</p> <p>$d_1 = 7,1$ d_2 HK = 14,2</p> <p>F/d_1^2</p> <p>angle 172,5°</p>
	HV		HV 100	HV 50	etc.						
	F (N)		980,7	490,3	...						
	HV 50										
	HV 30										
	HV 20										
	HV 10										
HV 5											
...											
HV 0,01											

Fig. 1-58

Principe : Il consiste à imprimer dans le métal étudié un pénétrateur de diamant en forme de pyramide à base carrée, d'angle au sommet de 136°, sous l'action d'une charge F. La dureté du matériau est fonction de la grandeur de l'empreinte laissée par le pénétrateur.

Exemple : 640 HV 30 (charge 294,2 N; 10 à 15 s ; dureté 640).

On mesure la diagonale de l'empreinte à l'aide d'un microscope spécial puis on calcule l'aire de la pyramide à base carrée :

$$S = \frac{d^2}{2 \sin \frac{136^\circ}{2}}$$

Charge à utiliser : Elle peut varier de 49 N à 981 N ; la charge d'essai normale est de 294 N.

Durée du maintien de la charge : 10 à 15 s.

Résultat :

Dureté Vickers :
$$HV = \frac{F \text{ (charge en N)}}{S \text{ (aire en mm}^2\text{)}} = \frac{2 F \sin 136^\circ / 2}{d^2}$$

Utilisation : tous métaux.

Variante : essai Knoop (micro dureté, empreinte en forme de losange, matériaux durs pour petites pièces et fines sections).

- Dureté Rockwell (symbole HR) - NF EN 150 6508 (fig. 1-59)

essai	symbole s	principe et conduite de l'essai
Rockwell HR	HRA	
	HRC	
	HRD	
	HRB	
	HRE	
	HRF	
	HRG	
	HRH	
	HRK	
	etc.	

Fig. 1-59

Principe : C'est l'essai de dureté le plus connu mondialement. Il consiste à imprimer en deux étapes un pénétrateur, **bille d'acier** ou **cône de diamant**, dans le matériau à tester en exerçant deux charges d'intensité connue F_0 et F_1 .

Dans ce cas, la dureté, contrairement à Brinell et Vickers, est obtenue par lecture directe d'une longueur d'enfoncement d'un pénétrateur, bille acier, (S : exemple 60 HRBS) ou carbure (W : exemple 60 HRBW) et cône diamant (A, C, D, et N). Une précharge (F_0) permet de faire une empreinte initiale et, par là, d'éliminer les incertitudes propres aux défauts de la surface (norme NF EN ISO 6508).

- **Essai au cône de diamant** : Angle au sommet 120° est utilisé pour le contrôle de la dureté des matériaux durs $HB > 250$ ($R_m > 900 \text{ N/mm}^2$). L'empreinte doit être réalisée sur une surface propre. **Résultat** : Dureté HRC.

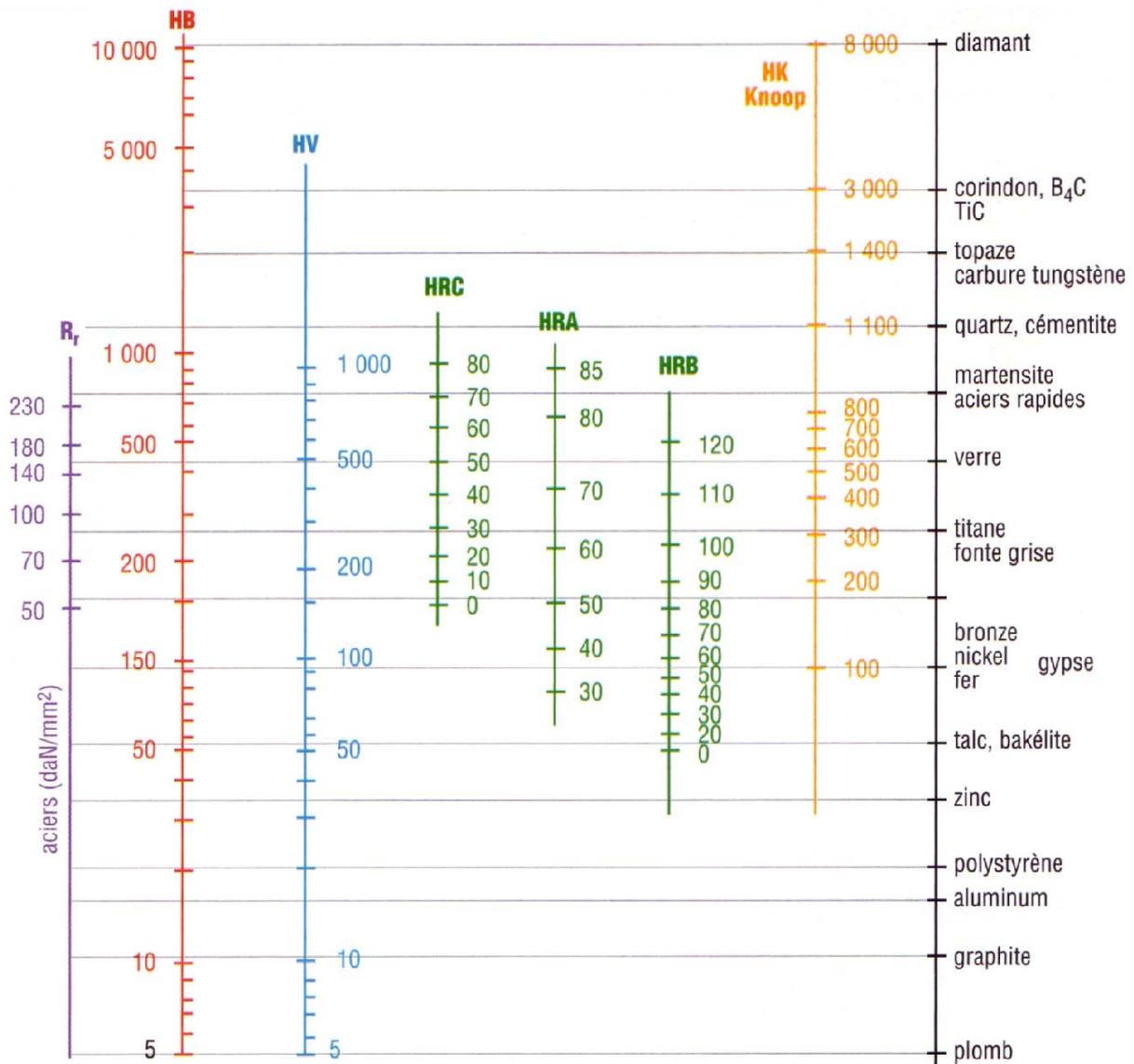


Fig. 1-60

- **Essai à la bille** : Différents diamètres de billes sont utilisés, le plus courant pour les alliages de Fe, Al, Cu, est celui de 1,58 mm. L'essai à la bille n'est pas recommandé si $HB \geq 250$. L'empreinte peut être réalisée sur une surface brute (mais exempte d'oxydation). **Résultat** : Dureté HRB.

Echelles de mesure : Pour les différents types d'essais (fig. 1-60) on peut effectuer des comparaisons indicatives des échelles de dureté usuelles (voir NF EN ISO 18205) : HRC (ferreux), HRD et HRA avec cônes (pour matériaux durs et très durs : carbures, aciers trempés...) ; HRB (non ferreux et métaux en feuilles) ; HRE, HRF, HRG (métaux doux) ; HR15N, HR30N, HR45N, HR15T, HR30T, HR45T (plastiques...).

1.4.5. Essai de fluage

La déformation continue des objets, avec le temps, sous l'action d'efforts appliqués constants est appelée **fluage**. L'essai de fluage est un essai de traction, à chaud ou non, souvent de très longue durée (milliers d'heures). La rupture par fluage se produit, après un temps long, sous des charges constantes bien inférieures aux limites usuelles du matériau (R_r ou R_e).

Ce phénomène est observé dans les systèmes travaillant pendant de longues durées (10, 20 ans...) ou dans les machines travaillant à températures élevées, comme les chaudières, les moteurs d'avion ou les aubes de turbine. La chaleur accentue fortement le phénomène. Certains matériaux (matières plastiques...) sont sensibles au fluage à température ambiante.

1.4.6. Essai de fatigue ou d'endurance

- **Phénomène de fatigue** : Il est de première importance sur les structures d'avions et dans de nombreux autres domaines (roulements, engrenages, arbres de transmission...). Une roue de voiture mal équilibrée est un exemple de système soumis à un phénomène de fatigue ; un effet de résonance peut l'amplifier. La rupture peut se produire, après un certain nombre de cycles ou allers et retours, sous des efforts bien inférieurs aux limites usuelles du matériau (R_r et R_e).
- **Essai de fatigue** : C'est un essai statistique dans la mesure où des éprouvettes identiques, sous les mêmes conditions d'essai, donnent des

résultats différents. Il y a trois types d'essais de fatigue : traction compression (fig. 1-61a), torsion alternée (fig. 1-61b) et flexion alternée « le plus classique » (fig. 1-61c). L'éprouvette est soumise à un couple de flexion pure alternée M_f (fig. 1-62).

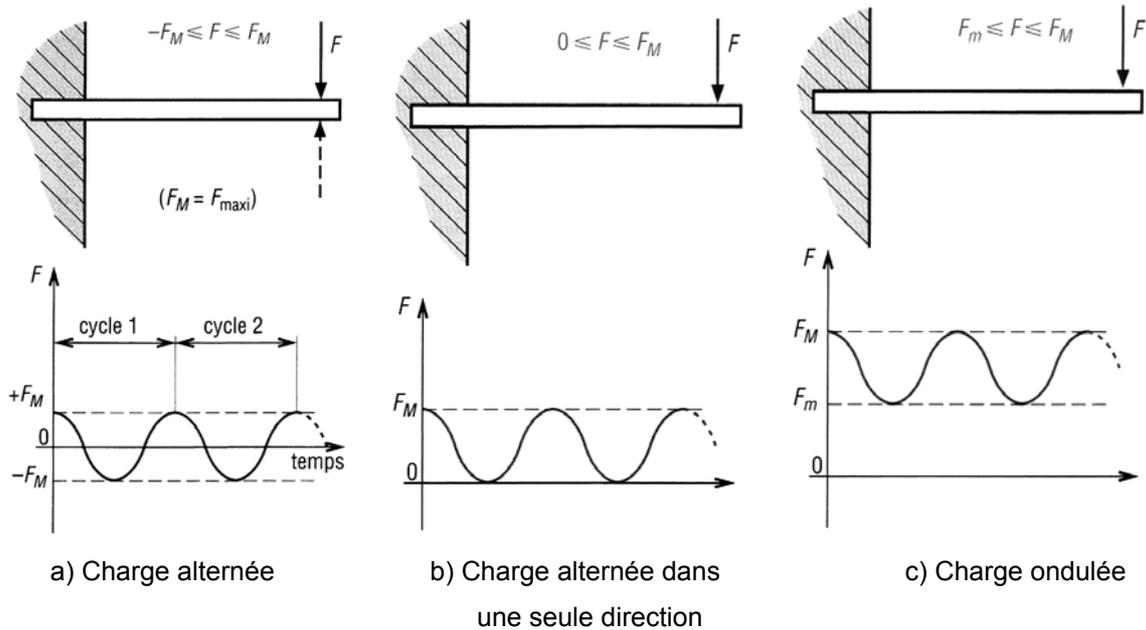
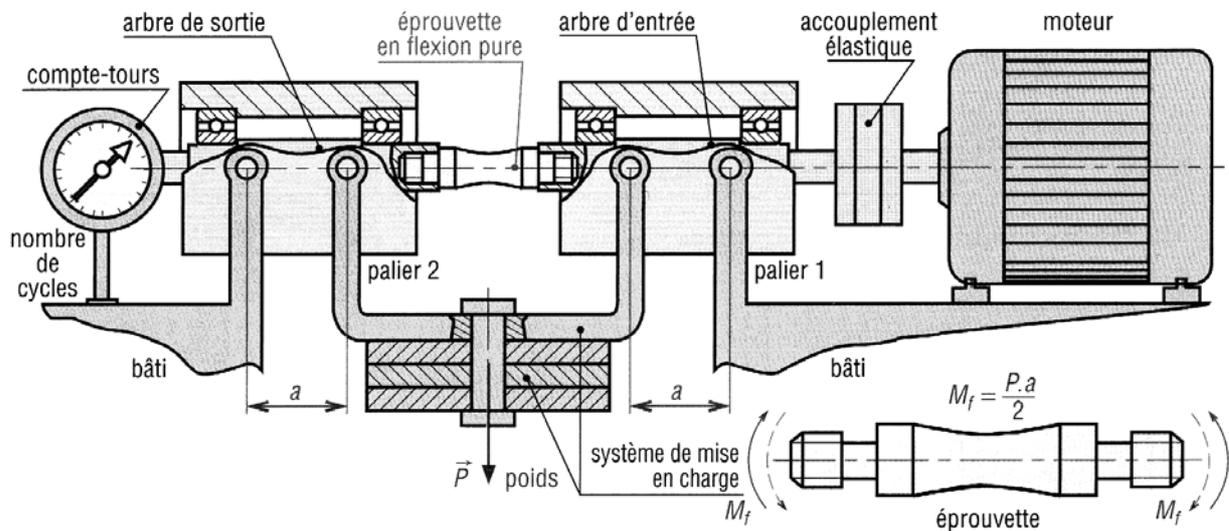


Fig. 1-61

Il y a une répartition statistique des résultats autour d'une valeur moyenne ou médiane. Cette valeur moyenne, une fois déterminée, est choisie comme représentative de la capacité du matériau (analogie avec la durée de vie des roulements).



Essai de fatigue en flexion rotative (machine de Moore) ou flexion alternée

Fig. 1-62

Les courbes d'endurance ou de Wolher sont représentatives pour les différents matériaux (fig. 1-63).

