

République Algérienne Démocratiques et Populaire  
Ministère de l'Enseignements Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université DjillaliLiabes de Sidi Bel Abbas  
Faculté de Technologie  
**Département de Génie Mécanique**



الجمهورية الجزائرية  
الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و  
البحث العلمي  
جامعة جيلالي ليابس -  
سديبلعباس  
كلية التكنولوجيا

## *Polycopié pédagogique*

# *TP Matériaux des structures aéronautiques*

### **Cours destiné aux étudiants :**

**Filière : Génie Mécanique**  
**Option : Aéronautique**  
**Parcours : 1ère Année Master**  
**Semestre : S1**  
**Unité d'enseignement : UEF 1.1.2**

### **Cours présenté par :**

Dr. Monsieur M'HAMDIA Rachid

# TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale.....	4
----------------------------	---

## TP I : L'ESSAI DE RÉSILIENCE

I.1.Introduction.....	5
I.2.Rappel théorique.....	6
I.2.1.Définition.....	6
I.3.Présentation de l'essai.....	6
I.3.1Types d'essai de rupture pour impact.....	6
I.3.2.Éprouvettes.....	8
I.3.3.Éprouvettes en U.....	8
I.3.4.Eprouvettes CHARPY V.....	8
I.3.5.Effet de température.....	8
I.4.But de l'essai.....	9
I.5.Principe de l'essai.....	9
I.6.Conditions de réalisation de l'essai.....	9
I.7.Conclusion.....	10
I.8.Manipulation et déroulement de l'essai.....	10
I.9.Symbole général : K.....	10
I.10.Travail demandé.....	11
I.10.1.Compte rendu.....	11

## TP N° 0 2 «ESSAI DE DURETE»

II.1.Introduction.....	13
II.2.Rappel théorique.....	14
II.2.1.Que sont les essais de dureté.....	14
II.2.2. En quoi consiste un essai de dureté.....	14

II.3. Définition de l'essai de dureté.....	14
II.4. Comment l'essai de dureté fonctionne-t-il?.....	14
II.5. Sélection de la meilleure méthode d'essai.....	15
II.6. Les quatre méthodes d'essai de dureté les plus fréquentes .....	15
II.6.1. L'essai de dureté Rockwell.....	15
II.6.2. Essai de dureté Vickers.....	16
II.6.3. L'essai de dureté Knoop.....	17
II.6.4. L'essai de dureté Brinell.....	17
II.7. la précision et de la répétabilité dans les essais de dureté.....	18
II.8. Contraintes de préparation de la surface pour les essais de dureté.....	18
II.8.1. Essai de macro-dureté.....	18
II.8.2. Essai de micro-dureté.....	18
II.8.3. Déformations.....	19
II.9. But de la manipulation.....	19
II.10. Principe de la manipulation .....	19
II.11. Matériels à utiliser pendant la manipulation .....	19
II.11.1 Le duromètre.....	20
II.12. Mesures.....	21
II.13. Déroulement de la manipulation .....	21
II.14. Travail demandé .....	22
II.14.1. Compte rendu .....	22

### **TP N° 03 « TREMPE DES ACIERS »**

III.1. Introduction.....	24
III.2. Rappel théorique .....	25
III.3. Définition .....	27
III.5. Manipulation.....	27
III.6. Objectifs.....	27
III.7. Documents utiles.....	27

III.8. Matériels utiles.....	27
III.9. Description et Consignes pour l'utilisation du four.....	28
III.10. Travail demandé.....	29
III.10.1. Compte rendu .....	30

## **TP N° 0 4 «MICROGRAPHIE ET MACROGRAPHIE**

IV.1. Objectifs.....	31
IV.2. Principe et but.....	31
IV.3. Matériels utiles.....	31
IV.4. Introduction.....	32
IV.4.1. La macrographie.....	32
IV.4.2. La micrographie.....	32
IV.5. Description et Consignes pour l'utilisation du matériel.....	32
IV.6. Travail demandé.....	33

## **TP N° 0 5 «COULEE D'UN ALLIAGE METALLIQUE»**

V.1. Introduction.....	34
V.2. Rappel théorique .....	35
V.2.1 Définition .....	35
V.2.2. Quelques notions de base.....	35
V.3. Objectifs .....	36
V.4. Préparation au TP.....	36
V.5. Method.....	36
V.5.1. Coulee .....	36
V.5.2. Mesures thermiques .....	37
V.5.3. Essai de ressuage .....	39
V.6. Déroulement du TP.....	40
V.7. Indications.....	40

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Lors de leur maintien en service, certains composants voient leurs propriétés mécaniques évoluer, il est nécessaire de suivre la révolution de ces propriétés, mais il n'est pas toujours possible de prélever des éprouvettes de taille suffisante pour mesurer les caractéristiques mécaniques avec précision. On envisage de déterminer les lois de comportement de ces matériaux à partir des résultats d'essais facilement applicables sur site et ne nécessitant pas de prélèvements. Le présent Polycopie, est une partie d'étude bibliographique sur des essais associés à des travaux pratique réalisés au sein des laboratoires de l'université. Nous y exposons aussi des valeurs mesurées lors des séances de TP menés par des étudiants parcours licence et Master dont Les propriétés mécaniques de base sont déterminées en traction.

Dans le cadre général, nous abordons les essais décrivant :

- L'essai de résilience (l'essai CHARPY) ;
- L'essai de dureté (essai de VICKERS) ;
- Traitement Thermique des aciers ou La trempe (durcissement par trempe) ;
- Micrographie et Macrographie ;
- Coulée d'un alliage métallique.

# TP N° I « L'ESSAI DE RESILIENCE »

## I-1 Introduction:

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues en **dessous** de la limite élastique. Un des moyens pour caractériser la fragilisation d'un métal sous l'action d'un choc est l'essai de résilience. La mesure de résilience donne une représentation de la ténacité du matériau

Les paramètres de ténacité (Si l'énergie à fournir pour produire une fracture dans une éprouvette est importante, on dira que le matériau est « tenace ».) déterminés par l'essai de traction n'ont plus de sens lorsque la charge s'applique très rapidement. On parle de choc lorsque la durée d'application de la charge est de l'ordre de 1/100 de seconde. La résistance au choc ou résilience est caractérisée par le quotient de l'énergie nécessaire pour rompre l'éprouvette en un seul coup par l'aire de la section rompue

Dans ce TP, Le but de est d'étudier comment le type de fracture et de l'énergie requise pour causer la fracture des matériaux soumis aux chocs, et qui dépend de la température ainsi que de la nature et de la structure du cristal du matériau.).

## I.2. RAPPEL THÉORIQUE

### **I.2.1 Définition**

L'essai de traction peut être insuffisant lorsque la charge s'applique très rapidement, puisque des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite d'élasticité dans des conditions particulières qui rendent le matériau fragile.

- ✓ Les facteurs fragilisant sont :
- ✓ Le tri axialité des contraintes ;
- ✓ L'abaissement de la température ;
- ✓ L'augmentation de la vitesse de déformation.
- ✓ Les essais de résilience permettent de caractériser la fragilisation d'un matériau.

La résistance au choc ou résilience est caractérisée par le quotient de l'énergie nécessaire pour rompre l'éprouvette en un seul coup par la surface de la section rompue.

Ils consistent à rompre une éprouvette entaillée à la forme d'une barre à section transversale carrée, pour but de mesurer la résistance d'un matériau à la rupture sous l'action d'un choc.

### **I.3. Présentation de l'essai**

#### **I.3.1. Types d'essai de rupture par impact**

Deux essais normalisés, l'essai Charpy et l'essai Izod, ont été mis au point et servent encore à mesurer l'énergie de rupture, l'essai de résilience Charpy sur éprouvette avec entaille en V étant le plus couramment utilisé. Dans ces deux types d'essai, l'éprouvette a la forme d'une barre à section transversale carrée, dans laquelle a été pratiquée une entaille en V (figure 1-a). La figure I.1 montre le schéma de l'appareil utilisé pour effectuer un essai de résilience sur l'éprouvette avec entaille en V. La charge résulte d'un choc causé par un mouton pendule libéré d'une position armée à une hauteur fixe (h).

L'éprouvette est placée au bas de l'appareil, comme le montre la figure I.1.b. Après la libération du mouton pendule, un couteau monté sur celui-ci vient frapper l'éprouvette et la

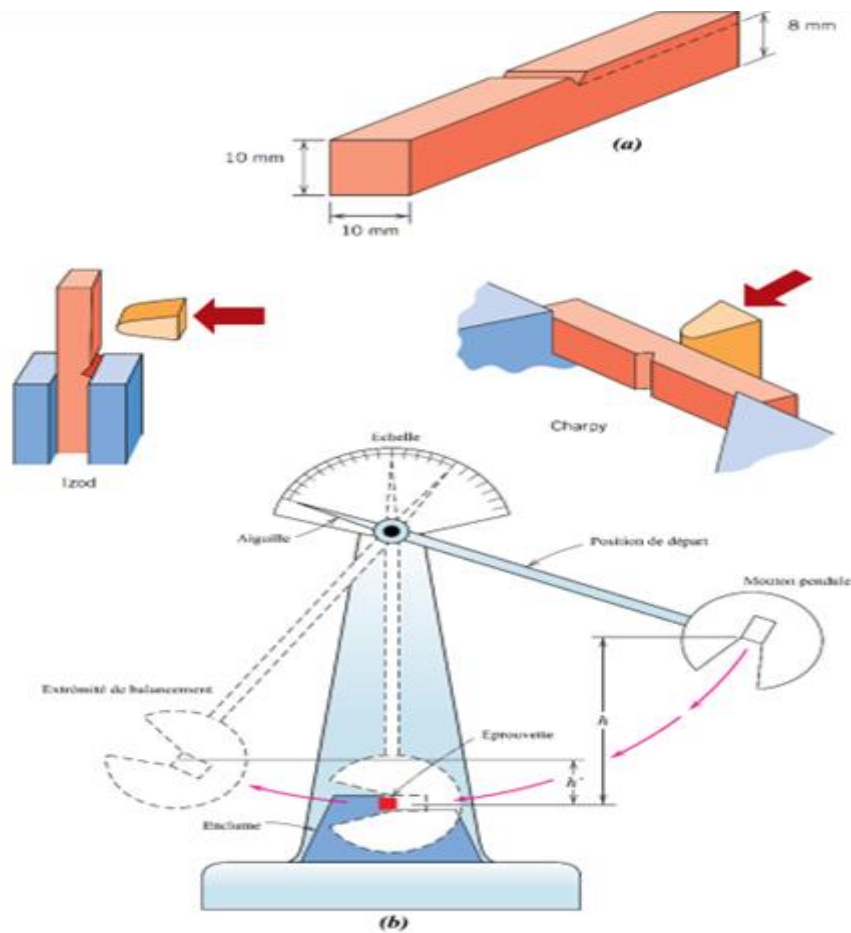
rompt à l'entaille, qui devient un point de concentration des contraintes lors de ce choc à haute vitesse. Le pendule poursuit son mouvement et s'élève à une hauteur maximale ( $h'$ ), inférieure à ( $h$ ). L'énergie absorbée, calculée à partir de la différence entre ( $h$ ) et ( $h'$ ), équivaut à l'énergie de rupture. La différence essentielle entre les essais Charpy et Izod réside dans le support de l'éprouvette, comme le montre la figure I.1.b. Donc, l'énergie ( $W$ ) dépensée pour rompre l'éprouvette vaut :

$$W = W_h - W_{h'} = P(h - h') = mg(h - h') \dots \dots \dots Eq.1$$

Où : ( $m$ ) la masse du marteau en Kg, ( $g$ ) l'accélération de la pesanteur en  $m/s^2$ , ( $h$  et  $h'$ ) hauteurs de départ et d'arrivée du marteau.