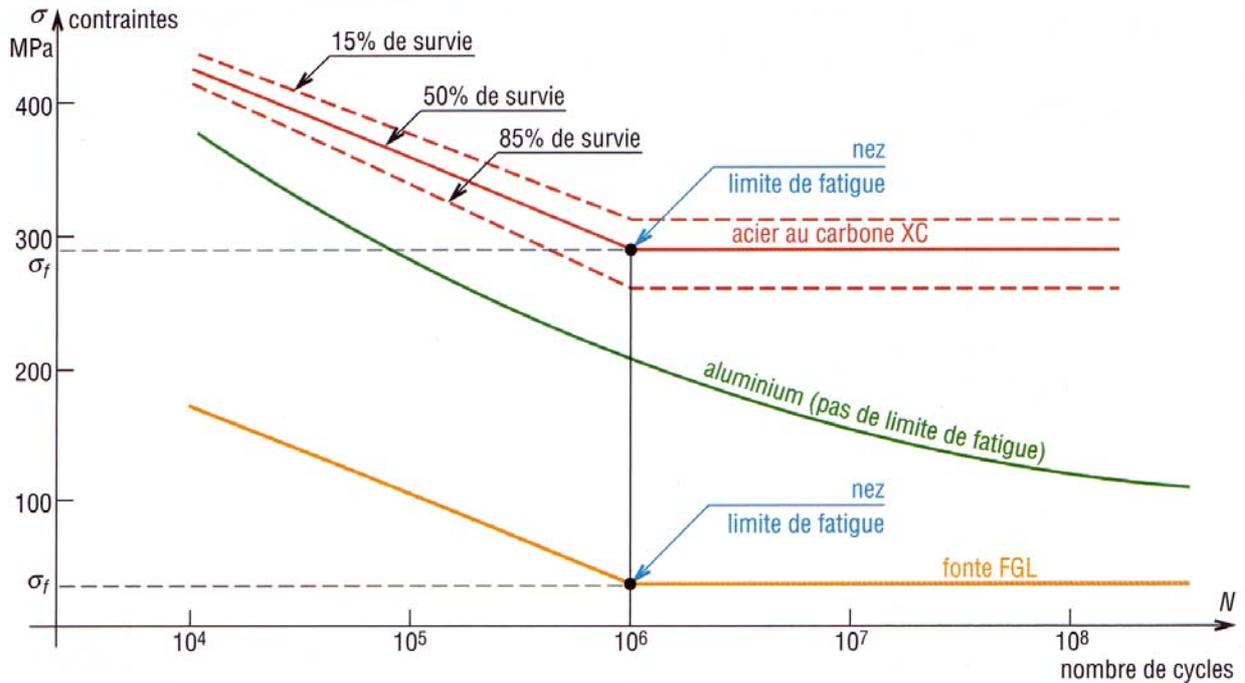


Fig. 1-63

- **Mode de rupture :** Les fissures de fatigue démarrent à partir des imperfections en surface rayures, empreintes, stries d'usinage, arête de filetage, hétérogénéité due au traitement thermique, défauts du réseau cristallin...

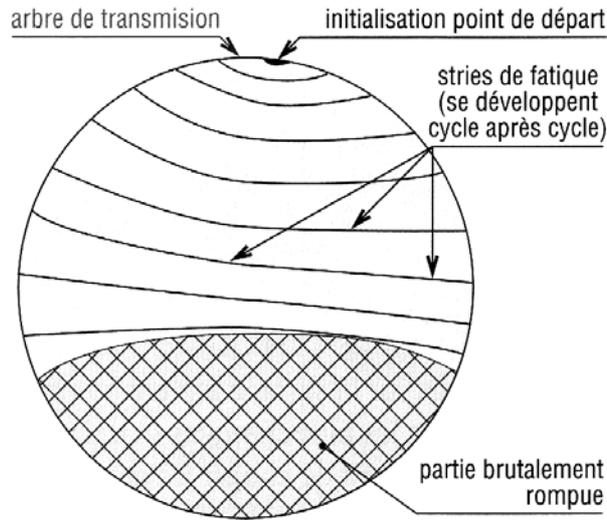


Fig. 1-64

Après amorce, la fissure s'agrandit sous l'action des efforts alternés qui écartent et rapprochent continuellement les parties fissurées ; il y a un phénomène de concentration de contraintes en ces points (fig. 1-64). La rupture définitive se produit brutalement lorsque les dimensions de la partie non encore fissurée ne sont plus suffisantes pour supporter les charges exercées.

Valeurs indicatives de σ_{f50} (limite de fatigue pour 50% de survie)			
$\sigma_{f50} = k \cdot R_r$ (avec R_r : résistance à la rupture par traction du matériau)			
sollicitations	K	matériaux	nombre de cycles
flexion	0,5	aciers de construction : $R_r < 1\,400 \text{ N/mm}^2$ HB < 400	10^7
	0,4	aciers moulés et fontes	10^7
	0,38	alliages de magnésium	10^6
	0,45	alliages de cuivre, alliages de nickel	10^7
	0,38	alliages d'aluminium laminés : $R_r < 280 \text{ N/mm}^2$	$5 \cdot 10^8$
	0,16	alliages d'aluminium pour la fonderie : $R_r < 280 \text{ N/mm}^2$	$5 \cdot 10^8$
torsion	0,29	aciers	10^7
	0,32	fontes grises FGL	10^7

	0,22	alliages de cuivre	10^7			
traction alternée	0,43	aciers	10^7			
Pour des pourcentages de survie différents de 50% utiliser la relation : $\sigma_{fn} = \sigma_{f50} (1 - 0,08 b)^n$ avec :						
n % de survie	90	95	98	99	99,9	9,99
b	1,28	1,64	2,05	2,33	3,08	3,62

1.4.7. Extensométrie électrique, photoélasticité, vernis craquelants

Ces trois techniques classiques permettent l'étude expérimentale des contraintes et des déformations. Elles sont particulièrement intéressantes lorsque les formes des objets sont compliquées et que les charges sont difficiles à évaluer autrement.

- **Vernis craquelant** : Projetés sur la surface à étudier comme un aérosol, ils sont utilisés pour localiser visuellement les zones les plus chargées et indiquer les directions principales des déformations. Ils permettent de choisir les emplacements de collage des jauges de contraintes et leur orientation ; l'orientation des craquelures est toujours perpendiculaire à la direction de la déformation en traction la plus importante.



Fig. 1-65

- **Méthodes photo élastiques** : Plus précises que les vernis craquelant, ces méthodes permettent des études plus détaillées sur les zones les plus chargées, les directions principales des déformations par exemple. Les résultats sont particulièrement intéressants près des formes amenant des concentrations de contraintes (trous, encoches, épaulements...) (fig. 1-65). Une matière plastique transparente est utilisée pour modéliser l'objet réel. Un système optique spécial (polariscope), permet d'observer des motifs colorés, interpréter et visualiser les zones contraintes. Il est ainsi possible, par dessins et essais successifs, d'améliorer la définition des objets.

Les pièces soumises à des vibrations ou des charges dynamiques peuvent être étudiées avec un système stroboscopique.

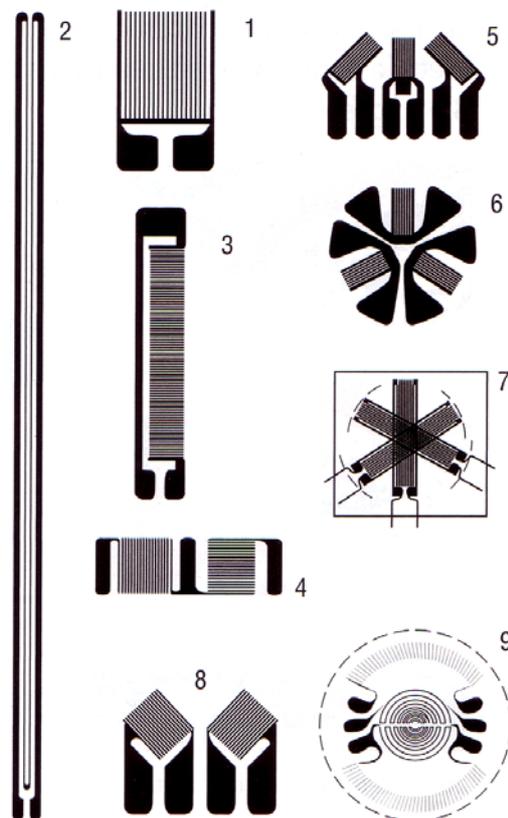
- **Extensométrie électrique** : Elle est basée sur l'emploi des jauges de contraintes (fig. 1-66a). C'est la méthode expérimentale la plus usuelle pour vérifier les résultats théoriques (calculs de contraintes, de déformations...).

Jauges de contraintes : sous l'effet d'un allongement la section du brin (fil) de la jauge diminue, il en résulte une variation de la résistance électrique du fil. En

mesure, R_1 est une jauge active collée sur la structure et R_2 une jauge identique collée sur une pièce de même matière. R_2 ne subit aucune contrainte et est à la même température que R_1 .

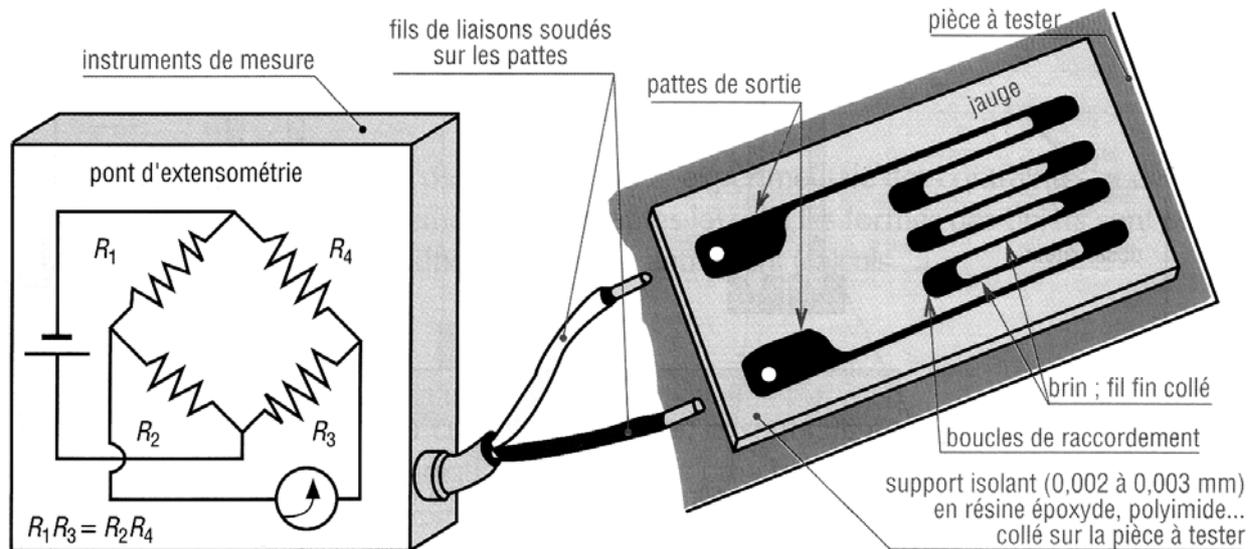
Les jauges sont collées sur la surface à étudier et mesurent les déformations en un point donné (fig. 1-66b). La déformation subie est transformée en variation de résistance électrique mesurée par un pont d'extensométrie : c'est le principe du pont de Wheatstone. Les contraintes sont ensuite obtenues par calcul à partir des lois de la résistance des matériaux ou élasticité.

Dans certains capteurs (forces, pressions, couples, déplacements...) on utilise généralement quatre jauges judicieusement disposées. Une jauge peut servir très longtemps, cependant il n'est pas possible de la décoller sans la détruire. Elles sont souvent fabriquées de la même manière que les circuits imprimés et sont disponibles dans plusieurs formes et dans de nombreuses dimensions (0,1 mm à 10 cm et plus).



1, 2, 3 : jauges simples ; 4 : rosette à 2 jauges ; 5, 6, 7 : rosette à 3 jauges ; 8 : pour torsion et cisaillement ; 9 : capteurs de pression

a)



b)

Fig. 1-66

2. TRAITEMENT THERMIQUE DES METAUX

On désigne sous le nom de traitement thermique une opération au cours de laquelle une pièce de métal et d'alliage est tout d'abord portée de la température ordinaire à une température plus élevée θ , puis maintenue à cette température θ pendant un certain temps et enfin ramenée à la température ordinaire.

Les **effets** de ces traitements dépendent, pour un même métal :

- de la température θ ,
- de la durée du maintien de la pièce métallique à la température θ ,
- de la vitesse avec laquelle sont réalisées les opérations de chauffage et de refroidissement.

Le **but** de ces traitements thermiques est d'obtenir une amélioration d'une ou de plusieurs des caractéristiques mécaniques du métal traité. Il arrive parfois que cette amélioration soit accompagnée de l'affaiblissement d'une autre propriété

mécanique du métal (par exemple, l'augmentation de la dureté d'un métal est souvent accompagnée de la diminution de sa résistance).

2.1. Identification des différents traitements thermiques

2.1.1. Traitements d'équilibre

- **Homogénéisation** : Traitement du lingot pour remédier aux fissures dues aux gaz, aux retassures et aux ségrégations, tout en évitant la surchauffe ou le perlage.
- **Recuit** : Tout traitement thermique qui consiste à obtenir la structure donnée par le diagramme de l'équilibre après un refroidissement très lent au four.
 - *Recuit à la volée ou de régénération* : Destruction d'effet de surchauffe.
 - *Recuit de normalisation* : Destruction d'effet de surchauffe sur des pièces forgées.
 - *Recuit d'homogénéisation* : Uniformisation de la répartition du carbone dans les grosses pièces forgées.
 - *Recuit de recristallisation* : Correction des déformations causées par l'écrouissage.
 - *Recuit isotherme* : Pour les pièces matricées ou estampées.