La résilience est définie comme l'énergie de rupture (sous choc) ramenée à la section  $S$  de l'éprouvette à l'endroit de la fissure.

$$K = \frac{W}{S} = (J / cm^2) \dots \dots \dots Eq.2$$



**Fig. I.1 :** a) Epreuve servant aux essais Charpy et Izod, b) Schéma d'un appareil utilisé pour effectuer un essai de résilience



### I.3.2. Eprouvtes

L'éprouvette est constituée d'un barreau de section  $10 \times 10$  (mm) entaillée en son milieu et dont la longueur est de 55 mm (Figure I.2).

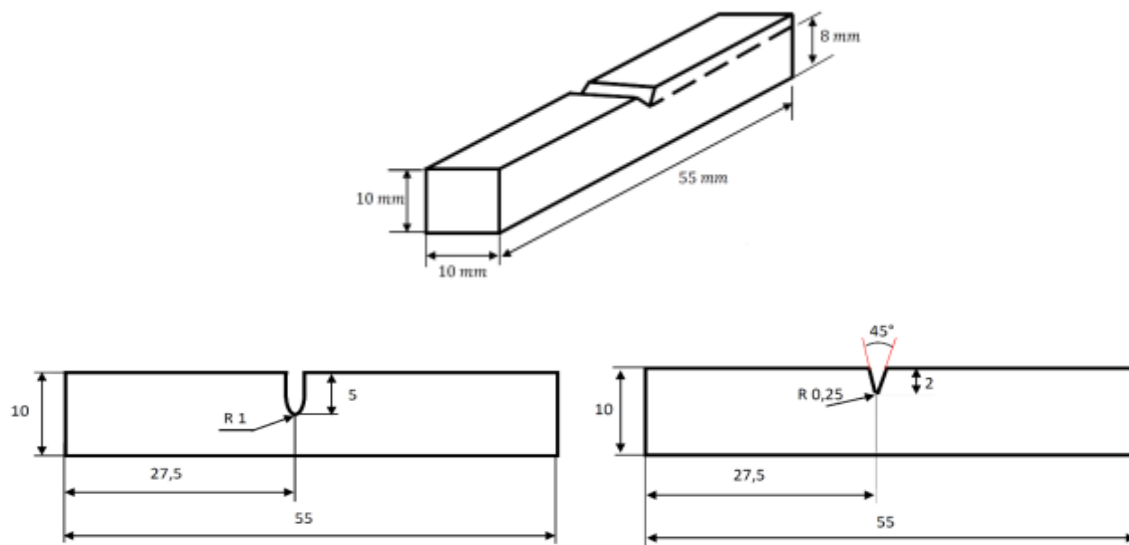
Deux types d'éprouvettes existent;

### I.3.3. Éprouvettes en U

Est un barreau usiné de section carrée de 10 mm de côté et dont la longueur est 55 mm. L'entaille de 2 mm de largeur et de 5 mm de profondeur se termine par un fond cylindrique de 1 mm de rayon (Figure I.2.a). La résilience est alors mesurée et précisée selon le symbole KU.

### I.3.4. Eprouvtes CHARPY V

Pour un essai avec une éprouvette Charpy V (Figure I.2.b), l'éprouvette sera entaillée en V de 2 mm de profondeur et avec un angle de  $45^\circ$  dont les dimensions sont les mêmes que pour les éprouvettes Charpy U. On précise par le symbole KV l'essai de résilience en V.



**Fig I.2:** Eprouvte Charpy en V

- a) Eprouvte Charpy standardisée en U, les dimensions sont en mm.
- b) Eprouvte Charpy standardisée en V, les dimensions sont en mm.

### I.3.5. Effet de température

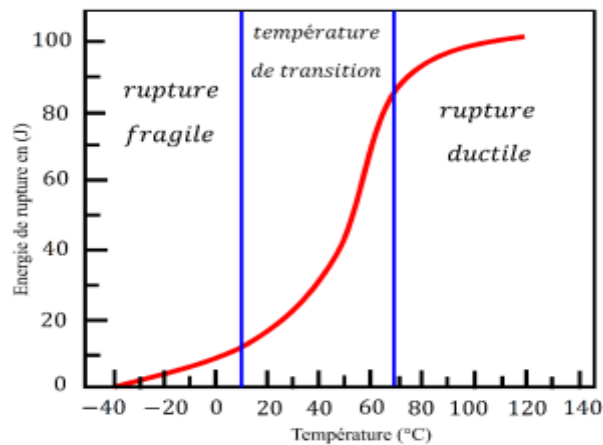
La mesure de l'énergie de rupture absorbée varie en fonction de la température (Figure I.3). A haute température, l'énergie de rupture est relativement élevée, ce qui correspond à une rupture de type ductile. Lorsque la température baisse, la valeur de l'énergie de rupture chute considérablement ce qui correspond à une rupture de type fragile. L'apparence de la surface de défaillance révèle la nature de la

rupture et peut faciliter la détermination de la température de transition ductile-fragile. Une rupture ductile produit une surface fibreuse (mate), tandis qu'une rupture fragile engendre une surface brillante (Figure I.3). Ces deux types de caractéristiques sont présents dans la transition ductile-fragile.

#### **Remarque importante :**

On constate que lorsqu'on effectue des essais de résilience sur plusieurs pièces ayant subi des revenus à des températures différentes, cette modification joue sur la rupture de l'éprouvette.

En effet, plus le revenu a été effectué à haute température, plus la rupture de l'éprouvette sera difficile.



**Fig I.3:** Influence de la variation de température sur l'énergie de rupture d'une éprouvette en acier doux.

#### **I.4. But de l'essai :**

L'essai de résilience sur éprouvette entaillée a pour but de caractériser le risque de rupture fragile du matériau. On appelle résilience l'énergie de rupture ramenée ou non à la section sous entaille de l'éprouvette. Elle s'exprime donc en  $J/cm^2$  ou en J. C'est une mesure de la ténacité du matériau, c'est-à-dire de sa capacité globale à absorber de l'énergie.

#### **I.5. Principe de l'essai :**

L'essai de résilience consiste à déterminer l'énergie nécessaire pour la rupture par choc d'une éprouvette normalisée. Il caractérise donc le non fragilité d'un matériau.

Un couteau de masse  $M$  situé à l'extrémité d'un bras de longueur  $I$  fixé sur un marteau oscille dans un plan vertical autour d'un axe  $O$ . Une partie de l'énergie emmagasinée dans la chute de pendule est utilisée pour rompre l'éprouvette en acier de type XC48. Le centre de gravité du pendule est toujours très voisin de l'arête du couteau du pendule.

#### **I.6. Conditions de réalisation de l'essai**

L'essai doit se faire à une température ambiante, sauf spécification contraire si la température n'est pas spécifiée dans le cahier des charges, on prendra une température égale à  $23^{\circ}+5$

L'éprouvette doit être disposée sur les appuis du mouton de Charpy de manière à ce que l'arrête du couteau du mouton vienne la frapper dans le plan de symétrie de l'entaille et sur la face opposée à celle-ci

Pour l'essai normal, l'énergie nominale du mouton doit être de 300 joules + 10.

Si pendant l'essai, l'éprouvette ne se rompt pas complètement, la valeur obtenue pour la résilience est incertaine, dans ce cas il faudra mentionner:

« Eprouvette non rompue par X joules » et on relèvera l'angle de rupture de la pièce.

### **I.7. Conclusion**

Tout d'abord on peut dire que l'essai de résilience a un inconvénient. Il est destructif, c'est à dire que la pièce est détruite.

Plus les matériaux sont fragiles, moins ils seront résilients.

Même si cet essai est destructif, il est d'une grande importance, car il est impératif de tenir compte de la résistance aux chocs d'un matériau avant de l'utiliser en construction par exemple.

### **I.8. Manipulation et déroulement de l'essai :**

- ✓ Au départ, Le couteau est écarté de la verticale a une hauteur correspondant à une énergie de départ (énergie nominale)  $W_0$  égale à 300 joules.
- ✓ On libère le pendule. Dans sa chute, en passant à la verticale, ce qui grâce au poids propre du couteau, l'éprouvette encaissera une partie du choc, mais sera brisée.
- ✓ On mesure la hauteur à laquelle remonte le pendule pour calculer l'énergie absorbée  $W_1$ .

- On calcul la différence de l'énergie :

$$W = W_0 - W_1 = P.(h_0 - h_1) = m.g.(h_0 - h_1).....Eq.3$$

- On calcul la résilience :

$$K_{cv} \frac{W}{S_0} .....Eq.4$$

Avec  $s_0$  : section au droit de l'entaille.

### **Remarque:**

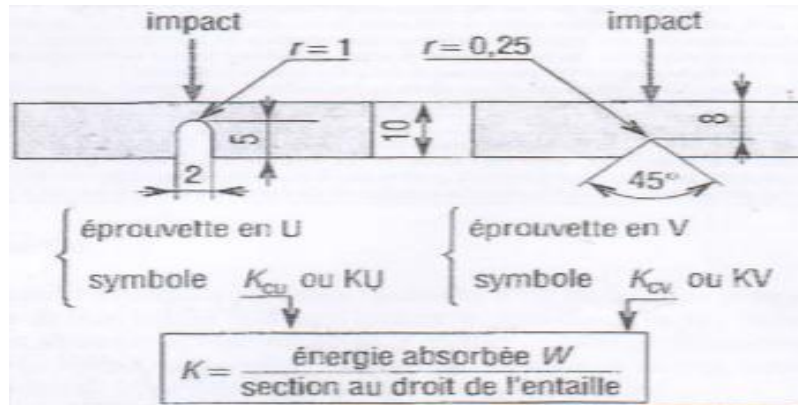
Il faudra au cours du mode opératoire respecter certaines conditions:

- ✓ Bien positionner l'éprouvette sur ses deux points d'appui
- ✓ L'Éprouvette ne doit pas comporter d'amorce de rupture
- ✓ Vérifier la normalisation de l'éprouvette pendant l'essai, la température (dans la salle d'épreuve) soit stable ou conforme.

### I.9.Symbole général : K

Il existe deux types d'éprouvettes, en U et en V (Figure I.4).

Si l'entaille est en forme de V, la résilience est notée  $K_V$ . Si l'entaille est en forme de U, la résilience est notée  $K_U$ . Les dimensions des éprouvettes ET des entailles sont normalisées.



**Fig I .4:** Essai Charpy- forme des éprouvettes (55x 10x 10)

$K_U$  = Energie W absorbée par la rupture (en Joules)

$K_{CU}$  = Résilience (en joules /centimètres carré)

$K_V$  = Energie W absorbée par la rupture (en joule).

$K_{CV}$  = Résilience (en joules par centimètres carré).

Si K est élevé le matériau est tenace dite ductile

Si K est faible, le matériau est dite fragile.

### **\*Remarque importante**

Lorsque l'on diminue la température la résilience K décroît brutalement au voisinage d'une température propre au matériau appelée température de passage ductile/fragile : tous les matériaux deviennent fragiles au dessous de certaine température.

### I.10.Travail demandé :

- Calculer la résilience de l'éprouvette ?
- Qu'est-ce que vous remarquez au niveau de la section rompue.
- Commentez la valeur de résilience obtenue et la comparer avec d'autres matériaux (verre, bois, alliage d'aluminium,...), faites une recherche bibliographique.

**I.10.1.Compte rendu**

- Calculer la résilience de l'éprouvette ?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

- Qu'est ce que vous remarquez au niveau de la section rompus ?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

- Commentez la valeur de résilience obtenue et la comparer avec d'autres matériaux (verre, bois, alliage d'aluminium...)

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....

Faites une recherche bibliographique sur la rupture fragile et la rupture ductile.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

## TP N° II «ESSAI DE DURETE»

### II.1.Introduction:

Vers 1900, Martens a proposé la définition de l'essai de dureté suivante: „La dureté est la résistance d'un corps à la pénétration d'un autre corps (plus dur).“ Cette définition aussi simple que juste s'est imposée jusqu'à ce jour dans le domaine technique. La dureté technique est une grandeur caractéristique mécanique permettant de décrire un matériau ou un état du matériau.

La dureté ne peut être mesurée directement, mais est dérivée de variables de mesure primaires (par exemple, la force d'essai, la profondeur de pénétration, la zone d'empreinte). La valeur de la dureté est déterminée selon la méthode d'essai de dureté:

- à partir de la force d'essais et d'une grandeur géométrique caractérisant l'empreinte de dureté (par exemple, la profondeur de pénétration)
- uniquement par une longueur caractérisant l'empreinte de dureté
- par une réponse matérielle différente (par exemple, capacité d'évaluer la surface à gratter)

Dans ce TP, notre étude sur le traitement thermique se portera sur l'essai de dureté dans trois milieux de trempe différent (huile, eau, air). Il s'en suivra par une étude de l'influence de la température de revenu, temps de maintien sur des échantillons à l'état brut de trempe (eau).

## **II.2.RAPPEL THÉORIQUE**

L'essai de dureté est un élément majeur dans de nombreuses procédures de contrôle qualité et les travaux de R&D.

### **II.2.1 Que sont les essais de dureté ?**

Comment choisir la meilleure méthode d'essai ?

Quelle est la meilleure application pour les essais de dureté ?

Que conclure après avoir réalisé des essais de dureté ?

Les éléments qui suivent répondent à ces questions, ainsi qu'à d'autres

### **II.2.2. EN QUOI CONSISTE UN ESSAI DE DURETÉ ?**

L'application d'un essai de dureté permet d'évaluer les propriétés d'un matériau telles que sa résistance, sa ductilité, sa résistance à l'usure et contribue ainsi à déterminer si le matériau ou le traitement de ce matériau convient à l'usage souhaité.

### **II.3. Définition de l'essai de dureté :**

C'est un essai de détermination de la résistance qu'un matériau offre contre la déformation permanente par pénétration d'un matériau plus dur. Cependant, la dureté n'est pas une propriété fondamentale d'un matériau. C'est pourquoi lorsque l'on tire les conclusions d'un essai de dureté, il faut toujours faire une évaluation quantitative relative aux facteurs ci-dessous :

- ✓ charge exercée sur le pénétrateur
- ✓ profil de temps de charge spécifique et durée d'application de charge spécifique
- ✓ géométrie de pénétrateur spécifique

### **II.4. COMMENT L'ESSAI DE DURETÉ FONCTIONNE-T-IL ?**

L'essai de dureté type consiste à presser un objet spécifiquement dimensionné (pénétrateur) avec une charge donnée dans la surface du matériau à tester. La dureté est déterminée par la



mesure de la profondeur de pénétration du pénétrateur ou en mesurant la taille de l'empreinte qu'il laisse.

- ✓ Les essais de dureté qui mesurent la profondeur de pénétration comprennent : essai Rockwell, essai de pénétration instrumentalisé par bille
- ✓ Les essais de dureté qui mesurent la taille de l'empreinte laissée par le pénétrateur sont : Vickers, Knoop, et Brinell

## **II.5.SÉLECTION DE LA MEILLEURE MÉTHODE D'ESSAI**

Comment choisir la méthode d'essai ?

Le type d'essai de dureté à utiliser doit être déterminé par la microstructure c.-à-d. l'homogénéité du matériau testé ainsi que par le type de matériau, la taille de la pièce et son état.

Dans tous les essais de dureté, le matériau soumis à l'empreinte doit être représentatif de l'intégralité de la microstructure (sauf si l'objectif est d'étudier les différents composants de la microstructure). Par conséquent, si la microstructure est très grossière ou hétérogène, l'empreinte requise devra être plus grande que pour un matériau homogène. Il y a quatre principaux essais de dureté chacun ayant ses avantages et ses contraintes. Il y a différentes normes pour ces essais qui détaillent les procédures et les applications de l'essai de dureté.

Lors du choix de la méthode d'essais de dureté, les considérations suivantes sont importantes :

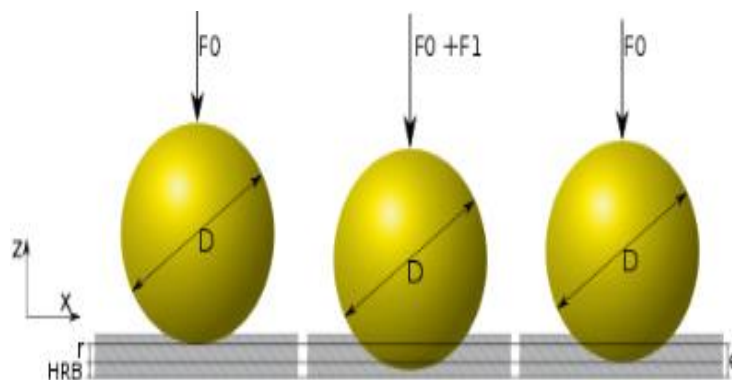
- ✓ Le type de matériau à tester en dureté
- ✓ L'exigence de se conformer à une norme
- ✓ La dureté approximative du matériau
- ✓ L'homogénéité/hétérogénéité du matériau
- ✓ La taille de la pièce
- ✓ La nécessité de procéder à un enrobage
- ✓ Le nombre d'échantillons à tester
- ✓ La précision requise du résultat

## II.6.LES QUATRE MÉTHODES D'ESSAI DE DURETÉ LES PLUS FRÉQUENTES :

### II.6.1.L'essai de dureté Rockwell

La méthode d'essai de dureté Rockwell est rapide (Figure II.5) ; développée pour le contrôle de production, elle permet la lecture directe des résultats ; surtout utilisée pour les matériaux métalliques. La dureté Rockwell (HR) est calculée en mesurant, à une charge donnée, la profondeur de l'empreinte laissée par l'enfoncement d'un pénétrateur dans le matériau de l'échantillon.

- ✓ Généralement utilisée pour les échantillons de grande taille
- ✓ Un « essai rapide » principalement utilisé pour les matériaux métalliques
- ✓ Est également mise en œuvre pour des essais plus poussés, tels que l'essai Jominy (essai de trempabilité - HRC)



**Fig. II.5.** Principe de la dureté Rockwell (échelle B, bille en acier)

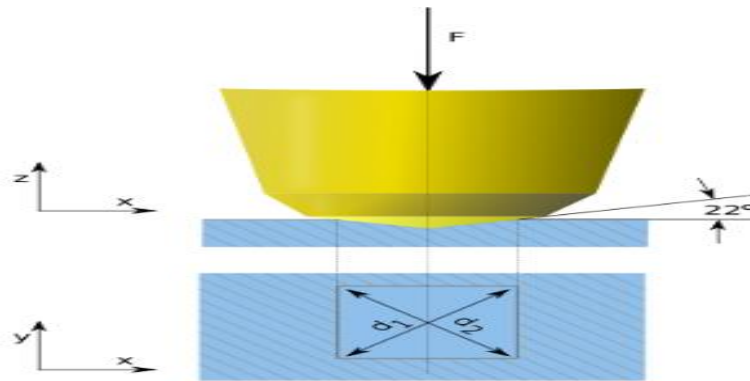
### II.6.2.Essai de dureté Vickers

L'essai de dureté Vickers (Figure II.6) convient à tous les matériaux solides y compris métalliques. La dureté Vickers (HV) est calculée en mesurant, à une charge donnée, les longueurs des 2 diagonales d'une empreinte laissée dans le matériau de l'échantillon par l'introduction d'un pénétrateur diamant pyramidal. Les diagonales de l'empreinte sont lues de manière optique afin de déterminer la dureté à partir d'une table ou formule.

Utilisé pour les essais de dureté sur tous les matériaux solides y compris métalliques

Adapté à une vaste gamme d'applications

Comprend un sous-groupe d'essai de dureté des soudures.



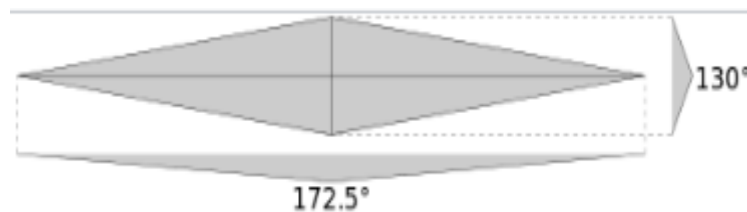
**Fig. II.6.** Principe de la dureté Vickers

### **II.6.3.L'essai de dureté Knoop**

La méthode Knoop (HK) (Figure II.7) est une alternative à la méthode Vickers destinée aux essais de microdureté. Elle est principalement utilisée pour éviter les fissures dans les matériaux fragiles ainsi que pour faciliter les essais sur les couches minces. Le pénétrateur est un diamant pyramidal asymétrique. L'empreinte est déterminée par la mesure optique de la grande diagonale.