2.1.2. Traitements hors d'équilibre

- **Trempe** : Opération qui consiste à chauffer un matériau à une température plus ou moins élevée, afin de modifier sa structure cristalline, puis à le refroidir plus ou moins rapidement par immersion dans un fluide afin de maintenir cette nouvelle structure cristalline. L'opération a pour effet de modifier les propriétés mécaniques du matériau. Les trempes différées ou étagées sont réservées aux aciers alliés dans les industries de l'automobile et de l'aéronautique.
- **Revenu** : Traitement effectué ordinairement après la trempe, à une température beaucoup plus faible que cette dernière, le refroidissement final se faisant à l'air libre. Il a pour but, *par exemple*, l'adoucissement des

soudures, l'augmentation de la résistance des alliages légers, le mûrissement d'un alliage par un traitement de plusieurs jours.

2.1.3. Traitements thermiques modernes

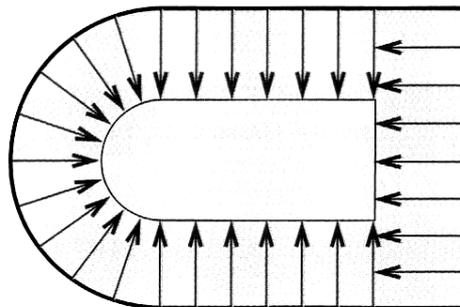
- **Traitements thermochimiques :**

- *Trempe superficielle* : Trempe limitée à une couche mince, réalisée par un courant à haute fréquence (10^4 Hz).
- *Cémentation* : carburation, nitruration, carbonitruration. Traitement thermochimique superficiel par lequel la teneur en carbone, en azote, ou les deux, est augmentée par diffusion en surface. I

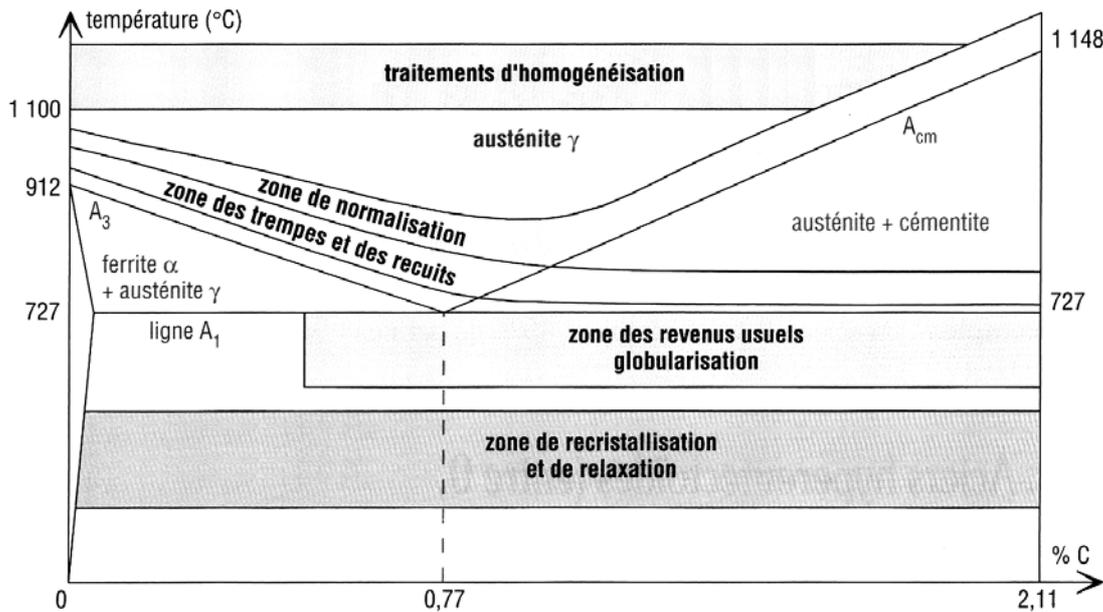
- #### - **Traitements thermomécaniques :** Traitements qui améliorent la tenue de pièces en service soumises à des efforts cycliques alternés (fatigue) par une déformation plastique qui élimine les dislocations (fissures de trempe) dues aux chocs thermiques.

2.2. Traitements thermiques des aciers

La structure et les propriétés mécaniques (R_r , R_e , H , $A\%$, K) des aciers peuvent être modifiées par un chauffage suivi d'un refroidissement à durée contrôlée. Ce sont les traitements thermiques dans la masse : trempes, revenus et recuits (fig. 2-1a). Les transformations sont effectuées près des lignes A_1 , A_3 et A_{cm} du diagramme fer carbone (fig. 2-1b).



a)



b)

Fig. 2-1

2.2.1. Durcissement par trempe

En général le durcissement par trempe consiste à soumettre le métal à un cycle thermique comprenant successivement :

- un chauffage destiné à mettre certains constituants en solution solide dans la phase stable à haute température (austénitisation) ;
- un refroidissement (trempe) de mode approprié, effectué à partir d'une certaine température dite température de trempe jusqu'à une autre température plus basse et pouvant être différente de la température ambiante.

Lorsque la vitesse de refroidissement est suffisamment rapide les atomes de carbone n'ont plus le temps de diffuser et les transformations normales n'ont plus le temps de se réaliser. L'austénite n'a plus le temps de perdre son carbone et ne peut se transformer ni en ferrite ni en perlite. La solution de fer obtenue, sursaturée en carbone, est appelée martensite ; elle est très dure, HB = 750, et très fragile). C'est le constituant de base des aciers trempés.

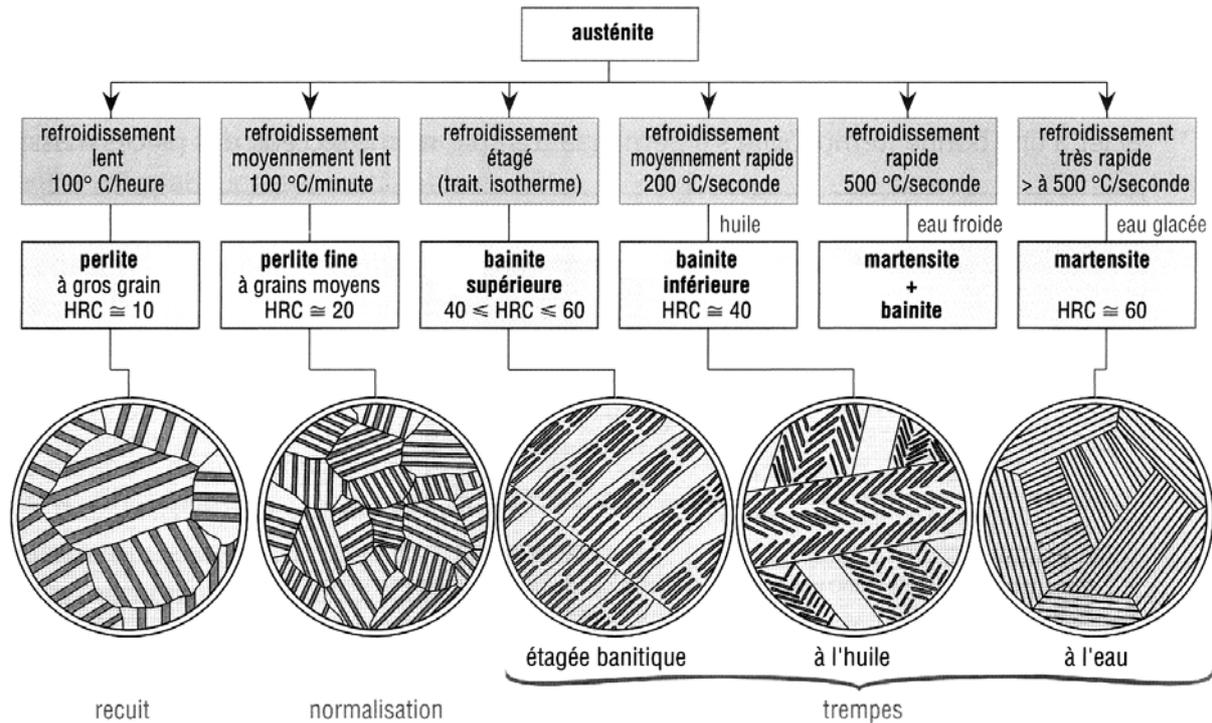


Fig. 2-2

Suivant la vitesse de refroidissement l'acier obtient différents constituants (cas de l'aciers eutectoïde à 0,77 % C) (fig.2-2).

Le durcissement par trempe est souvent la première étape d'un traitement plus complexe comportant ensuite un ou plusieurs revenus. L'ensemble de ces traitements a pour but une amélioration des caractéristiques du métal traité, telle que, une meilleure résilience pour une résistance déterminée.

- **Effets de la trempe** : La trempe peut produire l'un des effets suivants :
 - La solution solide stable à chaud subit pendant le refroidissement un changement de phase pratiquement total s'accompagnant d'un accroissement notable de la dureté (trempe martensitique, trempe bainitique).
 - La solution solide ne se transforme que partiellement au refroidissement en constituants durs. Un ou des traitements thermiques complémentaires pourront produire un nouvel accroissement de dureté soit en parachevant la transformation, soit en provoquant la précipitation de composants moins solubles à froid (durcissement secondaire).

- La solution solide stable à chaud ne subit pratiquement aucune transformation jusqu'à la température ambiante. Il y a en général adoucissement du métal (trempe des aciers austénitiques : hypertrempe).

Pour certains aciers un réchauffage subséquent à température moyennement élevée peut produire un durcissement secondaire.

Remarque :

Le terme *trempe* ne s'applique qu'au type de refroidissement : trempe à l'eau, trempe à l'huile, trempe à l'air soufflé, etc. Il est improprement utilisé pour désigner le traitement de durcissement par trempe.

- **Durcissement par trempe après chauffage superficiel :** Chauffage localisé de la surface d'une pièce (par induction ou à l'aide d'un chalumeau) suivi d'un refroidissement par aspersion ou immersion. Confère une grande dureté en surface sans modifier les caractéristiques mécaniques à cœur et améliore la tenue à la fatigue (portées de vilebrequins, flancs de dents, arbres à cames, etc.).
- **Recommandations pour la conception des pièces trempées :** Eviter les arêtes vives, les brusques variations d'épaisseurs ou de sections (à l'origine de contraintes résiduelles, criques, fissures...). Ne pas perdre de vue que la transformation de l'austénite en martensite s'accompagne d'un accroissement de volume de 4 %.
- **Trempabilité :** Lorsque les pièces sont massives elles sont difficiles à refroidir rapidement dans leur totalité. L'intérieur de la pièce, refroidi en dernier, plus lentement, est le plus difficile à tremper. Un acier a une bonne trempabilité s'il permet la trempe, même à cœur, des pièces massives.

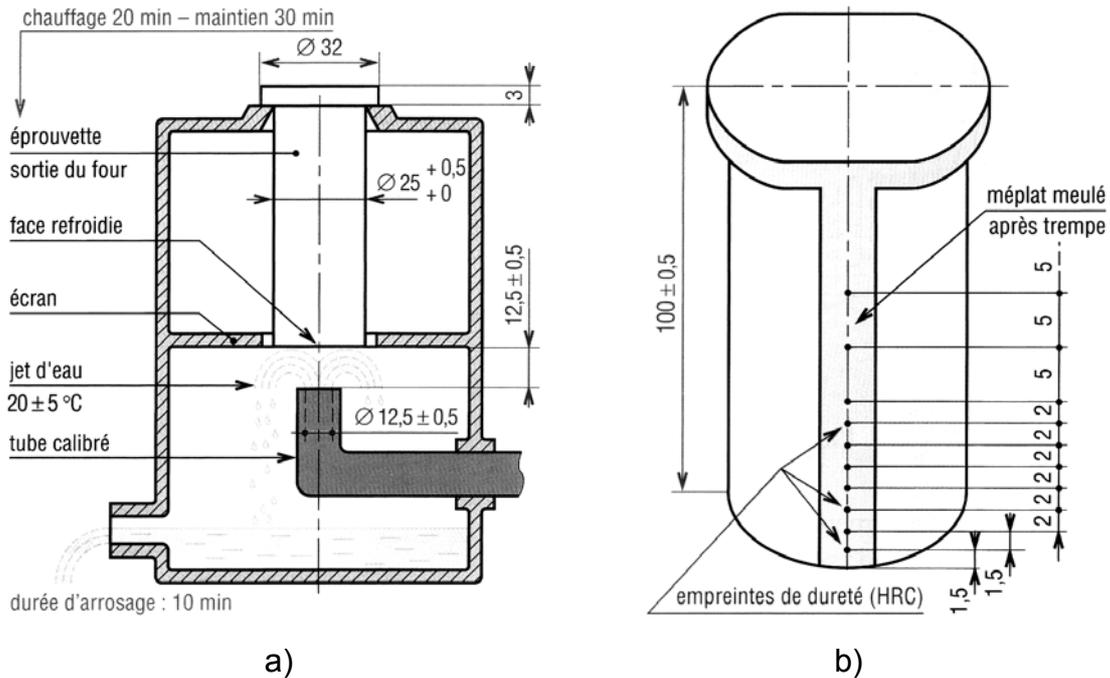


Fig. 2-3

Elle est mesurée par l'essai normalisé Jominy (NE EN ISO 642) (fig. 2-3a) sur une éprouvette préparée et mesurée après la trempe (fig.2-3b).

La nature des constituants d'une pièce massive dans le cas d'une pénétration de trempe difficile (fig. 2-4) change en profondeur.

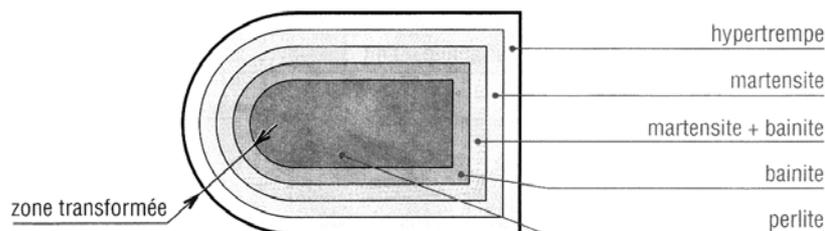


Fig. 2-4

- Cas des aciers au carbone non alliés de type C ou XC : leur trempabilité varie du médiocre au mauvais si le pourcentage de carbone (%C) diminue (fig. 2-5).