Utilisé pour les matériaux durs et fragiles, telles que les céramiques.

Convient pour les petites surfaces allongées comme les revêtements.



**Fig. II.7** Angles du pénétrateur pour la détermination de la dureté Knoop.

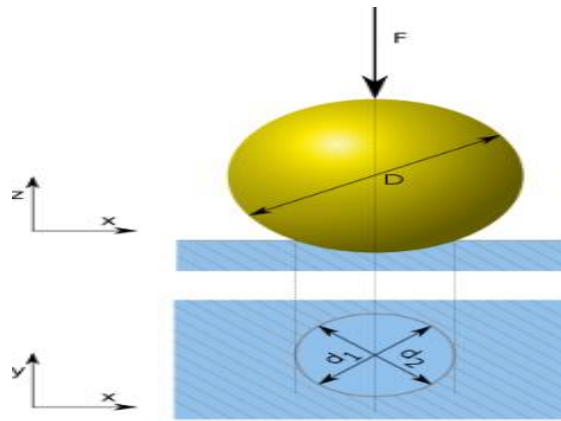
### **II.6.4.L'essai de dureté Brinell**

L'essai de dureté Brinell (Figure II.8) est utilisé pour les grands échantillons à structure granulaire grossière ou non homogène. L'essai de dureté Brinell (HBW) laisse une empreinte relativement grande faite avec une bille de carbure de tungstène. La taille de l'empreinte est lue par mesure optique.

Utilisé pour les matériaux à structure granulaire grossière ou non homogène.

Utilisé pour les grands échantillons

Convient pour les pièces forgées ou en fonte dont les motifs structurels sont de taille importante.



**Fig. II.8** Principe de la dureté Brinell.

## **II.7.COMMENT S'ASSURER DE LA PRÉCISION ET DE LA RÉPÉTABILITÉ DANS LES ESSAIS DE DURETÉ**

L'application correcte des essais de dureté nécessite une préparation et une exécution minutieuses. Cependant, une fois que la méthodologie de base est en place, les essais de dureté offrent une bonne précision et une bonne répétabilité.

Facteurs influençant les essais de dureté

Un certain nombre de facteurs influencent les résultats des essais de dureté. En règle générale, plus la charge utilisée pour procéder à l'essai de dureté est faible, plus le nombre de facteurs à contrôler est important.

Voici quelques-uns des facteurs les plus importants à prendre en compte pour assurer la précision d'un essai de dureté.

Il faut entre autres contrôler certains facteurs externes comme la lumière, la poussière, les vibrations, la température et l'humidité

L'appareil et la platine doivent être positionnés sur une table robuste et stable et l'échantillon doit être bridé ou maintenu dans un support ou sur une enclume

Le pénétrateur doit être positionné perpendiculairement à la surface d'essai.

En cours d'essai, les conditions d'éclairage doivent être constantes pour les méthodes Vickers, Knoop ou Brinell.

Le testeur doit être rééquilibré/vérifié à chaque changement de pénétrateur ou d'objectif.

## **II.83CONTRAINTES DE PRÉPARATION DE LA SURFACE POUR LES ESSAIS DE DURETÉ**

Avant de faire un essai de dureté sur un matériau métallique ou non, il faut préparer la

surface. L'état de surface requis dépend du type d'essai et de la charge utilisée. En général, la qualité de la préparation de la surface a un effet direct sur le résultat de l'essai. Il est donc utile de tenir compte du compromis entre qualité de surface et variation du résultat d'essai avant d'envisager une préparation de surface moins poussée.

### **II.8.1.Essai de macro-dureté**

Généralement, une surface meulée est suffisante et parfois aucune préparation n'est nécessaire.

### **II.8.2.Essai de micro-dureté**

En raison des faibles charges utilisées pour les essais de dureté, les essais de microdureté nécessitent une surface polie ou électropolie. Il est important que les bords/sommets d'une empreinte soient clairement visibles pour le système d'analyse optique. La préparation peut être réalisée de manière mécanique, chimique ou électrochimique. Il est important que l'apport de chaleur ou de froid ne modifie aucunement les propriétés de la surface de l'échantillon.

### **II.8.3.Déformations**

Le tronçonnage et le prépolissage peuvent induire des déformations. Il faut les éliminer par polissage à 6, 3, ou 1,  $\mu\text{m}$ , en fonction de la charge utilisée pour l'essai. Pour les faibles charges (inférieures à 300 gf), la surface ne doit présenter aucune déformation et les échantillons doivent avoir subi un polissage aux oxydes ou un polissage électrolytique afin d'obtenir une surface sans dommage. Il faut également tenir compte du fait que les matériaux mous et/ou ductiles (c'est-à-dire inférieur à 120-150 HV) sont plus sensibles à la formation d'artefacts de préparation.

Le tableau ci-dessous présente les exigences de préparation pour les différents essais de dureté.

## **II. 9.But de la manipulation :**

- ✓ Mettre en évidence l'essai de dureté.
- ✓ Savoir utiliser le duromètre afin de le réutiliser pendant les manipulations qui suivent.
- ✓ Caractérisation d'un matériau à partir de l'essai de dureté.
- ✓ Savoir utiliser le tableau des Conversions dureté HV, HB, HRC- Résistances à la traction  $R_m$

## II.10. Principe de la manipulation :

La dureté caractérise la résistance d'un matériau à la pénétration d'un corps dur. Plusieurs essais ont été mis au point, mais leur principe de base est identique. L'essai de dureté consiste à créer et exploiter l'empreinte laissée sur une pièce par un pénétrateur soumis à un effort  $F$ . Les trois techniques les plus répandues sont ; la mesure selon Brinell, selon Vickers et selon Rockwell. Ces essais se distinguent essentiellement par la forme géométrique du pénétrateur (Brinell : une sphère ; Vickers : une pyramide de base quadratique avec angle d'ouverture de  $136^\circ$ , et Rockwell: type B : une sphère, type C : un cône avec angle d'ouverture  $120^\circ$ ) (voir tableau (II.1)).

Remarque : dans notre cas on va procéder à un essai de VICKERS.

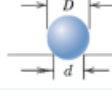

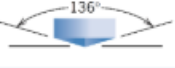

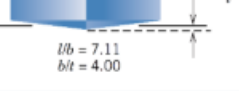

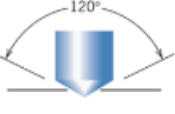

Essai	Pénétrateur	Forme d'indentation		Charge	Formule du nombre de dureté
		Vue latérale	Vue de dessus		
Brinell	Bille en acier ou en carbure de tungstène de 10 mm			$P$	$HB = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microdureté	Pyramide en diamant			$P$	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microdureté	Pyramide en diamant			$P$	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell et Rockwell superficiel	Cône en diamant Bille en acier d'un diamètre de 1,59 mm, 3,18 mm, 6,35 mm et 12,70 mm			$\left. \begin{array}{l} 60 \text{ kg} \\ 100 \text{ kg} \\ 150 \text{ kg} \end{array} \right\} \text{Rockwell}$ $\left. \begin{array}{l} 15 \text{ kg} \\ 30 \text{ kg} \\ 45 \text{ kg} \end{array} \right\} \text{Rockwell superficiel}$	

Tableau II.1 : Différentes méthodes d'essai de dureté.

## II.11. Matériels à utiliser pendant la manipulation :

- Des éprouvettes: qui seront de formes cylindriques de différents métaux ayant pour hauteur au moins 15 mm pour qu'on puisse la maintenir par les doigts.
- Des polisseuses: pour rendre les surfaces des échantillons propres et planes pour pouvoir les utiliser sur le duromètre. Dans notre laboratoire, on dispose une polisseuse de marque (MECAPOL). Le polissage se fait par des disques abrasifs collés de l'ordre croissant de densité de graines par  $\text{mm}^2$  jusqu'à obtenir des surfaces polies.

### **II.11.1. Le duromètre:**

On dispose au laboratoire d'un duromètre avec :

- ✓ Une unité de réglage de la charge appliquée sur l'échantillon,
- ✓ Un support d'échantillons ou enclume,
- ✓ Un volant permettant la montée ou la descente du support d'échantillons,
- ✓ Un système de maintien du pénétrateur,
- ✓ Un levier permettant d'appliquer la charge déjà choisie,



**Fig. II.9.**Duromètre

### **II.12. Mesures:**

- ✓ Mettre le duromètre sous tension,
- Reposer la pièce correctement sur l'enclume la plus appropriée ;
- ✓ Appliquer la précharge en amenant lentement et sans choc la pièce en contact avec le pénétrateur, en manœuvrant le volant.
  - ✓ Appliquer la charge en tournant le levier jusqu'à la butée, en agissant en même temps sur les deux poignées pour ne pas solliciter le bâti. Après quelques secondes enlever la charge en ramenant le levier dans sa position initiale.
  - ✓ Prendre directement la valeur de la dureté affichée sur le digit.

- ✓ Pour modifier la charge, tourner le volant jusqu'à faire coïncider le trait avec le milieu du trou correspondant à la charge choisie. Fixer ce volant en insérant la cheville de blocage dans le trait correspondant.

### **II.13. Déroulement de la manipulation :**

Chaque sous groupe va disposer de deux types de métaux ;

- ✓ Bien polir les deux surfaces de chaque éprouvette;
- ✓ Le bien nettoyé avec une solution d'alumine pour enlever les bavures des surfaces; Bien nettoyer les enclumes;
- ✓ Mesurer pour une face plusieurs mesures et prendre la moyenne (se limiter à trois mesures pour cette face) pour chaque métal. Etant donné que le choix du type de l'essai est celle de l'essai BRENNELL, on doit respecter les consignes suivantes :
- ✓ Choisir la charge correspondante à appliquer,
- ✓ Tourner l'unité de réglage de charge jusqu'à avoir la valeur choisie,
- ✓ Monter le pénétrateur de forme conique,
- ✓ Placer l'échantillon étalon sur son support,
- ✓ Tourner le levier C jusqu'à la butée, en agissant en même temps sur les deux poignées pour ne pas solliciter le bâti.
- ✓ Régler à zéro valeur sur l'afficheur,
- ✓ Patienter quelques secondes (6-8 secondes),
- ✓ Lire la valeur de dureté sur le digit,
- ✓ Pivoter le levier vers le haut,
- ✓ Tourner le volant pour éliminer le contact entre échantillon et pénétrateur,
- ✓ Refaire le même travail sur d'autres endroits afin de relever plusieurs valeurs (plus que 3 valeurs),
- ✓ Calculer la valeur moyenne.



- ✓ Calculer la différence entre la valeur moyenne mesurée avec la valeur indiquée sur l'échantillon étalon. Cette différence est faite l'erreur de la machine.
- ✓ Dans les essais qui suivent sur les échantillons en question, on doit prendre en compte de l'erreur de la machine Soit  $H$  l'erreur de la machine :

La dureté réelle sera donc égale à la somme de la dureté mesurée sur l'échantillon en question et l'erreur de la machine :  $H = H_{\text{mesurée}} + H_{\text{réelle}}$ .

Dresser ces mesures dans tableau comparatif.

## **II.14. Travail demandé**

On vous fournit deux échantillons différents, on vous demande de :

- Bien polir les trois échantillons,
- Mesurer la dureté de chaque échantillon selon le type de dureté (HB). Conclure.

## II.14.1.Compte rendu

- Calculer la dureté de chaque échantillon selon le type de dureté (HB) avant et après traitement?

N°	Nature de l'éprouvette	Type de l'essai	Mesure de dureté			
			Empreinte 1	Empreinte 2	Empreinte 3	La moyenne
1	Avant traitement	HB				
2	Après traitement (refroidissement par eau)					
3	Après traitement (refroidissement par huile)					
4	Après traitement (refroidissement par air libre)					

**Tableau II.2** Mesure de dureté avant et après traitement.

.....

.....

.....

.....

- Qu'est ce que vous remarquez sur la surface des trois échantillons après le polissage? Comenter.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

- Commentez la valeur de dureté obtenue et la comparer avec d'autres matériaux dans la littérature.

.....

.....

.....

.....

.....

## TP N° III « TREMPE DES ACIERS »

### III.1.Introduction:

L'univers du traitement thermique constitue un monde considérablement abstrait. Pour les mécaniciens, le traitement thermique est un outil essentiel car il permet de produire des aciers avec des propriétés désirées. C'est un processus contrôlé utilisé pour modifier la microstructure de matériaux tels que les métaux et alliages afin d'obtenir des propriétés qui améliorent la durée de vie d'un composant ; par exemple, en augmentant la dureté de surface, la résistance à la température, la ductilité et la résistance. En d'autres termes, le traitement thermique consiste à faire subir à un matériau un cycle thermique comprenant le chauffage, le maintien à une ou plusieurs températures, puis le refroidissement à une vitesse déterminée. Il existe différents types de traitement dont les plus fréquemment réalisés sont les trempes, les revenus, les recuits, la cémentation, la nitruration et la carbonitruration. Chacun des traitements possède sa spécificité.

Dans ce TP, notre étude sur le traitement thermique se portera sur l'essai de dureté dans trois milieux de trempe différent (huile, eau, air). Il s'en suivra par une étude de l'influence de la température de revenu, temps de maintien sur des échantillons à l'état brut de trempe (eau).

## III.2.RAPPEL THÉORIQUE

### III.2.1. Définition

Le traitement thermique est un outil essentiel au mécanicien car il permet d'obtenir des aciers avec des propriétés désirées.

La trempe est un traitement thermique (Figure III.10) ayant pour but d'améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux. Ce traitement comprend les étapes suivantes :

#### *Quels sont les éléments d'un traitement thermique ?*

Un traitement thermique consiste à jouer sur trois éléments :

- ✓ **La température** : Une austénitisation complète ou partielle de l'acier à une température dite de trempe (température d'austénitisation  $T_a$ ), (selon le type de l'acier).

Industriellement on choisit la température d'austénitisation comme suit :

$T_a = A_{c3} + 50^{\circ}\text{C}$  pour les aciers hypoeutectoïdes ;

$T_a = A_{c1} + 50^{\circ}\text{C}$  pour les aciers hypereutectoïdes.

- ✓ **Le temps** : Un maintien isotherme à cette température pendant un temps dit temps de trempe  $t_a$ ,
- ✓ **Le milieu de séjour durant le maintien en température lors de trois phases différentes:**
  - La montée en température.
  - Le maintien à température.
  - Le refroidissement.

- La vitesse appropriée pour obtenir les caractéristiques voulues amène à choisir un milieu de refroidissement (par exemple air, eau, huile, gaz ou l'air libre) en fonction de la dimension de la pièce à traiter.

### *Quelles sont les caractéristiques de mise en œuvre ?*

On recherche un compromis entre les caractéristiques suivantes :

- ✓ **Ductilité (capacité de déformation) :** La capacité à supporter une déformation. On suit, toujours au travers de l'essai de traction, les valeurs suivantes :
  - **A** (allongement après rupture),
  - **Z** (coefficient de striction reflétant par exemple les possibilités de formage à froid du métal),
  - **Ag** allongement réparti (observé sur l'éprouvette avant le début de la striction et correspondant à la force équivalente à la résistance à la traction). Cette dernière valeur permet d'apprécier la sécurité en service. Eventuellement, on utilise  $R_m/R_e$  comme indice de la capacité de déformation plastique de l'acier
- ✓ **Résistance (limite d'élasticité, résistance à la traction) :** La capacité à maintenir l'intégrité notamment en ce qui concerne les risques de rupture face aux sollicitations mécaniques. On examine dans certains cas les données en tenant compte de la température et/ou de la vitesse de déformation. Les valeurs de référence établies grâce à un essai de traction sont :
  - **Re** (limite d'élasticité) qui détermine la limite au-delà de laquelle apparaissent des déformations plastiques,
  - **Rm** (résistance à la traction) qui caractérise bien la force maximale que peut supporter un élément de structure soumis à une traction pure.
- ✓ **Résilience, ou ténacité (résistance au choc) :** capacité à résister à l'amorçage ou à la propagation de fissures
- ✓ **Dureté :** mesure de résistance à la déformation d'un matériau. Différents essais existent en fonction de la forme du pénétrateur et de la référence permettant d'estimer la facilité d'enfoncement comme le diamètre de l'empreinte d'une bille dans les essais Brinell.

### **III.3.Principe :**

La trempe est un traitement thermique utilisé pour durcir des alliages. Elle comporte deux phases : une phase d'austénitisation qui permet de mettre en solution le carbone et les autres éléments de l'alliage, une phase de refroidissement rapide qui entraîne la formation de martensite, structure confèrent le durcissement maximal de l'alliage.

### **III.4.Manipulation :**

Nous utilisons donc trois échantillons pour trois milieux différents de trempe. Il faut tous d'abord les amener à la température d'austénitisation. Elle correspond à  $Ac_3 + 50^\circ$ .  $Ac_3$  étant la température de fin de transformation ferrite austénite. Ici elle est en gros de  $850^\circ C$ .

Le temps de maintien à cette température n'a de l'influence que sur la grosseur des grains d'austénite. La mise en température doit s'effectuer progressivement pour respecter l'équilibre thermodynamique de l'acier.

### **III.5.Objectifs :**

- ✓ Maîtriser les étapes de trempe d'un acier en conditions anisothermes (refroidissement continu).
- ✓ Se familiariser avec les diagrammes TRC des aciers.
- ✓ Mettre en évidence les différences entre la trempe dans l'eau et celle dans l'huile de points de vue structure et de point de vue caractéristiques mécaniques.
- ✓ Choisir le mode de refroidissement adéquat (air, eau, huile) selon l'utilisation et le fonctionnement de la pièce.

### **III.6.Documents utiles :**

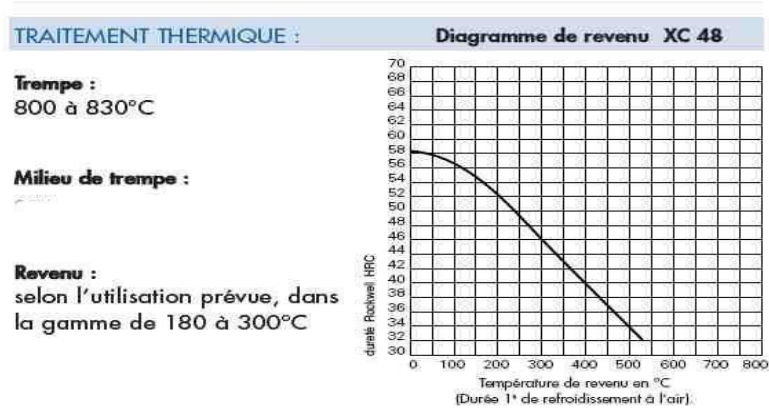
- ✓ Diagramme TRC de l'acier XC48,
- ✓ Diagrammes des modes de refroidissement air, eau et huile (transparents),
- ✓ Tableau de conversions de dureté HV, HB, HRC- Résistances à la traction  $R_m$  moyennes.

### **III.7.Matériels utiles :**

- Éprouvettes en acier XC 48,
- Deux polisseuses à plateaux pour le polissage des éprouvettes avant et après trempe pour

l'observation au microscope,

- ✓ Un microscope optique pour l'observation des surfaces polies des éprouvettes.
- ✓ Un duromètre pour la mesure de la dureté des éprouvettes,



**Fig. III.10.**Diagramme de revenu XC 48.

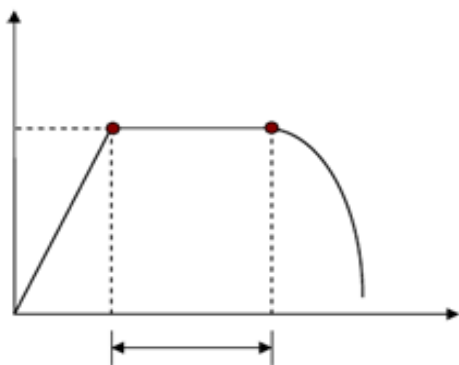
### III.7.1. Description et Consignes pour l'utilisation du four :

Dans notre faculté un four électriques de marque NABERTHERM à atmosphère contrôlée dont les caractéristiques suivantes :

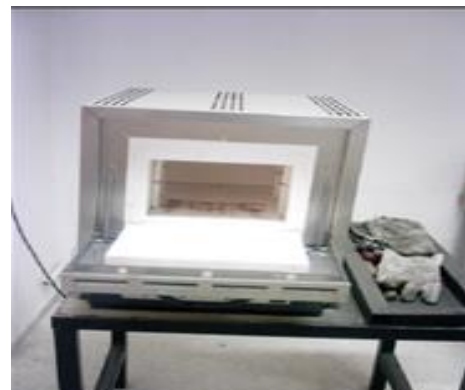
- ✓ Température maximale : 1000°C, Puissance en chauffage : 18.6 KW, le four est muni d'un programmateur pour bien programmer la température et temps de chauffage.