Entre 0,4 et 0,7 %C la pénétration de la trempe se limite à une profondeur de 20 mm environ. Ceux au-dessous de 0,35 %C ne sont pas considérés comme trempables.

Les pourcentages les plus favorables, de 0,35 à 0,7 %C, permettent une certaine dureté tout en conservant une ductilité et une résilience acceptables. Au-dessus de 0,7 %C les aciers, assez délicats à mettre en œuvre, sont moins utilisés. Les refroidissements rapides créent des contraintes internes très élevées, causes de criques, fissurations et déformations. Les aciers XC sont plutôt utilisés pour des pièces « petites », de faibles volumes, ou minces.

- *Cas des aciers alliés* : leur trempabilité est nettement supérieure aux précédents (fig. 2-5). Les éléments d'addition permettent, à résultat égal, de diminuer notablement les vitesses de refroidissement (vitesses critiques de trempe). Cette propriété favorise la pénétration de la trempe en profondeur. De plus, après un revenu, ces aciers peuvent avoir une bonne résilience, ce qui est impossible avec les aciers au carbone (de type C ou XC...).

Les éléments d'addition qui augmentent le plus la trempabilité sont : le bore, le manganèse, le molybdène, le chrome, le silicium et le nickel.

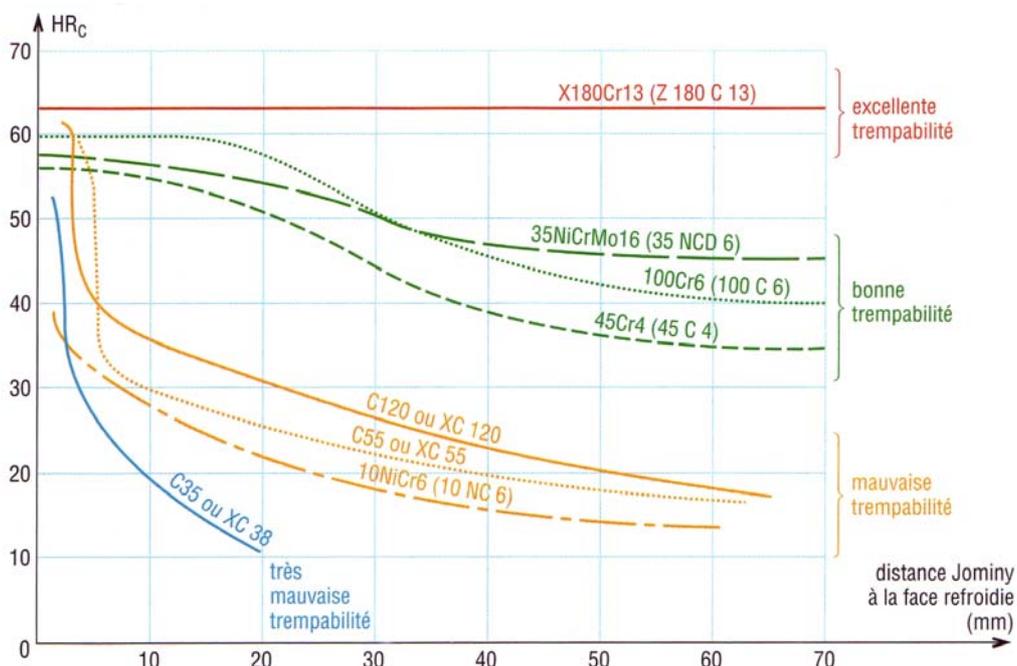


Fig. 2-5

2.2.2. Revenu

Traitement thermique effectué sur un produit après durcissement par trempe en vue de modifications lui conférant les caractéristiques d'emploi désirées. Ce traitement provoque la formation d'une structure plus proche de l'état d'équilibre physico-chimique que celle obtenue lors de la trempe.

Le cycle thermique comporte successivement :

- un réchauffage jusqu'à une température déterminée mais inférieure à celle de Ac_1 ;
- un ou plusieurs maintiens à une ou des températures déterminées,
- un ou des refroidissements jusqu'à la température ambiante par un mode approprié ou suivant une loi fixée.

En règle générale, le revenu se traduit :

- soit par un adoucissement qui conduit à une amélioration des caractéristiques de ductilité ;
- soit par un durcissement secondaire.

Un réchauffage jusqu'à 220 °C élimine les contraintes internes et est pratiquement sans effet sur la dureté. Un accroissement de la température amènera un adoucissement de plus en plus grand du métal, une dureté plus basse et une plus grande ductilité. Les températures de revenu les plus usuelles sont comprises entre 500 et 675 °C.

2.2.3. Recuit NF A 02-010

Le *recuit* a pour but séparément ou simultanément :

- de détruire les effets sur la structure :
 - de la solidification ;
 - d'une déformation plastique ;
 - d'un soudage ;
 - d'un traitement thermique antérieur.

- de mettre le métal dans un état adouci défini ou de tendre vers cet état si la structure a été perturbée par les traitements antérieurs ;
- de provoquer la formation de structures favorables à l'usinage ou à la déformation à froid ;
- de provoquer la formation d'une structure déterminée en vue, par exemple, d'un traitement thermique ultérieur ;
- d'éliminer ou de réduire les contraintes propres ;
- d'atténuer les hétérogénéités de la composition chimique du métal.

Le cycle thermique comporte :

- un chauffage jusqu'à une température dite température de recuit, déterminée en vue du but à atteindre ;
- éventuellement un maintien isotherme, ou des oscillations autour de cette température ;
- un refroidissement à l'air calme en suivant une loi imposée.

La structure schématique des aciers après les traitements thermiques (trempe, revenu, recuit) est présentée sur la fig. 2-6.

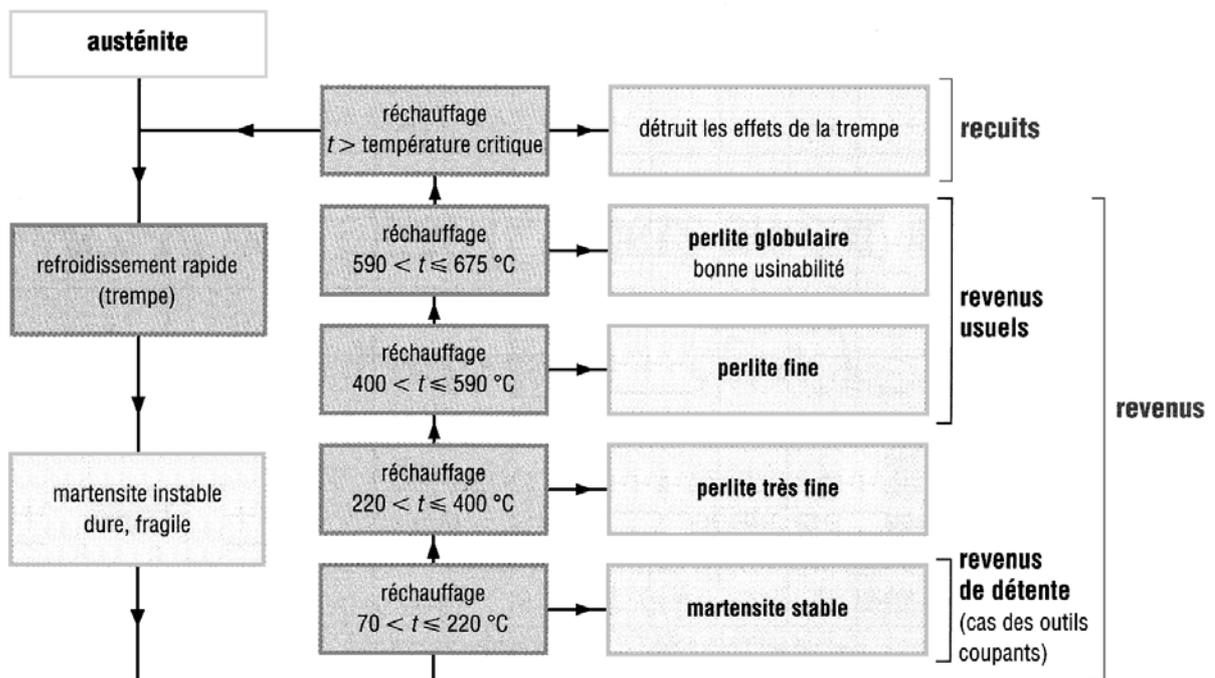


Fig. 2-6

2.3. Traitements thermiques des alliages d'aluminium (HF A 02-011)

2.3.1. Trempe structurale

Traitement thermique complet assurant un durcissement structural. Ce traitement comprend généralement une mise en solution suivie immédiatement :

- d'un refroidissement convenable (trempe) ;
 - d'une maturation ou/et d'un revenu produisant un durcissement.
- **Mise en solution** : Opération consistant à maintenir pendant une durée et à une température suffisante, un alliage à l'état solide de façon que les éléments d'addition soluble soient dissous en quantité convenable dans l'aluminium. Suivant les alliages, la mise en solution peut être effectuée par une opération spéciale (mise en solution séparée) ou s'accomplir spontanément au cours d'une transformation à chaud (corroyage, refroidissement de pièces moulées).
- **Trempe** : Opération de refroidissement effectuée de façon telle que la solution solide obtenue à chaud à température appropriée, soit maintenue en état de sursaturation :
- **État de trempe fraîche** : État de l'alliage correspondant à la période de temps suivant immédiatement la trempe et pendant lequel les caractéristiques mécaniques n'ont pas sensiblement augmenté par durcissement structural. La durée de cette période dépend essentiellement du milieu ambiant. Dans cet état, les produits présentent généralement une plus ou moins grande aptitude à la déformation.
- **Maturation** : Évolution spontanée à température ordinaire de la solution solide sursaturée. Pour certains alliages, cette évolution est le moyen normal d'obtention du durcissement structural. Dans quelques cas, la température de maturation peut être légèrement supérieure à la température ordinaire

afin d'accélérer l'évolution. Après cette évolution, l'alliage est dit à l'état «mûri».

- **Revenu** : Évolution de la solution solide sursaturée provoquée par maintien à une température appropriée, en vue d'obtenir le durcissement structural. Les propriétés finales dépendent de la température et de la durée du maintien à cette température. (Dans certains cas, la vitesse de montée en température joue également un rôle.)

2.3.2. Recuit

Traitement thermique ayant pour but d'adoucir un métal ou un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale.

2.4. Traitements de surface

2.4.1. Traitements mécaniques

Ces traitements ont pour but :

- soit d'éliminer les oxydes métalliques (pièces forgées ou moulées) ou les bavures (pièces usinées) ;
 - soit d'améliorer l'état de surface des pièces ;
 - soit d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la couche superficielle.
- **Grenailage** : Projection à grande vitesse de grenaille (fragments de fil d'acier, billes d'acier ou de verre) sur les surfaces à traiter. Élimine la calamine des pièces forgées. Améliore la tenue à la fatigue de ces dernières (bielles, vilebrequins, ressorts de suspension, barres de torsion, etc.).
 - **Sablage** : Projection de sable (quartz, silice, alumine, billes de verre de faible diamètre,...) sur les surfaces à traiter. Ce procédé s'apparente au

grenailage avec une action plus faible (exemple: sablage des pièces de fonderie avant application de peinture).

- **Ébavurage** : Les petites et nombreuses bavures d'usinage sont éliminées par brassage des pièces avec des petites pierres peu abrasives (fig. 2-1a) dans un bac vibrant (fig. 2-1b).

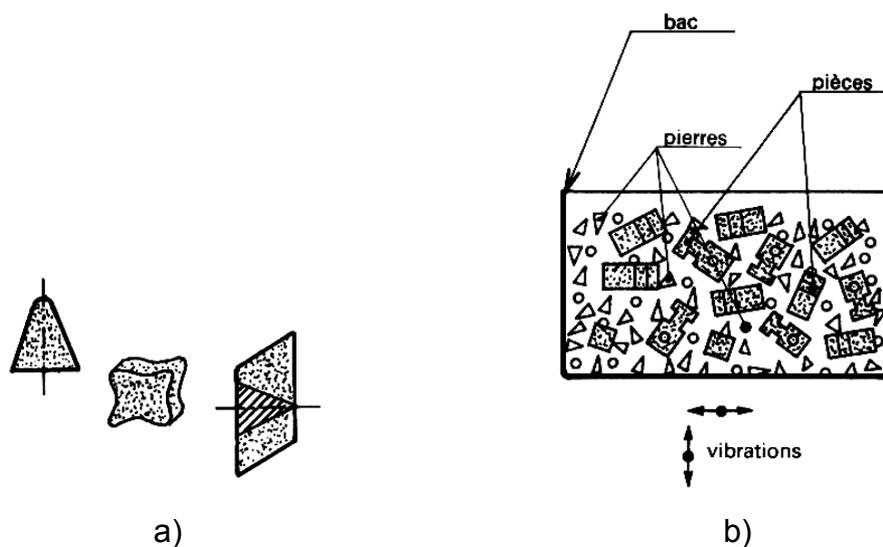


Fig. 2-1

- **Polissage** : Le but recherché est un bon état de surface (bel aspect) sans souci de précision dimensionnelle. On utilise des disques, des roues ou des toiles abrasives (fig. 2-2). Le déplacement de l'outil ou de la pièce est généralement manuel.

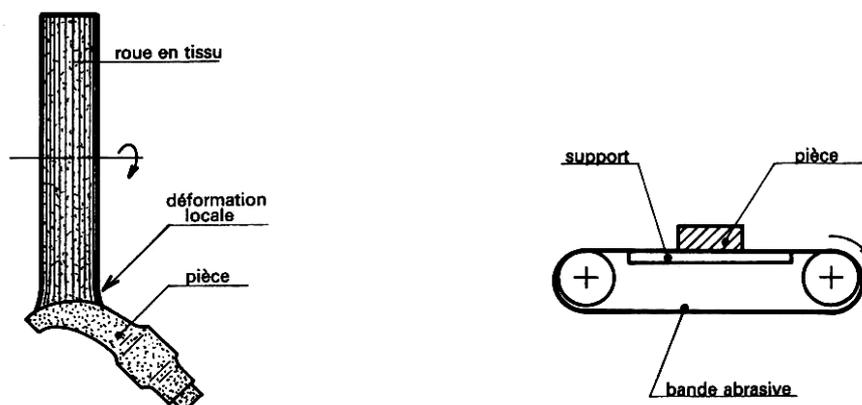


Fig. 2-2

- **Galetage** : Permet l'obtention d'un écrouissage superficiel dû au roulement, sous forte charge, d'un galet lisse sur la surface à traiter. Ce procédé est généralement appliqué aux surfaces cylindriques (axes, vilebrequins de presses,...). Il améliore la tenue à la fatigue des pièces en service.

2.4.2. Traitements thermochimiques de diffusion et d'apport (NF A 91-460)

- **Cémentation** : Diffusion de carbone en milieu pulvérulent, pâteux, liquide ou gazeux, effectuée à une température supérieure à A_{c3} . Ce traitement est souvent suivi d'un durcissement par double trempe.
 - Épaisseur de la couche cémentée : 0,5 à 1 mm.
 - Protection des surfaces (non traitées) : cuivrage électrolytique ;
 - Nuances traitées : aciers de cémentation.
 - Propriétés :
 - Dureté sur couche HV = 550
 - Bonne résilience à cœur
 - Bonne tenue à la fatigue
 - Exemples d'emploi : engrenages, cames, axes, ...
- **Nitruration** : Diffusion d'azote seulement en milieu gazeux ou diffusion d'azote principalement, avec légère diffusion de carbone à partir d'un milieu gazeux ou d'un bain de sels fondus, effectuée à une température inférieure à A_{c1} . Ces traitements sont rarement suivis d'un durcissement par trempe.
 - Épaisseur de la couche nitrurée: 0,1 à 0,5 mm.
 - Protection des surfaces {non traitées} : étamage ;
 - Nuances traitées : 35 CD 4, 42 CD 4, 30 CD 12, m GAD 6-12, ... ;
 - Propriétés :
 - Grande dureté (HV = 600 à 1200) ;
 - Faible déformation ;
 - Résistance à l'usure et à la corrosion.
 - Exemples d'emploi : Pignons, broches, axes, glissières, guides, chemises, instruments de mesure, ...

- **Nitruration ionique** : La diffusion s'effectue sous vide (état de plasma d'un gaz azoté) à une température relativement basse (490-570°C). Ce traitement n'est jamais suivi de durcissement par trempe.
- **Carbonitruration** : Diffusion simultanée de carbone et d'azote effectuée à une température généralement supérieure à A_{c1} . Elle peut se faire en milieu gazeux (carbonitruration proprement dite) ou en milieu de sels fondus (cyanuration). Elle est le plus souvent suivie d'un durcissement par trempe.
 - Épaisseur de la couche carbonitrurée : 0,05 à 0,5 mm ;
 - Nuances traitées : Les aciers de cémentation et de nitruration ;
 - Propriétés :
 - Bonne résistance à l'usure et à la corrosion,
 - Bonne tenue à la fatigue,
 - Grande dureté sur couche.
 - Exemple d'emploi : engrenages, articulations, arbres, ...
- **Sulfonitruration** : Diffusion simultanée de soufre et d'azote effectuée en milieu de sels fondus à une température de 570°C.
 - Épaisseur de la couche : 20 à 30 μm ;
 - Nuances traitée : tous les alliages ferreux ;
 - Propriétés :
 - Excellente résistance à l'usure et au grippage ;
 - Bonne tenue à la fatigue ;
 - Dureté HV = 700 à 1 000 ;
 - Bonne résistance à la corrosion.
 - Exemples d'emploi : glissières, paliers, guides, arbres, ...
- **Chromisation** : Diffusion de chrome effectuée, en milieu pulvérulent, à une température supérieure à A_{c3} . Elle produit sur les aciers à bas carbone une couche superficielle de faible dureté {alliage Fe - Cr} résistant à la corrosion et sur les aciers carburés une couche superficielle de très grande dureté (HV = 1600 \rightarrow carbures de Cr) résistant à la corrosion et à l'usure.

- Épaisseur de la couche :
Chromisation douce : 0,1 mm
Chromisation dure : 20 μm .
 - Exemples d'emploi {chromisation dure} : limes, filières, guides, fraises dentaires, ...
- **Boruration** : Diffusion de bore effectuée en milieu pulvérulent, à une température supérieure à A_{c3} .
- Épaisseur de la couche : 50 à 350 μm ;
 - Nuances traitées : tous les alliages ferreux ;
 - Propriétés : Dureté exceptionnelle ($HV = 1\ 600$ à 2000) mais couche assez fragile ;
 - Exemples d'emploi : guide-fil, vis transporteuses de matières abrasives, buses de sablage, glissières, ...
- **Shéardisation {NF A 91-460}** : Diffusion de zinc, effectuée en milieu pulvérulent, à une température d'environ 400°C .
- Épaisseur de la couche : 20 à 40 μm ;
 - Nuances traitées : tous les alliages ferreux ;
 - Propriétés : résistance à la corrosion {industrielle et marine}.

2.4.3. Traitement de conversion (NF A 91-010)

Permet la formation d'un composé nouveau en surface, par traitement électrolytique (exemple: oxydation anodique de l'aluminium) ou par traitement par immersion dans un bain chimique, sans courant électrique, ayant pour but la formation superficielle de sels insolubles (exemple: phosphatation des aciers).

- **Anodisation (oxydation anodique) de l'aluminium et de ses alliages** :
Traitement électrolytique provoquant un renforcement de la pellicule d'alumine par action de l'oxygène naissant dissocié d'un électrolyte, sous courant électrique, le métal de base étant placé en anode.
- La couche d'alumine peut recevoir une coloration (Décoration).

- Propriétés :
Résistance à la corrosion.
Isolation électrique ou diélectrique.
Durcissement superficiel. (Dans ce cas le traitement est appelé « anodisation dure »)

- **Phosphatation** : La couche de phosphates, formée par immersion dans un bain aqueux, modifie les propriétés chimiques, mécaniques ou électriques de la surface des pièces en acier (Les aciers ordinaires ou peu alliés. les fontes, le zinc, l'aluminium, le titane peuvent être phosphatés mais non les aciers fortement alliés tels les aciers inoxydables).
 - Exemples et propriétés : Carrosserie automobile → Protection contre la corrosion et meilleur accrochage de la peinture : Phosphates de Zn ou de Fe. Épaisseur de la couche = 5 μm .
 - Formage à froid (Tréfilage, extrusion) → Accrochage du lubrifiant (stéarate de Zn) : Phosphate de Zn. Epaisseur de la couche = 10 à 20 μm .
 - Armement → Résistance à la corrosion : Phosphate de Mn. Épaisseur de la couche = 10 μm .
 - Pignons de boîtes de vitesses et billes de roulements → Rodage (La couche disparaît après quelques heures de service) : Phosphate de Mn. Epaisseur de la couche = 5 à μm .
 - Tôles de circuits magnétiques → isolement électrique : Phosphates de Fe et de Ca. Épaisseur de la couche = 10 μm .

Remarque : Les phosphates ne résistent pas aux températures élevées. Ils se décomposent au-delà de 120°C.

- **Oxalation** : Ce procédé est surtout utilisé avant la frappe à froid des aciers inoxydables. Le bain d'acide oxalique permet la formation en surface d'oxalates de Fe, de Cr et de Ni. Ces oxalates « accrochent » le lubrifiant nécessaire au formage (stéarate de Zn).

- **Chromatation** : Traitement chimique en bains aqueux de composés de chrome appliqué aux surfaces de zinc, de cadmium, d'aluminium.
 - Propriétés : Améliore la résistance à la corrosion.

2.4.4. Revêtement métallique (NF A 91-010)

Désigne toute couche de métal sur une surface obtenue par un procédé de recouvrement tel que la structure du métal d'apport soit assez homogène et les modifications du matériau de base à l'interface assez négligeables, pour que la qualité de la couche soit définie par son épaisseur. Les couches obtenues à partir de peintures contenant des poudres métalliques sont exclues de la dénomination de revêtements métalliques.

- **Dépôt électrolytique** : Revêtement obtenu par déposition d'un métal ou alliage sur le métal de base placé en cathode lors de l'électrolyse d'un électrolyte approprié. (Dépôts électrolytiques de Nickel, cuivre, chrome, zinc, cadmium, étain, argent, or, etc.).
 - Épaisseur du dépôt : 5 à 30 μm (Le chromage dur (épaisseur du dépôt. 0,05 mm à 0,5 mm) est utilisé en construction mécanique pour sa dureté et sa résistance à l'usure.)
 - Propriétés : Résistance à la corrosion et/ou effet décoratif.
- **Dépôt chimique** : Revêtement obtenu par réaction chimique ou électrochimique à la surface du métal de base dans un bain approprié à l'exclusion de tout apport extérieur de courant électrique (Dépôts chimiques de nickel, cuivre, étain, argent, or...).
 - Épaisseur du dépôt : faible, (< 1 μm pour l'étain).
 - Propriétés : Résistance à la corrosion.
- **Revêtement par immersion dans des métaux fondus** : Revêtement obtenu en immergeant le métal de base dans un bain d'un autre métal fondu. Le genre de procédé est généralement explicité par la mention « à chaud »

(Étamage à chaud, plombage à chaud, aluminage à chaud, galvanisation à chaud).

- Épaisseur du dépôt : Jusqu'à plusieurs dixièmes de mm.
- Propriétés : Résistance à la corrosion.

- **Revêtement par métallisation au pistolet :** Revêtement obtenu par projection au pistolet en fines gouttelettes d'un métal fondu par une flamme oxygène - gaz (acétylène, propane, gaz de ville, gaz naturel, hydrogène, etc.), à l'arc électrique ou au plasma. En utilisant un chalumeau à plasma (température > 20000°C) il est possible de réaliser des revêtements d'oxydes (alumine, bioxyde de titane...), de carbures (carbure de tungstène...), de nitrures (nitrures de bore...).

- Épaisseur du dépôt :
De 30 à 500 µm pour les oxydes, carbures, nitrures ;
Jusqu'à plusieurs mm pour les métaux et alliages (Nickel, cuivre, bronze, laiton, zinc, cadmium, aluminium, 3S étain, plomb, argent...).
- Propriétés :
Résistance à la corrosion (en particulier à haute température) ;
Résistance à l'usure ;
Isolation électrique ou thermique ;
Rechargement de pièces, etc.

- **Revêtement par placage, doublage, soudage :**

- **Revêtement par placage :** Revêtement obtenu en appliquant sur le métal de base une feuille d'un autre métal, l'adhérence entre les deux métaux étant généralement obtenue par laminage de l'ensemble. (Exemple: placage d'acier inoxydable sur acier non allié) ;
- **Revêtement par doublage :** Revêtement d'un support métallique ou non obtenu au moyen de plaques métalliques assemblées par soudage ou mécaniquement et liées ou non au support.
- **Rechargement par soudage :** Revêtement d'un métal de base au moyen de dépôts obtenus par un procédé de soudage.

- **Dépôt sous vide** : Revêtement obtenu par déplacement d'un métal d'apport grâce au vide :
 - soit par évaporation thermique avec condensation ;
 - soit en une projection cathodique, le métal de base étant placé en anode.
- Métal déposé: Ni, Cu, Cd, Al, Ag, Cu, ...
- Épaisseur du dépôt: extrêmement faible.
- Exemple : aluminage sous vide des paraboles de projecteurs d'automobiles.

2.4.5. Symbolisation

Le principe de symbolisation est conforme au tableau ci-dessous :

Symbolisation fondamentale		Additions éventuelles ^①	
Métal de revêtement ou élément préférentiel du composé formé en surface après traitement	Épaisseur (du revêtement métallique)	Procédé de revêtement ou de traitement entre parenthèses	Métal de base précédé d'une barre oblique
Symbole chimique	En micromètres	— Soit : désignation du procédé en clair — Soit : Nombre conventionnel en chiffres romains (voir tableau 2)	Symbole chimique du métal ou désignation normalisée de l'alliage

REVÊTEMENTS MÉTALLIQUES (nombres < X)	TRAITEMENTS DE SURFACE (X ≤ Nombres) ^②
(I) - Dépôts électrolytiques (II) - Dépôts chimiques (III) - Revêtements par immersion dans métaux fondus (IV) - Revêtements par métallisation au pistolet (V) - Revêtements par placage. (VI) - Dépôts sous vide.	(X) - Traitements thermochimiques de diffusion (XI) - Traitements électrolytiques (XII) - Traitements chimiques.

Exemples de symbolisation :

- Dépôt électrolytique de nickel de 20 μm sur acier : Ni 20 (I) / Fe
- Revêtement de métallisation au pistolet à 120 μm de zinc sur acier : Zn 120 (IV) / Fe
- Traitement thermochimique de diffusion d'azote : Nitruration N (X).

2.4.6. Peinture (NF T 30-001)

Une peinture est un mélange comprenant :

- un liant constitué par des résines naturelles ou artificielles (acryliques, vinyliques, glycérophtaliques, époxydiques, polyuréthanes, ...), des huiles, des brais, ... ;
- des solvants et des plastifiants ;
- des pigments colorés (poudre fine de substances minérales ou organiques, poudre métallique) ;
- des matières de charge (poudre de substances minérales) ;
- des adjuvants divers améliorant les conditions de fabrication, de conservation, d'application, etc.

Les peintures sont appliquées, sur des surfaces métalliques généralement phosphatées, par projection au pistolet (conventionnel ou électrostatique), à la brosse, au trempé, par électrophorèse, ...

- Épaisseur du feuillet : 5 à 200 μm suivant le type de peinture et le nombre de couches.
- Propriétés : Résistance à la corrosion, isolation, décoration.