Pour chauffer une pièce, on doit suivre soigneusement les étapes suivantes :

- ✓ Charger les pièces dans le four en les plaçant de façon à ce que le gaz protecteur puisse passer sous ses pièces,
- ✓ Verrouiller la porte, Temps et Température (Ta, ta)



**Fig. III.12:** Cycle de trempe



**fig.III.13:** Four pour traitement thermique

- ✓ Appuyer sur le bouton matche arrêt,
- ✓ Faire entrer la température de chauffage à 850°C, et appuyer sur le bouton enter,
- ✓ Faire entrer le temps de chauffage (30 minutes) et ensuite appuyer sur le bouton enter,
- ✓ Enfin appuyer sur le bouton start.
- ✓ Pendant le temps de chauffage vérifier de temps en temps les valeurs.
- ✓ Le temps étant terminé, placer l'interrupteur sur 0,
- ✓ Au moment de sortir les pièces, faire attention à les toucher avec les mains ou à les laisser tomber sur vos collègues.
- ✓ Nettoyer très souvent la chambre de chauffe avec un aspirateur pour retirer les oxydes métalliques.

### **III.8. Travail demandé :**

Chaque groupe va prendre une éprouvette XC48

1- Pour chaque éprouvette, bien polir une des deux faces de l'éprouvette, (l'autre ne sera pas bien polie) puis l'attaquer par une solution alcoolique nitrique puis observer au microscope. Commenter la figure obtenue. (Éprouvette 1 et 2 avant trempe).

2- Déterminer la dureté de la structure d'équilibre de l'acier XC 48 (faire la conversion en HRC) avant la trempe.

3- Pour chaque groupe, placer ces trois éprouvettes dans le four. Ne pas oublier de laisser de l'espace entre ces éprouvettes.

4- Commencer à chauffer ces éprouvettes tout en respectant les consignes ci-dessus décrites pour le four.

5- Une fois le chauffage est fini, chaque groupe prendra une éprouvette pour la tremper dans l'eau, la 2ème dans l'huile, la dernière dans l'air calme. Attendre jusqu'au refroidissement complet.

6- Analyser les résultats et notez ce vous remarquez dès la sortie des pièces du four jusqu'à leur refroidissement dans les deux bains (d'eau et d'huile).

7- Passez ensuite au polissage de ces éprouvettes, leur attaque par la solution alcoolique et par la solution d'alumine, leur examen à la loupe et microscope. Que remarquez-vous?

8- Refaire l'essai de résilience sur les trois éprouvettes après trempes et comparer avec les résultats précédents (Avant trempe)



9- Comparer et conclure.

10-Compte rendu.

11-Nettoyer et ranger le matériel.

**Remarque :**

Pour compléter notre travail, nous procédons dans le prochain TP à la mesure de la dureté de chaque éprouvette.

**III.8.1.Compte rendu**

Qu'es ce vous remarquez pendant la sortie des pièces du four jusqu'à leur refroidissement dans les deux bains (d'eau et d'huile)

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

- Calculer la résilience de l'éprouvette ?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

# TP N° 04 «MICROGRAPHIE ET MACROGRAPHIE»

## **IV.1.Objectifs :**

- ✓ Mettre en évidence les différences entre Les deux techniques d'examens : la micrographie et macrographie.
- ✓ Maîtriser les étapes de chaque technique d'observation des surfaces des pièces.
- ✓ Maîtriser l'utilisation de certains outils de travail (loupes, microscope, polisses...).
- ✓ Savoir identifier les différentes structures et compositions de certains matériaux en fonction des outils, machines et produits chimiques présents dans le laboratoire.

## **IV.2.Principe et but:**

Mettre en évidence les constituants des produits métallurgiques (métaux pures, combinaisons solutions solides, eutectique et eutectoïde). Pour cela, on va procéder à l'examen à des loupes de différents grossissements et à l'examen au microscope par réflexion d'une surface polie et généralement attaquée.

## **IV.3.Matériels utiles :**

- ✓ Éprouvettes en alliage d'aluminiums obtenus par moulage au sable.
- ✓ Deux polisseuses à plateaux pour le polissage des éprouvettes avant examen.
- ✓ Des papiers abrasifs de différentes granulométries (120, 240, 400, 600, 1000 g/mm<sup>2</sup>).
- ✓ Une solution d'alumine utilisée avec les papiers abrasifs par les polisseuses.
- ✓ Une solution alcoolique d'acide nitrique ou une solution alcoolique d'acide picrique (50 cm<sup>3</sup> d'acide par litre (  $\rho = 1,33\text{g/cm}^3$ ) pour mettre en évidence les joints des cristaux de ferrites et colore la perlite en sombre.
- ✓ Des loupes de différents grossissements (2X, 5X, 10X, 20X, 25X...).

- ✓ Un microscope optique pour l'observation des surfaces polies des pièces fabriquées par moulages.

#### **IV.4. Introduction :**

La métallographie est la discipline qui étudie la structure cristalline des métaux et des alliages et les relations entre cette structure et les propriétés physiques des métaux. Les principaux utilisés en métallographie est le microscope.

L'observation au microscope- par exemple- d'échantillons convenablement préparés, permet de déterminer la taille, la structure et l'orientation des cristaux des métaux et alliages. Grâce à de telles observations, les métallurgistes peuvent fréquemment identifier un métal ou un alliage, découvrir d'éventuelles impuretés et vérifier l'efficacité des traitements de trempe et de recuit.

#### **IV.4.1 La macrographie :**

C'est la partie de la métallographie qui utilise, dans son examen, des outils d'observation de faibles grossissements ne dépassant pas les 5 à 10 fois tels l'œil nu, loupe.

#### **IV.4.2. La micrographie:**

La micrographie est la technique qui utilise des instruments de forts grossissements allant de 25 et 1500 fois pour les microscopes optiques et jusqu'à  $5 \times 10^5$  fois pour les microscopes électroniques à balayage. Ces deux techniques ont presque les mêmes étapes et les mêmes applications.

#### **IV.5. Description et Consignes pour l'utilisation du matériel en disposition :**

- ✓ Les polisseuses à disques ou plateaux de marque Persi MECAPOL, figure IV.14.: la première de type P230 à un seul disque et la deuxième de type P260 à deux disques de 250 mm de diamètre (de même puissance 180 W).
- ✓ Avant de mettre sous tension la polisseuse s'assurer que le ou les papiers abrasifs sont en places et bien serrés par les cerceaux.
- ✓ Mettre sous tension la machine en appuyant sur le bouton du côté gauche (bouton 1) puis appuyer sur le bouton (I), pour l'arrêter appuyer sur le bouton (S)



**Fig IV.14.** Polisseuse à deux disques

- ✓ Ouvrir les robinets d'eau en appuyant sur le bouton 5, pour les fermer appuyer sur le bouton P.
- ✓ Appuyer sur les touches ↑ et ↓ pour augmenter ou diminuer les vitesses de rotation des plateaux.
- ✓ Changer de temps en temps le sens de rotation des plateaux en appuyant respectivement sur (S).
- ✓ Changer le papier abrasif s'il est nécessaire.
- ✓ Mettre à chaque fois quelques gouttes d'une solution d'alumine sur les plateaux en mouvement contre les pièces.
- ✓ Une fois terminé, nettoyer les machines et les mettre hors tension.

- **Les loupes:** sont des loupes standard.-

- **Le microscope :** il s'agit d'un microscope optique.

- ✓ Pour observer, placer l'échantillon à sa position dans le plateau du microscope. En s'aidant de la netteté de l'image, des oculaires et objectifs, essayé de faire les réglages nécessaires doucement.
- ✓ Prenez des notes et observations sur les images obtenues.
- ✓ Éteindre le microscope si achevé les observations.

#### **IV.6. Travail demandé :**

- 1- Chaque groupe va prendre une des pièces coulées.
- 2- Ponçage et nettoyage des pièces si nécessaire avec une lime.
- 3- Procéder au polissage de ces éprouvettes par granulométrie croissante sans oublier

l'arrosage avec l'eau et la solution d'alumine.

4- Avec les éprouvettes graduées verser 25 Cm<sup>3</sup> d'une solution alcoolique d'acide nitrique ou picrique dans un demi litre d'eau et procéder à l'attaque les surfaces de ces éprouvettes (faire attention aux doigts) pendant 15 minutes. Que constatez-vous ?

5- Procéder maintenant à l'examen de ces surfaces avec les loupes puis avec le microscope.

6- Prenez notes et observations sur les figures acquises.

7- Interpréter les résultats obtenus en se basant sur les explications des enseignants dans les ateliers et les notions vus au cours.

8- Nettoyer et ranger tout le matériel.

9- Compte rendu.

# TP N° 05 «COULÉE D'UN ALLIAGE METALLIQUE»

## V.1.Introduction:

Procédé très ancien, la coulée d'un alliage métallique consiste à obtenir une pièce à partir d'un moule métallique, constitué d'éléments assemblés dans lesquels une cavité ayant la forme extérieure de la pièce a été réalisée. Dans cette cavité dénommée empreinte, l'alliage liquide est versé par l'intermédiaire d'un orifice de remplissage. Le remplissage de la coquille se fait sous la seule action du poids de l'alliage soit par coulée directe, de haut en bas, dite en chute ou par gravité, soit, suivant le principe des vases communicants, de bas en haut, dite en source.

Cette technique est utilisée de longue date en fonderie, a pour but de reproduire une pièce dans ses formes intérieures et extérieures, en limitant autant que faire se peut les travaux de finition après refroidissement. Utilisées dans des secteurs variés (aéronautique, automobile, robinetterie, appareils ménagers, ...) les techniques dépendent du matériau, des dimensions et des caractéristiques géométriques de la pièce à obtenir, mais également, des quantités à produire.

La solidification est au cœur même de la métallurgie et du principe de la fonderie et cela pour tous les alliages (fonte, aluminium, cuivreux,..., titane) et pour l'ensemble des procédés industriels (moulage sable, cire perdue, centrifugation...). Cette étape clef du procédé de fonderie n'est cependant pas si triviale qu'elle en a l'air. Bien maîtrisée, elle conduit à des pièces saines avec un dimensionnel respecté et une microstructure conforme.

## V.2.RAPPEL THÉORIQUE

### **V.2.1 Définition**

La coulée du métal liquide dans un moule constitue la phase finale du processus de création de la pièce après la confection du moule et l'élaboration du métal.

Cette rencontre d'un métal à haute température et d'un moule, généralement à température ambiante, nécessite de prendre beaucoup de précautions pour garantir la bonne venue de la pièce et la sécurité du personnel.