2.4.7. Revêtement plastique (« Peinture » en poudre) (NF T 58-100)

Les revêtements plastiques (polyamide, polychlorure de vinyle, polyéthylène, polyesters, polyépoxyde, etc.) appliqués par voie sèche ($T = 200^\circ\text{C}$) sont obtenus par :

- Fluidisation : immersion d'une pièce préchauffée dans une matière en poudre ;
- Projection sur pièce préchauffée ;
- Projection au pistolet à flamme ;
- Projection électrostatique sur pièce froide suivie d'un chauffage.
- Épaisseur du revêtement : 25 à 300 μm .
- Propriétés : Résistance à la corrosion, isolation électrique, décoration.

***Module 9 : RESISTANCE DES
MATERIAUX
GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES***

TRACTION ET COMPRESSION

TP1 – Remorquage d'un véhicule

1.1. Objectif visé

- Appliquer les connaissances acquises en Résistance des matériaux sur la sollicitation d'un solide en traction.
- Etre capable de vérifier la condition de résistance d'une pièce sollicitée en traction.

1.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 3 heures.

1.3. Equipements et matière d'œuvre par stagiaire

- Papier format A4
- Calculatrice
- Outillage de dessin (règle, équerre, compas, crayons)

1.4. Description du TP

Calculer la contrainte de traction dans les vis de fixation de l'attache lors du remorquage d'un véhicule (fig. TP1-1).

Hypothèse :

- Les contraintes dues à l'effort de traction lors du remorquage sont les seules à être considérées.
- Lors de variations brusques de vitesses la remorque exerce un effort de traction maximum de 3150 daN sur l'attache.
- Cet effort est réparti à égalité sur chaque vis de fixation (4) dont les caractéristiques sont : Diamètre sollicité ϕ 14mm ; Matière : 42 Cr Mo 4 ; Coefficient de sécurité : $k = 8$.

1.5. Déroulement du TP

Activités :

- Rechercher dans la documentation technique la valeur de la résistance de la matière constituant les vis.

$$R_e = \dots\dots\dots \text{MPa}$$

- En lisant le problème posé donner la valeur de la force de traction appliquée à chaque vis, exprimer cette valeur en Newton.

$$F_t = \dots\dots\dots \text{ N}$$

- Calculer l'aire de la section d'une vis soumise à la traction.

Note : L'âme étant cylindrique, sa section est circulaire. L'aire d'un cercle est : $S = \pi R^2$

Calculs :

- Section :

$$S = \dots\dots\dots \text{ mm}^2$$

- Contrainte σ dans une vis :

$$\sigma = \dots\dots\dots \text{ MPa}$$

- Résistance pratique de la matière des vis R_p .

$$R_p = \dots\dots\dots \text{ MPa}$$

Conclusion : A partir du cours écrire la **condition de résistance** à la traction d'une vis.

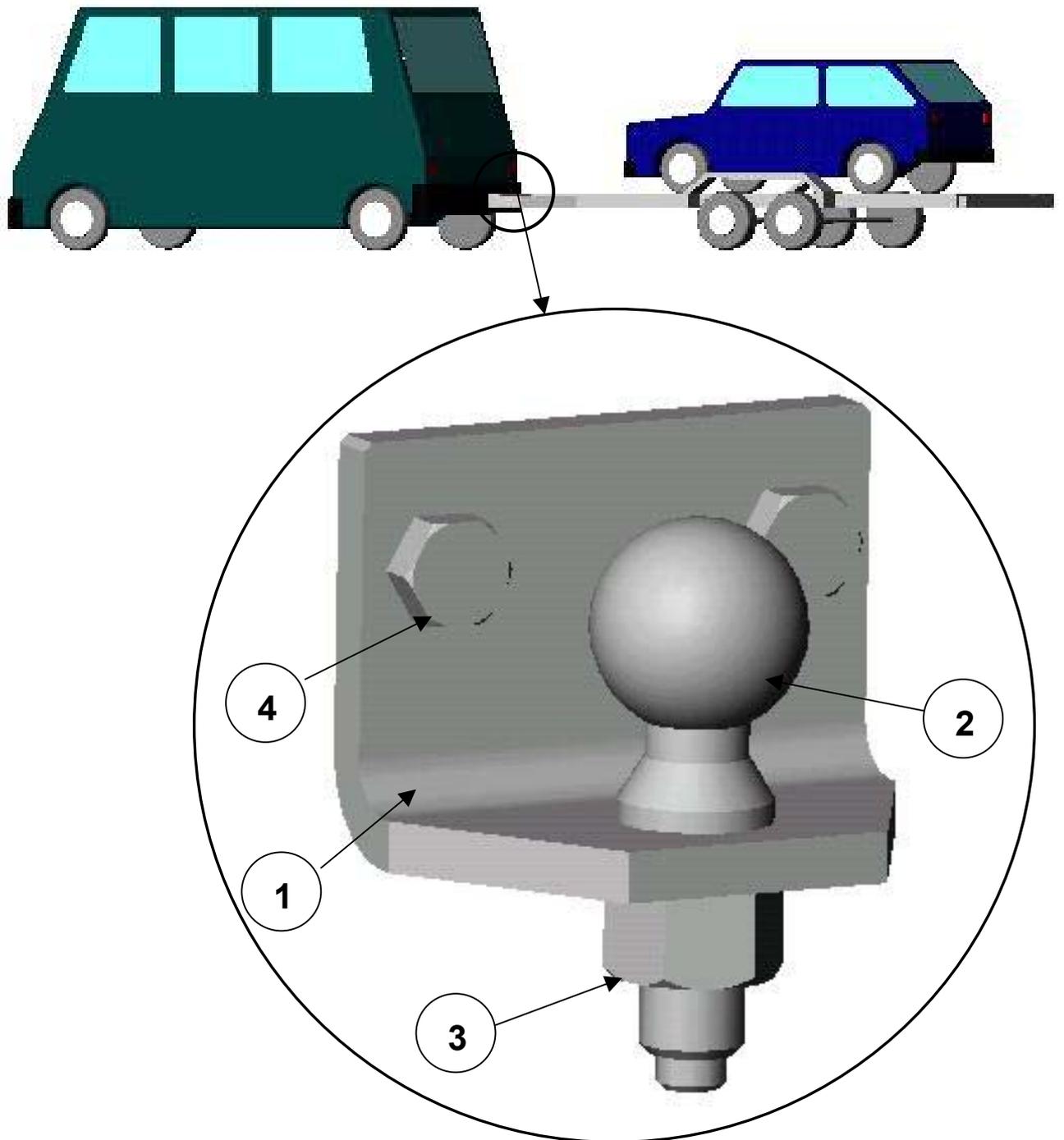


Fig. TP1-1

TP 2 – Etude d'une enveloppe cylindrique mince

2.1. Objectif visé

- Etre capable de dimensionner les réservoirs cylindriques.

2.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 4 heures.

2.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Papier format A4
- Calculatrice
- Outillage de dessin (règle, équerre, compas, crayons)

2.4. Description du TP

On désigne par *enveloppe cylindrique mince*, une enveloppe dont l'épaisseur est relativement faible devant les autres dimensions (conduite d'eau sous pression, réservoir de gaz comprimé, chaudière à vapeur, etc.).

Les forces pressantes sur les parois provoquent des contraintes et des déformations. Le problème consiste à déterminer l'épaisseur de l'enveloppe afin qu'elle résiste en toute sécurité (fig. TP2-1). Par ailleurs, l'épaisseur de la paroi étant petite devant le diamètre intérieur (inférieure environ au centième de ce diamètre) on admet que la répartition des contraintes est uniforme.

Le problème posé consiste en détermination de la poussée résultante d'un fluide sur une paroi demi cylindrique.

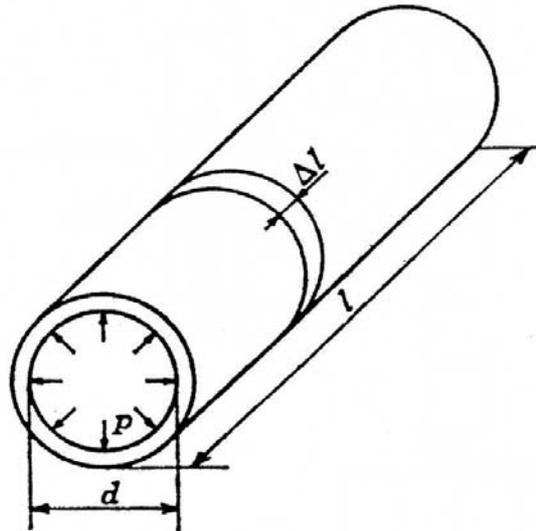


Fig. TP2-1

Soit un réservoir cylindrique clos (diamètre intérieur d , longueur l) soumis à une pression intérieure p . Si on isole un élément de longueur Δl et on considère la moitié de cet élément (fig. TP2-2), sur l'élément de paroi ΔS s'exerce la force pressante Δf . Les projections sur les axes sont :

- Sur Ox , la poussée a l'expression $\sum \Delta f \cdot \sin \alpha = 0$ en raison de la symétrie des données par rapport à Oy ;
- Sur Oy , la poussée a l'expression $\Delta F = \sum \Delta f \cdot \cos \alpha$, soit $\Delta F = p \cdot \sum \Delta S \cdot \cos \alpha$;

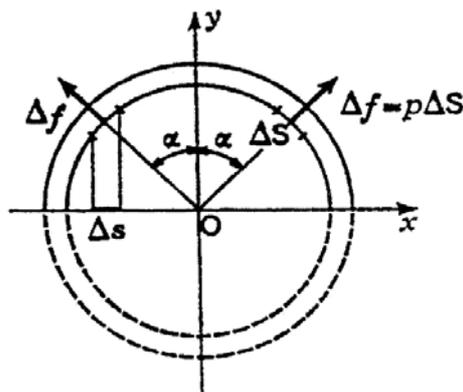


Fig. TP2-2

Or, $\Delta S \cdot \cos \alpha = \Delta s$ et $\sum \Delta s = d \cdot \Delta l$ de sorte que, sur la moitié de l'élément de longueur Δl s'exerce la force résultante :

$$\Delta F = p \cdot d \cdot \sum \Delta l$$

Pour toute la longueur, la poussée sur la paroi demi cylindrique a pour l'expression :

$$F = p.d.l$$

Remarque : Un raisonnement analogue donne la poussée résultante sur chaque fond bombé dont la forme admet l'axe longitudinal comme axe de symétrie :

$$F' = p \frac{\pi d^2}{4}$$

2.5. Déroulement du TP

Déterminer des contraintes pour un réservoir cylindrique clos de longueur l , de diamètre extérieur d_e , de diamètre intérieur d_i et d'épaisseur e . Il contient un fluide sous la pression absolue p_i , la pression extérieur étant la pression atmosphérique p_a .

- **Contrainte transversale** (section par le plan π_1) (fig. TP2-3) :

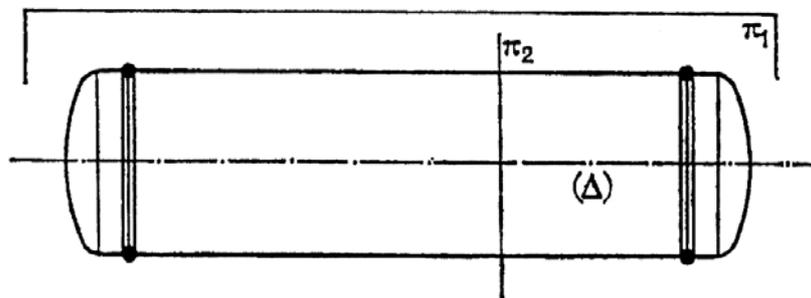


Fig. TP2-3

La partie demi cylindrique (A), dont le poids est négligé, est mise en équilibre (fig. TP2-4). Elle est soumise aux forces suivantes :

- Forces extérieures :
 - F_i , poussée sur la surface cylindrique intérieure : $F_i = p_i.l.d_i$;
 - F_a , poussée sur la surface cylindrique extérieure : $F_a = p_a.l.d_e$;
- Forces intérieures :
 - $2N$, exercées par la partie enlevée sur la partie isolée : $N = \sigma.l.e$;

L'équilibre de (A) se traduit par :

$$F_i - F_a = 2N \quad \text{soit, } \sigma = \frac{p_i \cdot d_i - p_a \cdot d_e}{2e}$$

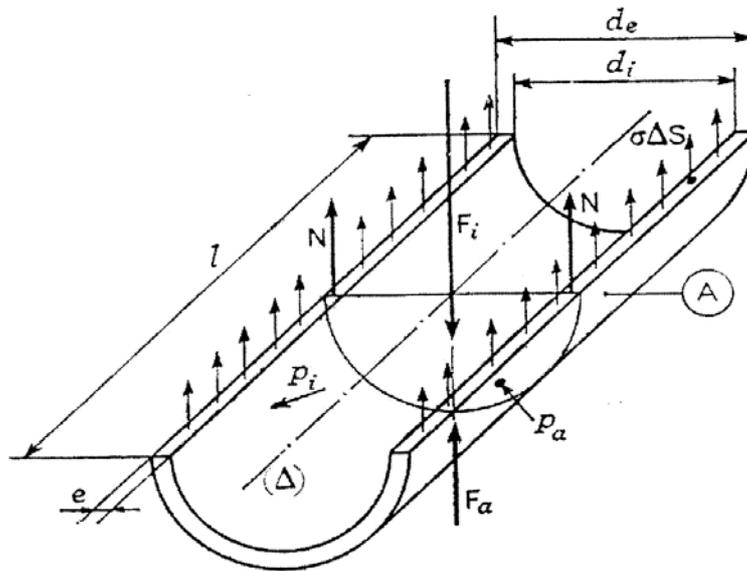


Fig. TP2-4

Par ailleurs, $d_e \approx d_i$ et $p_i - p_a = p_{eff}$ (pression effective). En définitive :

$$\sigma = \frac{p_{eff} \cdot d_i}{2e}$$

- **Contrainte longitudinale** (section par le plan π_2) (fig. TP2-3) :

On isole le tronçon (A') (fig. TP2-5). La partie (A') est soumise aux forces suivantes :

- Forces extérieures :

$$F'_i, \text{ poussée sur le fond intérieur : } F'_i = p_i \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} ;$$

$$F'_a, \text{ poussée sur le fond extérieur : } F'_a = p_a \frac{\pi d_e^2}{4} ;$$

- Forces intérieures :

$$N', \text{ exercées par la partie enlevée sur la partie isolée : } N = \sigma' \cdot S' ;$$

L'équilibre de (A') se traduit par :

$$F'_i - F'_a = N' \quad \text{soit, } \sigma' = \frac{\pi(p_i \cdot d_i^2 - p_a \cdot d_e^2)}{4S'}$$

Avec : $S' = \frac{\pi}{4} (d_e^2 - d_i^2) \approx \pi d_i e$, car e est trop petit devant d_i et d_e que l'on confondra dans l'expression précédente de σ' .

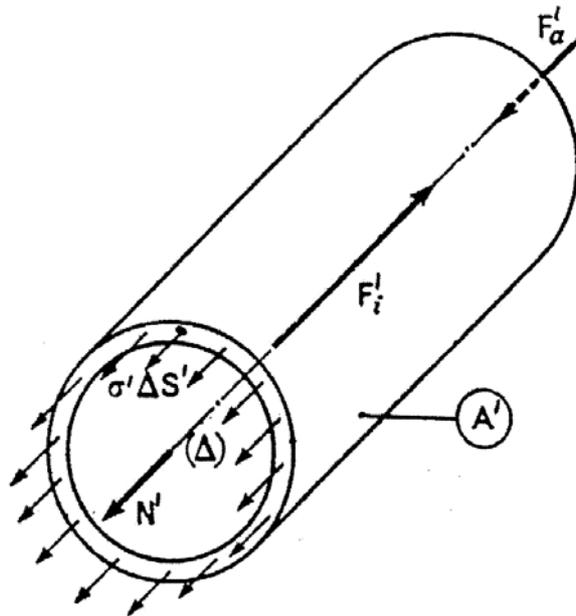


Fig. TP2-5

En définitive :

$$\sigma' = \frac{(p_i - p_e) d_i}{4e} \quad \text{ou} \quad \sigma' = \frac{p_{\text{eff}} d_i}{4e}$$

Conclusion :

On remarque que $\sigma' = \frac{\sigma}{2}$. Donc l'enveloppe résiste mieux dans le sens transversal.

En effet, la pratique montre que, si le matériau est homogène, la déchirure se produit le plus souvent selon une génératrice.

- **Calcul de l'épaisseur e** (fig. TP2-4) :

Pour que l'enveloppe résiste en toute sécurité, la contrainte transversale ne doit pas dépasser la contrainte admissible R_p du métal adopté :

$$\frac{p_{\text{eff}} d_i}{2e} \leq R_p, \quad \text{soit} \quad e \geq \frac{p_{\text{eff}} d_i}{2R_p}$$

CISAILLEMENT

TP3 – Calcul des nombres de rivets

3.1. Objet du TP :

- Etre capable de dimensionner les assemblages sollicités au cisaillement ;
- Etre capable de calculer le nombre de rivets qui assure l'assemblage des pièces mécaniques.

3.2. Durée :

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

3.3. Equipement :

- Papier format A4
- Calculatrice
- Outillage de dessin (règle, équerre, compas, crayons)

3.4. Description du TP :

Calculer le nombre de rivets sur une charpentes métalliques – il s'agit d'assembler les deux cornières (2) et (3) sur le gousset (1) (fig. TP3-1).

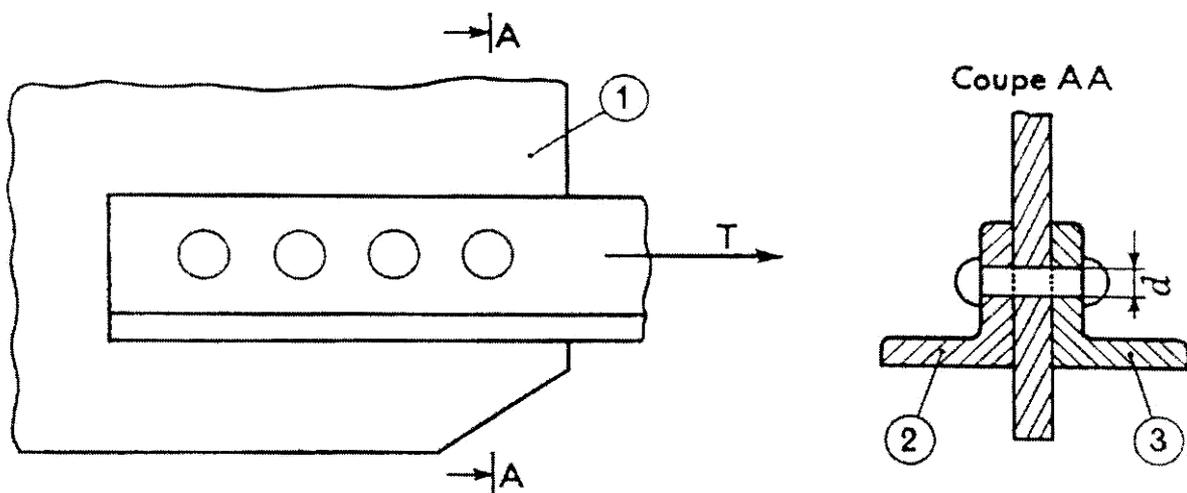


Fig. TP3-1

3.5. Déroulement du TP :

T est l'effort qui s'exerce sur l'ensemble des cornières. Les rivets en acier doux ont pour diamètre d et pour résistance pratique R_{pg} .

Chaque rivet a tendance à se cisailer suivant deux sections. La condition de résistance au cisaillement est :

$$S = 2 \cdot x \cdot s \quad \text{avec } s = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \text{ section d'un rivet, et } x = \text{nombre de rivets}$$

Donc :

$$x \geq \frac{T}{2 \cdot s \cdot R_{pg}}$$

Application numérique :

Pour : $T = 100000$ N, $d = 16$ mm, $R_{pg} = 70$ N/mm²

$$x \geq \frac{T}{2 \cdot s \cdot R_{pg}} = \frac{100000}{2 \cdot \frac{\pi \cdot 16^2}{4} \cdot 70} = 3,5 \approx 4$$

On prendra 4 rivets.

TP4 – Dimensionnement des assemblages mécano soudés

4.1. Objectif visé

- Etre capable de dimensionner les assemblages mécano soudés sollicités au cisaillement ;
- Etre capable de calculer un cordon de soudure.

4.2. Durée du TP

Le travail pratique proposé est d'une durée de 2 heures.

4.3. Equipements et matière d'œuvre par équipe

- Papier format A4
- Calculatrice
- Outillage de dessin (règle, équerre, compas, crayons)

4.4. Description du TP

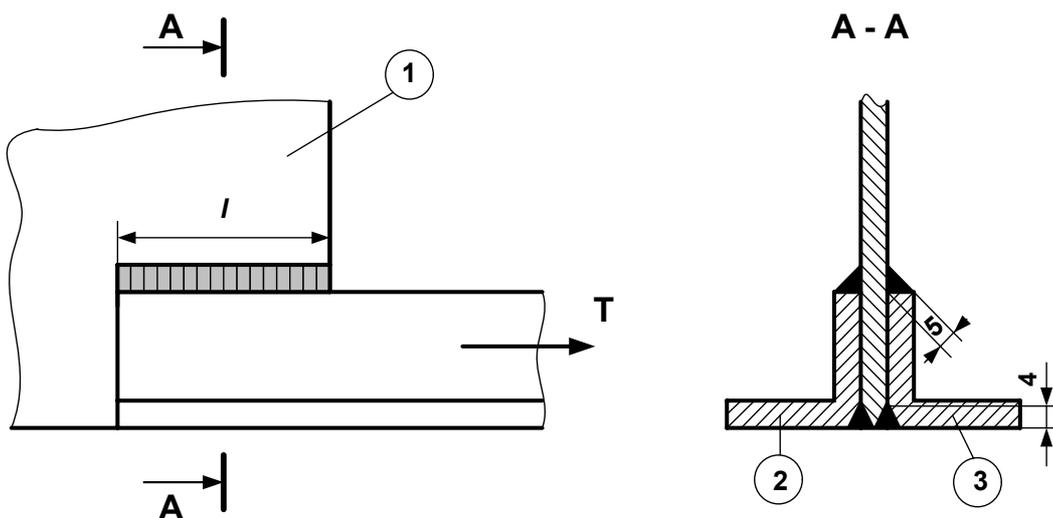


Fig. TP4-1

Un entrait constitué par deux cornières égales (2) et (3) est sollicité par l'effort $T = 110000$ N. L'entrait est fixé sur un gousset (1) par quatre cordons de soudure avant pour épaisseurs 5 mm et 4 mm (fig. TP4-1).

4.5. Déroulement du TP

Déterminer la longueur l des cordons de soudure sachant que leur contrainte admissible au cisaillement est $R_{pg} = 80\text{ N/mm}^2$.

FLEXION PLANE SIMPLE

TP5 – Calcul d'une poutre soumise à des efforts concentrés

5.1. Objet du TP :

- Etre capable de dimensionner une poutre en flexion ;
- Etre capable de calculer les réactions des appuis ;
- Etre capable de trouver les diagrammes des moment fléchissant et des efforts tranchants ;
- Etre capable de calculer les contraintes et les déformations.

5.2. Durée :

Le travail pratique proposé est d'une durée de 5 heures.

5.3. Equipement :

- Papier format A4
- Calculatrice
- Outillage de dessin (règle, équerre, compas, crayons)

5.4. Description du TP :

Une poutre de section carrée ($a = 25 \text{ mm}$), reposant sur deux appuis simples en **A** et en **B**, est soumise à deux efforts $F1$ et $F2$ (fig. TP5-1).

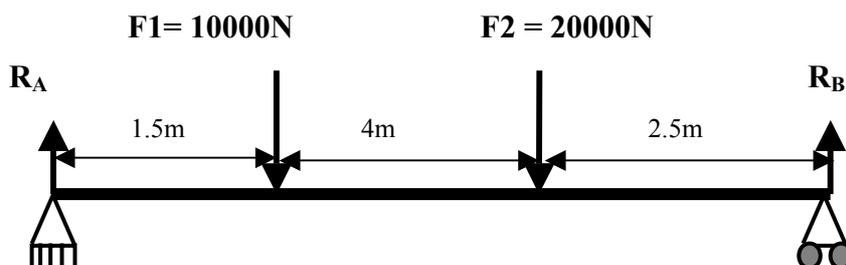


Fig. TP5-1

- Calculer R_A et R_B
- Donner le diagramme des efforts tranchants et des moments fléchissants ;
- Calculer la contrainte normale maximale ;
- Calculer la flèche maximale de la poutre.

5.5. Déroulement du TP :

Utiliser les principes et les formules présentés dans le chapitre de la partie théorique.

TP6 – Calcul d'une poutre soumise à des charges réparties

6.1. Objet du TP :

- Etre capable de dimensionner une poutre en flexion
- Etre capable de calculer les réactions des appuis
- Etre capable de trouver les diagrammes des moment fléchissant et des efforts tranchants
- Etre capable de calculer les contraintes et les déformations

6.2. Durée :

Le travail pratique proposé est d'une durée de 5 heures.

6.3. Equipement :

- Papier format A4
- Calculatrice
- Outillage de dessin (règle, équerre, compas, crayons)

6.4. Description du TP :

Une poutre repose sur deux appuis (liaison linéaire rectiligne) (fig. TP6-1). Le plan (A, x, y) est un plan de symétrie pour la poutre et pour les charges.

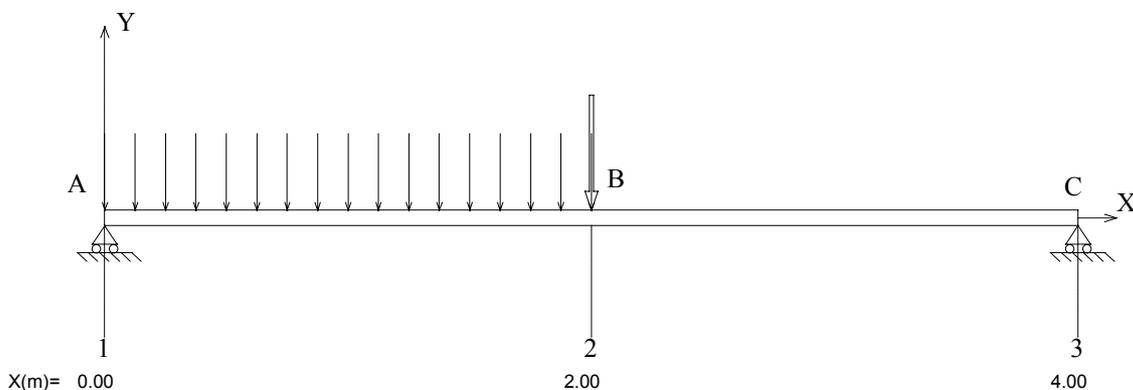


Fig. TP6-1

La poutre a une section rectangulaire de largeur $b = 30 \text{ mm}$ et de hauteur $h = 60 \text{ mm}$. Elle est en acier E36 et a $\sigma_{\text{emin}} = 325 \text{ MPa}$.

6.5. Déroulement du TP :

On exerce en **B** une force concentrée, modélisable par un glisseur $B = 1200 \text{ N}$, et entre **A** et **B** une force répartie de densité de force $dF = 800 \text{ N/m}$.

- Exprimer les torseurs des actions mécaniques aux appuis.
- Déterminer le torseur de cohésion le long de la poutre. Tracer les diagrammes correspondants.
- En déduire la valeur du moment de flexion maximal et la position de la section correspondante.
- Déterminer la contrainte normale maximale. En déduire le coefficient de sécurité dont on dispose.

TORSION

TP7 – Calcul des nombres de rivets

7.1. Objet du TP :

- Etre capable de dimensionner une poutre en torsion
- Etre capable de calculer les contraintes et les déformations

7.2. Durée :

Le travail pratique proposé est d'une durée de 3 heures.