L'insertion à la coulée consiste à mettre en place dans le moule un élément métallique de composition particulière, de telle sorte qu'après la coulée et la solidification du métal liquide, cet élément se retrouve dans une zone de fonctionnalité de la pièce et modifie localement ses propriétés. Cette technique est utilisée de longue date en fonderie.

### **V.2.2 – Quelques notions de base**

Le principe de la fonderie est de couler un alliage dans un moule. La température de coulée dépend du type d'alliage utilisé ; à titre d'exemple les alliages de zinc sont chauffés à 400°C, les alliages d'aluminium à 700°C, les alliages cuivreux à 1250°C et les alliages ferreux à 1550°C. Le refroidissement génère la solidification et l'obtention de la pièce brute ou finie.

Dans un procédé de fonderie, trois classes de problèmes se posent :

Fabriquer le moule

- Couler la pièce
- Extraire la pièce.
- Un procédé de fonderie correspond à la résolution des ces trois problèmes.

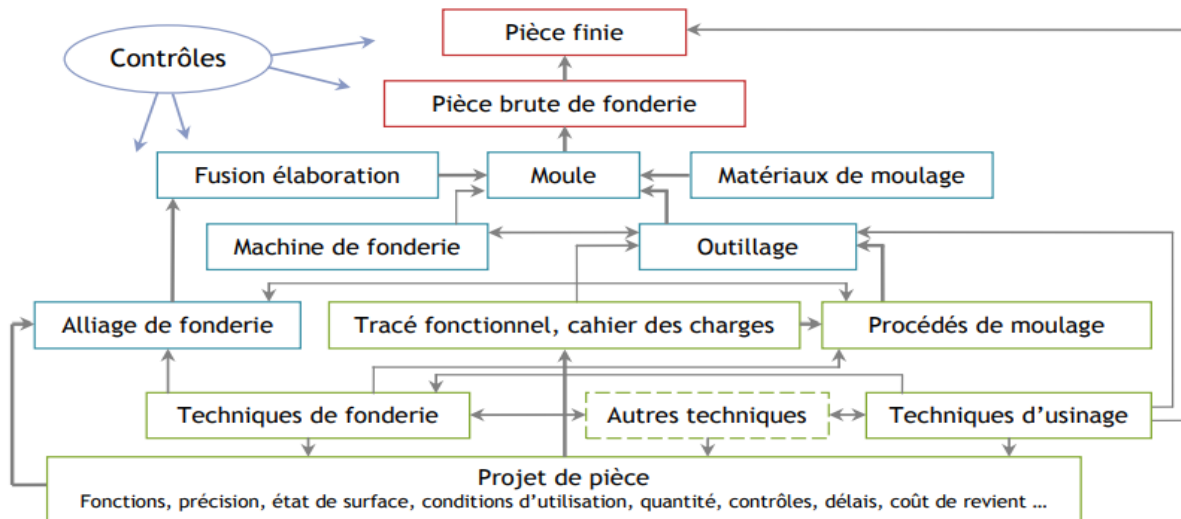


Figure 3 : De la conception à la réalisation d'une pièce de fonderie

### Moulage en sable

Le moulage en sable consiste à réaliser une empreinte dans un matériau plastique - du sable - à partir d'un modèle aux formes de la pièce. Deux châssis métalliques, parfaitement repérés entre eux, servent à maintenir le sable utilisé pour prendre l'empreinte du modèle.

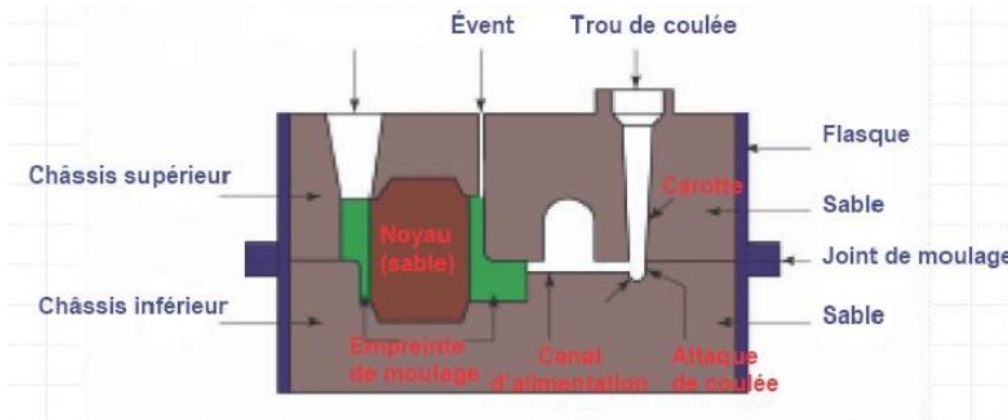


Fig. V.17: De la conception à la réalisation d'une pièce de fonderie

Le fondeur prépare la partie inférieure du moule : le demi modèle est recouvert de sable.

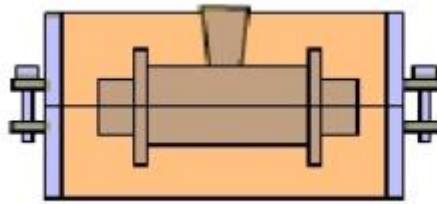


Fig. V.18: De la conception à la réalisation d'une pièce de fonderie

Pour la partie supérieure du moule, le fondeur positionne la deuxième partie du modèle sur la

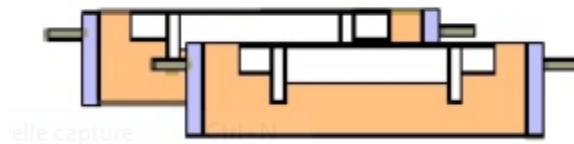


première. Il ajoute le modèle de coulée puis remplit le châssis avec du sable.



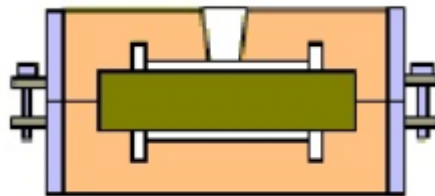
**Fig. V.19:** De la conception à la réalisation d'une pièce de fonderie

Le fondeur retire alors les demis modèles, perce les événements et retouche les empreintes si cela est nécessaire.



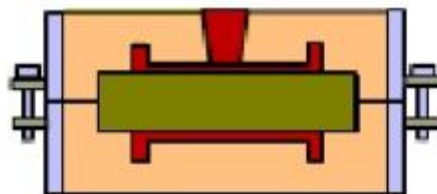
**Fig. V.20:** De la conception à la réalisation d'une pièce de fonderie

Le noyau est placé sur ses portées, puis le moule est refermé.



**Fig. V.21:** De la conception à la réalisation d'une pièce de fonderie

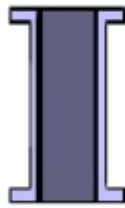
Le fondeur procède alors à la coulée de l'alliage en fusion dans le moule.



**Fig. V.22:** De la conception à la réalisation d'une pièce de fonderie

Une fois la pièce refroidie, le moule est désassemblé. La pièce est séparée par sciage de son dispositif de coulée et des événements, un meulage supprime les bavures. La pièce brute de

fonderie est alors prête pour l'usinage de ses surfaces fonctionnelles



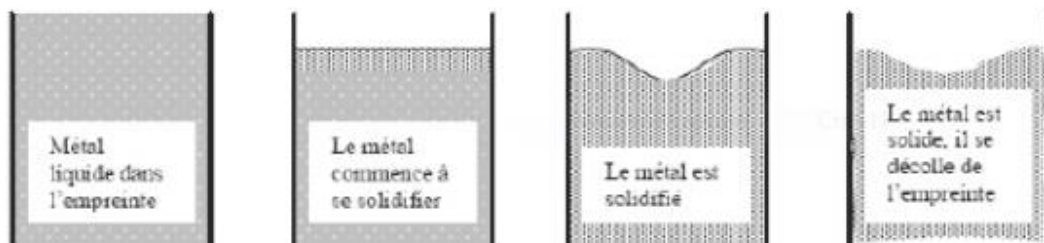
**Fig. V.23:** De la conception à la réalisation d'une pièce de fonderie

## CONCEPTION DES MODELES

Les principaux facteurs influant sur leur conception sont le nombre de pièce à fabriquer, la précision demandée, les dimensions et formes des pièces, la méthode de moulage et de noyautage choisie. Lors de leur réalisation, il convient de tenir compte d'un certain nombre de facteurs :

### Le retrait :

C'est un phénomène physique de contraction du métal (ou alliage) lors de sa solidification (recristallisation). Son existence oblige le modelleur à prévoir sur le modèle des dimensions supérieures à celles de la pièce.



**Fig. V.24:** De la conception à la réalisation d'une pièce de fonderie

### Les surépaisseurs d'usinages :

Réserves de matière nécessaires à l'usinage, elles sont fonction du nombre de passes effectuées et des copeaux minima (ébauche, semi-finition, finition). En général 2mm pour les pièces dont la plus grande dimension est  $\leq 250\text{mm}$  ; 3mm au-delà.

### La dépouille :

Inclinaison des parois verticales du modèle ou boîte à noyaux par rapport au sens de démoulage, elle permet de faciliter l'extraction du modèle en moulage sable ou de la pièce en

moulage coquille. Le sens du démoulage est défini par le plan de joint.

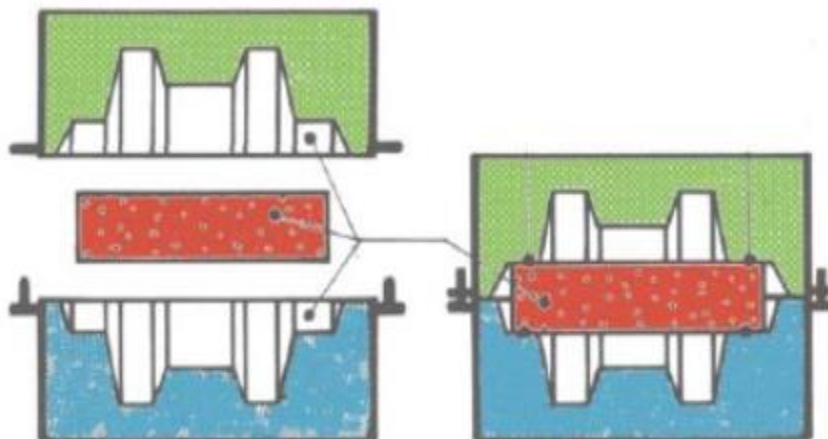
- cas général (dépouille normale) pente de 2%
- évidements et nervures peu hautes 5%
- grandes surfaces 10%

### Les congés :

Arrondis de rayon variable qui permet d'éviter les tensions internes et de faciliter le démoulage.

### Les portées de noyau :

Parties rapportées au positif sur les modèles avec noyau pour maintenir, soutenir et positionner ces derniers.

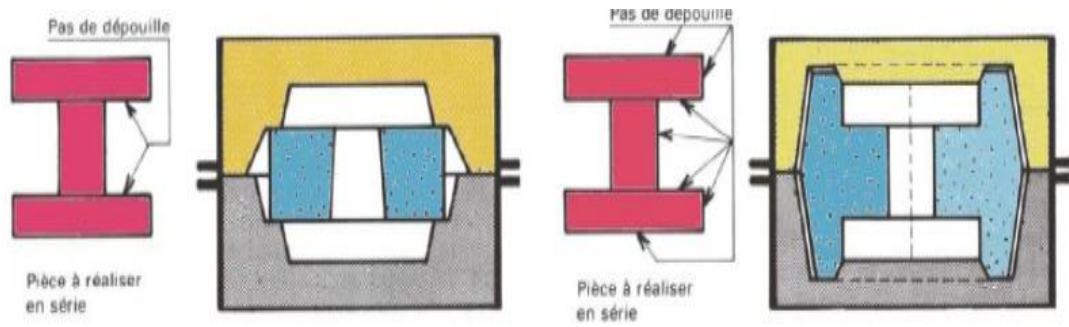


**Fig. V.25:** De la conception à la réalisation d'une pièce de fonderie

### Les noyaux :

Parties de moule exécutées séparément, les noyaux permettent le plus souvent de ménager des évidements dans les pièces (diamètre minimum 15), parfois de faciliter le démoulage. Ils comportent toujours deux zones :

- l'une qui sera en contact avec le métal liquide et donnera la forme à la pièce.
- L'autre, en contact avec le sable du moule, sert à son positionnement (portée).



**Fig. V.26:** De la conception à la réalisation d'une pièce de fonderie

### Exemples de noyaux extérieurs

Matière	Retrait	Epaisseur de paroi mini	IT
Aciers	1,2 à 2,4%	6mm	±0,5 + 0,002*D (D = plus grande dimension de la pièce)
Fontes	1 à 1,5%	5mm	
Alliages d'aluminium	1,2 à 1,6%	4mm	
Alliages de cuivre	1,2 à 1,6%	5mm	

**Tableau II.2 :** Caractéristiques des noyaux extérieurs en fonction de l'épaisseur.

### Les masselottes :

Ce sont des réserves de métal liquide, ménagées dans les moules, destinées à céder du métal à la pièce pendant sa solidification. Elles permettent, en outre, de localiser les défauts internes à l'extérieur des pièces, les impuretés remontant en surface. Ce processus se pratique en moulage sable et en coquille.

### LES SABLES DE FONDERIE :

Les sables utilisés en fonderie doivent répondre à un certain nombre d'impératifs :

- Reproduire fidèlement la pièce modèle.
- Avoir une surface aussi fine que possible.
- Ne pas se désagréger lors de l'extraction du modèle.
- Résister à la température de coulée élevée du métal.
- Résister à l'érosion par le métal liquide, lors de la coulée.
- Etre suffisamment perméable pour permettre le passage des gaz produits pendant la coulée.
- Permettre un décochage aisé.

## Composition des sables de fonderie :

Elle est généralement de :

- 70 à 80% de silice => support
- 5 à 15% d'argile => agglutinant
- 7 à 10% d'eau
- 3 à 5% d'impuretés (oxyde de fer, matières organiques, etc.)

## Mode d'emploi des sables :

Désignation	Procédé	Qualité	Contrainte	Commentaire
Moulage « à vert »	Pas de séchage du sable avant la coulée.	Pièce précises.	Risque de trempe superficielle.	Procédé économique.
Moulage « à vert grillé »	Consiste en un séchage superficiel de l'empreinte	Précision acceptable.	Risque de trempe atténuée.	Dureté du moule augmentée.
Moulage en sable « étuvé »	Le moule est passé au four avant utilisation.	Pièces moins précises.	Pas de risque de trempe superficielle.	Prix de revient élevé. Empreinte très résistante.

**Tableau 4** : Mode d'emploi des sables.

### Sable à noyaux :

Ils doivent résister aux efforts et manutention tout en étant facilement débouffables. Ils doivent avoir une compressibilité suffisante, permettant au retrait du métal de se manifester normalement sans pour cela trop résister sous peine de provoquer des tensions voire des criques dans la pièce. L'agglomération des grains de sable est réalisée par une réaction chimique sable + liant + catalyseur On distingue selon la nature des produits :

#### 1. Les procédés à prise à froid :

- sables auto-durcissant
- sables à prise par gazage

#### 2. Les procédés à prise à chaud :

- durcissement en dehors de l'outillage
- durcissement en contact de l'outillage

## I.8. Manipulation et déroulement du TP :

### V.3 Objectifs

Réaliser une coulée dans un moule en acier avec un refroidissement unidirectionnel.

- Observer les caractéristiques de la structure brute de coulée, telles que la structure de grain,
- la porosité et la fissuration.
- Déterminer la composition d'un alliage Al-Zn à partir de courbes de refroidissement
- Evaluer le gradient thermique lors de la solidification de l'alliage.

### V.4. Préparation au TP

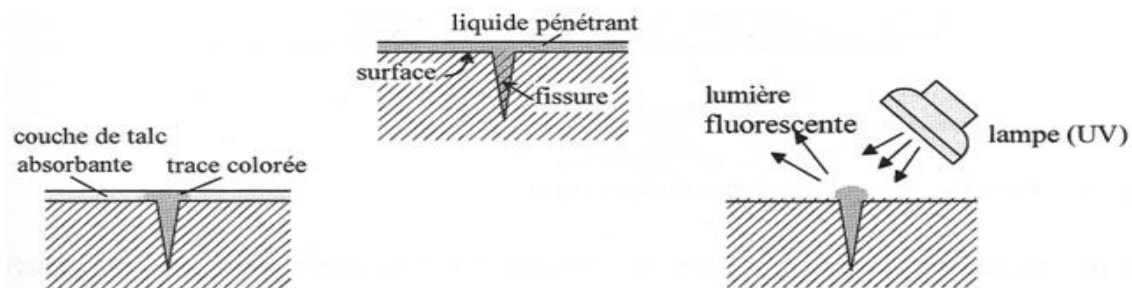
La connaissance des notions exposées dans les passages ci-dessous est nécessaire à la compréhension du TP :

Chap. 8 Introduction à la science des matériaux, 3e ed., J.-P. Mercier, G. Zambelli, W. Kurz, PPUR, 1999 :

Chap. 4 Alliages et diagrammes de phases

Chap. 9 Transformations de phases et microstructures

Introduction à la science des matériaux, M. Rappaz, Polycopié EPFL, 2009 : Chap. sur les diagrammes d'équilibre Casting, John Campbell, à consulter à la bibliothèque du LSMX.



**Fig. V.27:** Principe de l'essai de ressuage

### V.6. Déroulement du TP

Le TP se déroulera comme suit :

- préparation de l'alliage par le responsable du TP

#### Matériau utilisé :

- alliages d'aluminium Al-Zn



**Fig. V.28:** alliages d'aluminium Al-Zn

- Sable argileux



**Fig. V.29:** Sable argileux

**Matériels utiles :**

- Four de Fusion
- louches spéciale



**Fig. V.30:** Four de Fusion

- Moule et contre Moule



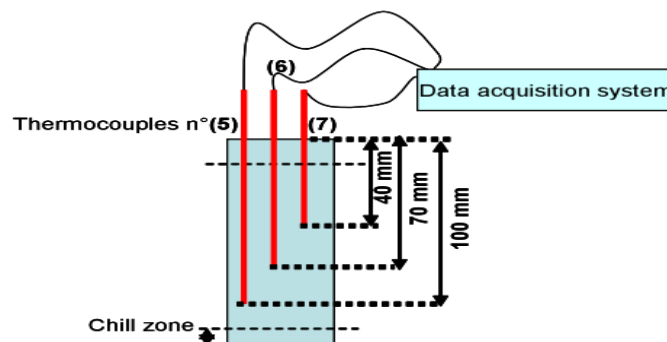
**Fig. V.30:** Moule et contre Moule

- coulée du métal par le responsable du TP

L'idée est de solidifier l'alliage métallique de manière la plus unidirectionnelle possible. L'aluminium est porté à fusion (en quantité nécessaire pour obtenir la composition désirée) dans un creuset. La coulée se fait alors en versant le contenu du creuset dans le moule en évitant toute turbulence qui pourrait entraîner des peaux d'oxydes dans le métal et en essayant au possible de laisser la peau d'oxyde supérieure dans le moule. Pour des raisons évidentes de sécurité, le responsable du TP réalisera lui-même la coulée. En effet, il se peut que de l'aluminium liquide rentre en contact avec de l'eau : il s'en suit une réaction chimique violente qui dégage de l'hydrogène.

- Mesures thermiques

Pendant la coulée, trois thermocouples type K (chromel-alumel) sont insérés dans le métal à différentes distances du fond du moule. La figure 2 présente le dispositif de mesure thermique. Les thermocouples sont distants de 30 mm les uns des autres.



**Fig. V.31:** Dispositif de mesure thermique.



le temps d'acquisition ainsi que les températures obtenues à chaque thermocouple est enregistrés. De ces données les courbes de refroidissement ainsi que les différents gradients thermiques peuvent être déterminés. Afin de simplifier la procédure, les mesures thermiques ne seront pas effectuées mais des courbes obtenues lors d'une précédente coulée seront fournies afin d'être commentée. Celles-ci permettent notamment de déterminer le liquidus de l'alliage et donc sa composition à l'aide du diagramme de phase Al-Zn (cf. figure 3). De plus, l'évolution du gradient thermique peut être déduite des courbes température-temps.

La pièce ainsi coulé est coupé en deux morceaux selon son axe, puis poli à l'aide de papiers à grains de plus en plus fin jusqu'à obtenir une surface d'échantillon dite de qualité « poli miroir ». Ensuite une attaque de type Keller permet de mettre en évidence la structure microscopique de l'échantillon grâce à la révélation des précipités ou des phases eutectiques présentes. La composition du réactif est la suivante : Pour 100ml de solution : 95 ml d'eau 2,5 ml d'acide nitrique HNO<sub>3</sub> à 65% 1,5 ml d'acide chlorhydrique HCl à 32% 1 ml d'acide fluorhydrique HF concentré.

- polissage et attaque chimique en salle MX-C 140
- observation au microscope en salle MX-C 120
- essai de ressuage pour observer la microporosité et les fissures éventuelles.

A l'issue du TP, chaque groupe recevra une feuille Excel avec les courbes temps-température mesurée lors d'une précédente coulée.

### **Indications**

Le rapport sera structuré selon un schéma donné :

- introduction, méthode expérimentale,
- résultats, discussion des résultats et conclusion.