7.3. Equipement :

- Papier format A4
- Calculatrice
- Outillage de dessin (règle, équerre, compas, crayons)

7.4. Description du TP :

- Un arbre doit transmettre une puissance $P = 30000$ W à la vitesse de rotation $N = 500$ tr/min. La contrainte admissible est $R_{pg} = 40$ N/mm²). L'arbre est soumis à la torsion du fait de l'existence des moments moteurs et résistants. On néglige la flexion devant la torsion. Déterminer le diamètre de l'arbre.

Réponse : $D > 41,5$ mm

- Même exercice en prenant une condition de déformation sur l'angle unitaire $\theta_{\max} = \frac{1}{4}$ degré/mètre

Réponse : $D > 63,5$ mm

7.5. Déroulement du TP :

Utiliser les principes et les formules présentés dans le chapitre de la partie théorique.

***Module 9 : RESISTANCE DES
MATERIAUX***

EVALUATION DE FIN DE MODULE

O.F.P.P.T.
EFP

MODULE 9 : RESISTANCE DES MATERIAUX

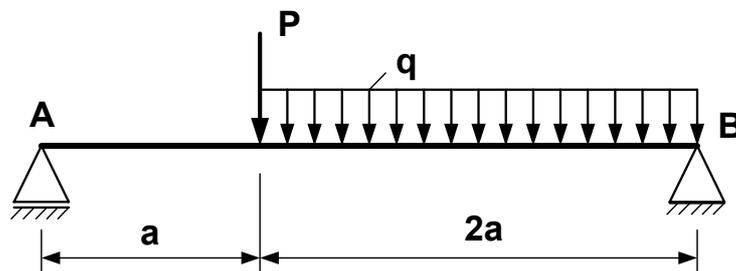
FICHE DE TRAVAIL

Stagiaire : _____ Code : _____
Formateur : _____

Durée : 3 heures

(Exemple)

1. Pour la poutre sur la figure ci-dessous, étant données $P = 60 \text{ kN}$, $q = 30 \text{ kN/m}$, $a = 2 \text{ m}$, $E = 2.10^5 \text{ MN/m}^2$, $G = 8.10^4 \text{ MN/m}^2$, $\sigma = 160 \text{ MN/m}^2$:
 - Déterminer les efforts tranchants T_y et les moments fléchissants M_{tz} ;
 - Dessiner les diagrammes $T_y = f(x)$ et $M_{tz} = f(x)$;
 - Calculer la section de la poutre et choisir dans un catalogue (en annexe) le profil en double té convenable.



Solution :

On détermine les réactions des appuis d'après les conditions statiques :

$$R_A = \frac{2P}{3} + \frac{2aq}{3} = \frac{2.60.10^3 + 2.2.30.10^3}{3} = 80.10^3 \text{ N} = 80 \text{ kN}$$

$$R_B = P + 2aq - R_A = P + 2aq - \frac{2P + 2aq}{3} = \frac{P + 4aq}{3} = \frac{60 \cdot 10^3 + 4 \cdot 2 \cdot 30 \cdot 10^3}{3} = 100 \cdot 10^3 \text{ N} = 100 \text{ kN}$$

Pour déterminer les efforts tranchants et les moments fléchissants il faut « diviser » la poutre en deux parties (AP et BP) :

$$x_1 \Rightarrow T_{yA} = R_A = 80 \text{ kN} ; \quad M_{tzA} = R_A \cdot x_1 = 80 \cdot x_1$$

$$x_1 = 0 \Rightarrow M_{tzA} = 0$$

$$x_1 = a \Rightarrow M_{tzA} = 160 \text{ kN.m}$$

$$x_2 \Rightarrow T_{yB} = -R_B + q \cdot x_2 = -100 + 30 \cdot x_2 ; \quad M_{tzB} = R_B \cdot x_2 - \frac{q \cdot x_2^2}{2} = 100 \cdot x_2 - \frac{30 \cdot x_2^2}{2}$$

$$x_2 = 0 \Rightarrow T_{yB} = -100 \text{ kN} ; \quad M_{tzB} = 0$$

$$x_2 = 2a \Rightarrow T_{yB} = -100 + 30 \cdot 4 = 20 \text{ kN} ; \quad M_{tzB} = 100 \cdot 4 - \frac{30}{2} \cdot 16 = 160 \text{ kN.m}$$

Pour déterminer la valeur maximale du moment fléchissant on utilise la condition :

$$T_{yB} = -R_B + q \cdot x_2 = -100 + 30 \cdot x_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad x_2 = \frac{10}{3} \text{ m}$$

$$\text{D'où : } M_{tzmax} = 100 \cdot \frac{10}{3} - \frac{30}{2} \cdot \frac{10^2}{9} = \frac{500}{3} \text{ kN.m}$$

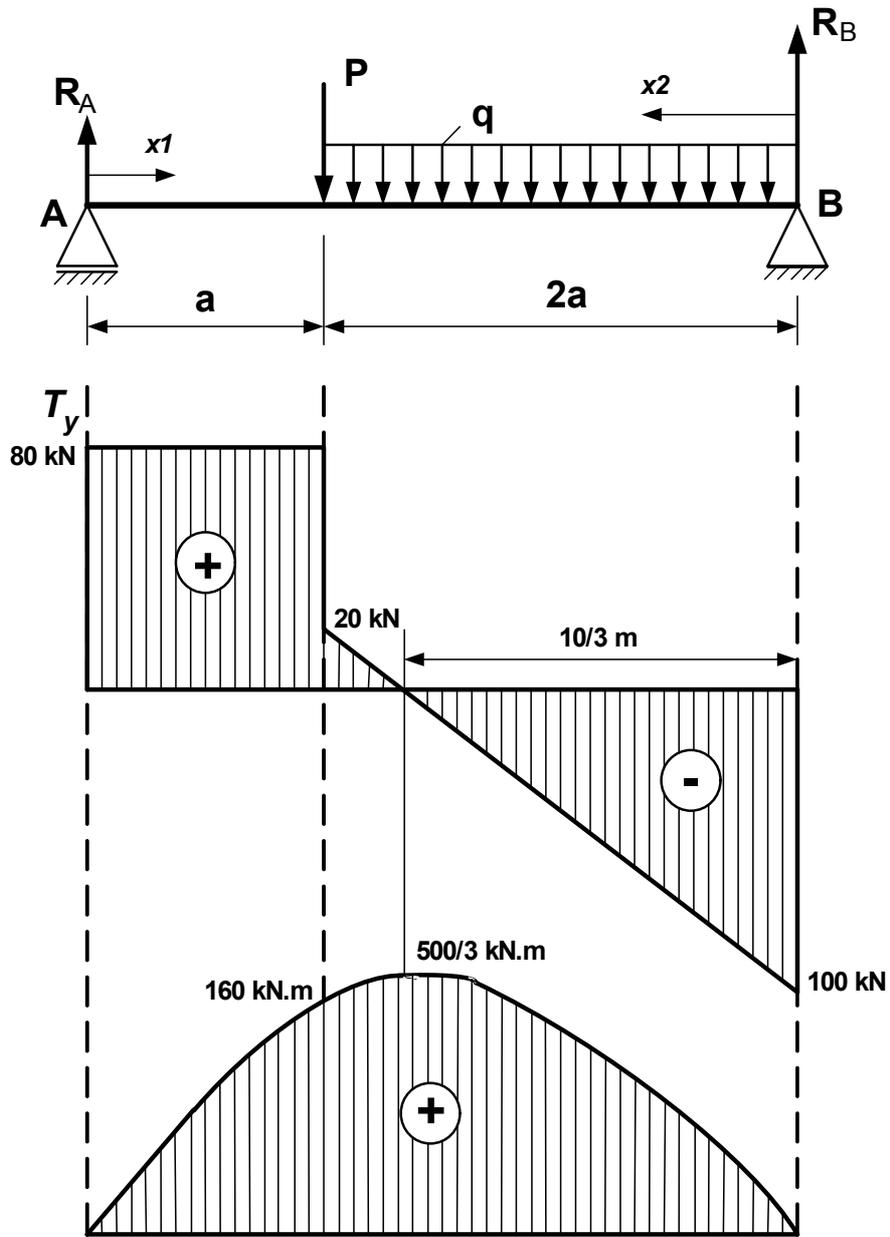
Le moment statique :

$$\frac{I}{v} = \frac{M_{max}}{\sigma} = \frac{500 \cdot 10^3}{3 \cdot 160 \cdot 10^6} = 1042 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 = 1042 \text{ cm}^3$$

On choisit, dans le catalogue (en annexe), la poutre en double té n° 45 pour laquelle :

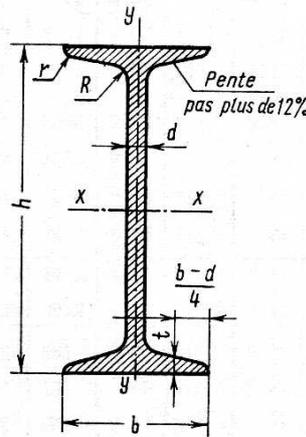
$$\frac{I}{v} = 1220 \text{ cm}^3 ; \quad I = 27450 \text{ cm}^4 ; \quad S = 83 \text{ cm}^2 ; \quad h = 45 \text{ cm} ; \quad d = 0,86 \text{ cm} ;$$

$$k = \frac{S}{S_0} = \frac{83}{45,0,86} \approx 2,14$$



ANNEXE :

Poutres en double té d'acier laminé.



Numéro du profil	Poids de 1 m, kgf	Dimensions, mm							Aire de la section cm ²	Grandeurs de référence pour les axes					
		h	b	d	t	R	r	x - x				y - y			
								I _x , cm ⁴		I/V _x , cm ³	i _x , cm	S _x , cm ³	I _y , cm ⁴	I/V _y , cm ³	i _y , cm
10	9,46	100	55	4,5	7,2	7	2,5	12,0	198	39,7	4,06	23,0	17,9	6,49	1,22
12	11,5	120	64	4,8	7,3	7,5	3	14,7	350	58,4	4,88	33,7	27,9	8,72	1,38
14	13,7	140	73	4,9	7,5	8	3	17,4	572	81,7	5,73	46,8	41,9	11,5	1,55
16	15,9	160	81	5,0	7,8	8,5	3,5	20,2	873	109	6,57	62,3	58,6	14,5	1,70
18	18,4	180	90	5,1	8,1	9	3,5	23,4	1290	143	7,42	81,4	82,6	18,4	1,88
18a	19,9	180	100	5,1	8,3	9	3,5	25,4	1430	159	7,51	89,8	114	22,8	2,12
20	21,0	200	100	5,2	8,4	9,5	4	26,8	1840	184	8,28	104	115	23,1	2,07
20a	22,7	200	110	5,2	8,6	9,5	4	28,9	2030	203	8,37	114	155	28,2	2,32
22	24,0	220	110	5,4	8,7	10	4	30,6	2550	232	9,13	131	157	28,6	2,27
22a	25,8	220	120	5,4	8,9	10	4	32,8	2790	254	9,22	143	206	34,3	2,50
24	27,3	240	115	5,6	9,5	10,5	4	34,8	3460	289	9,97	163	198	34,5	2,37
24a	29,4	240	125	5,6	9,8	10,5	4	37,5	3800	317	10,1	178	260	41,6	2,63
27	31,5	270	125	6,0	9,8	11	4,5	40,2	5010	371	11,2	210	260	41,5	2,54
27a	33,9	270	135	6,0	10,2	11	4,5	43,2	5500	407	11,3	229	337	50,0	2,80
30	36,5	300	135	6,5	10,2	12	5	46,5	7080	472	12,3	268	337	49,9	2,69
30a	39,2	300	145	6,5	10,7	12	5	49,9	7780	518	12,5	292	436	60,1	2,95
33	42,2	330	140	7,0	11,2	13	5	53,8	9840	597	13,5	339	419	59,9	2,79
36	48,6	360	145	7,5	12,3	14	6	61,9	13380	743	14,7	423	516	71,1	2,89
40	56,1	400	155	8,0	13,0	15	6	71,4	18930	947	16,3	540	666	85,9	3,05
45	65,2	450	160	8,6	14,2	16	7	83,0	27450	1220	18,2	699	807	101	3,12
50	76,8	500	170	9,5	15,2	17	7	97,8	39290	1570	20,0	905	1040	122	3,26
55	89,8	550	180	10,3	16,5	18	7	114	55150	2000	22,0	1150	1350	150	3,44
60	104	600	190	11,1	17,8	20	8	132	75450	2510	23,9	1450	1720	181	3,60
65	120	650	200	12,0	19,2	22	9	153	101400	3120	25,8	1800	2170	217	3,77
70	138	700	210	13,0	20,8	24	10	176	134600	3840	27,7	2230	2730	260	3,94
70a	158	700	210	15,0	24,0	24	10	202	152700	4360	27,5	2550	3240	309	4,01
70b	184	700	210	17,5	28,2	24	10	234	175370	5010	27,4	2940	3910	373	4,09

Liste des références bibliographiques

Ouvrage	Auteur	Edition
Cours pratique de Résistance des matériaux	Jean-Claude DOUBRERE	Eyrolles, 1995
Module 9 : Résistance des matériaux Technicien en Fabrication mécanique	Abderrahim MIFDAL	OFPPT / DRGC / ISTA GM 2006
Module 22 : Matériaux et Traitements Technicien en Fabrication mécanique	Dorina NICA	OFPPT / DRIF / CDC GM 2006
Guide des Sciences et Technologie Industrielles	Jean-Louis FANCHON	Nathan / VUEF, AFNOR, 2004
Métallurgie Élaboration, Structures – Propriétés, Normalisation	Jean BARRALIS Gérard MAEDER	Nathan / VUEF, AFNOR, 1997
Précis de Construction Mécanique 1. Dessin, conception et normalisation	R. QUATREMER J.-P. TROTIGNON	Nathan / AFNOR, 1985
Problèmes de Résistances des matériaux	I.MIROLYUBOV S.ENGALYTCHEV, N.SERGUIEVSKI, F.ALMAMETOV, N.KOURITSYNE, K.SMIRNOV-VASSILIEV, L.IACHINA	Edition Mir, 1977