

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

Département de la Formation du Second Cycle

## Polycopié pédagogique

Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Energie et Environnement

Présenté par :

Mme. BOUCHAOUR Mama  
Grade : Maitre de Conférence (A)

Mr. MERAD Laarej  
Grade : Professeur

Titre

# TRAVAUX PRATIQUES CARACTERISATION DES MATERIAUX

Année universitaire : 2021/2022



Nos sincères remerciements aux ingénieurs de laboratoire : Mr. Abdellatif BENAMAR et  
Mr. Mustapha HENAOUI pour leur précieuse aide et chaleureux accueil



## SOMMAIRE

AVANT PROPOS	1
TP-1 : ESSAI DE MICROGRAPHIE (Caractérisation morphologique)	2
TP-2 : ESSAI DE DURETE	11
TP-3 : ESSAI JOMINY	20
TP-4 : ESSAI DE RESILIENCE	26
TP-5 : ESSAI DE TRACTION	33
TP-6 : ESSAI DE FLEXION	44
TP-7 : DIFFRACTION RAYONS X	49
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	56



## AVANT PROPOS

**N**ous avons mûrement réfléchi avant d'élaborer ce modeste travail. Ce projet nous a été très bénéfique sur le plan scolaire que relationnel. Nous avons voulu partager l'expérience en matière de travail pratique dans les locaux de laboratoires de caractérisation des matériaux de l'Université de Tlemcen, Faculté de Technologie.

Ce fascicule concerne les travaux pratiques des Sciences des matériaux. Il est destiné aux élèves de 4<sup>ème</sup> année Ingéniorat Electrotechnique option « Energétique et environnement », et aux étudiants des classes de LMD de Génie mécanique et de Génie civil.

Les propriétés structurales et mécaniques ainsi que la morphologie de surfaces des matériaux cristallins sont recherchées à travers les différentes manipulations effectuées.

Nous avons commencé par la micrographie ensuite, l'essai de résilience puis l'essai de dureté et l'essai de Jominy, l'essai de traction ainsi que l'essai de flexion. Ces manipulations permettent à l'élève (l'étudiant) de comprendre et caractériser un certain matériau.

Dans certains travaux, l'étape de traitement thermique est effectuée. Dans cette partie, l'élève (l'étudiant) aura la possibilité de voir deux types de traitement thermique : la trempe et le revenu ainsi que la trempe superficielle appelée trempabilité.

La structure du matériau est abordée en dernier. Le diffractomètre de rayons X et la vérification de la loi de Bragg par un cristal permet de déterminer la distance inter-réticulaire de ce cristal.

Il faut noter que le contenu de ce support a été préparé selon les moyens trouvés. Les manipulations peuvent évoluer si de nouveaux matériels didactiques s'y ajoutent.

Enfin, nous espérons, au travers de ce travail, apporter une « brique » conceptuelle dans un cadre pédagogique.

Je tiens à remercier les responsables de la Faculté de Technologie de nous avoir autorisés à accéder aux laboratoires « Sciences des Matériaux » et « Laboratoire Résistance des Matériaux » plus particulièrement Mr. Abdellatif BENAMMAR et Mr. Mustapha HENAOUI.

Bonne lecture

**Dr. BOUCHAOUR Mama**

**Pr. MERAD Laarej**





# **I : ESSAI DE MICROGRAPHIE (Caractérisation morphologique)**





**CARACTERISATION DES MATERIAUX**

4<sup>ème</sup> année ELECTROTECHNIQUE Option : Energie et Environnement

2021/2022

**TP 1 : CARACTERISATION MORPHOLOGIQUE  
DES MICROSTRUCTURES D'ACIER**

**I. OBJECTIFS**

- Réaliser des micrographies à l'aide d'un microscope optique sur des échantillons d'acier.
- Identifier les structures et les défauts des échantillons.
- Analyser les microstructures d'acier.

**II. MATERIELS :**

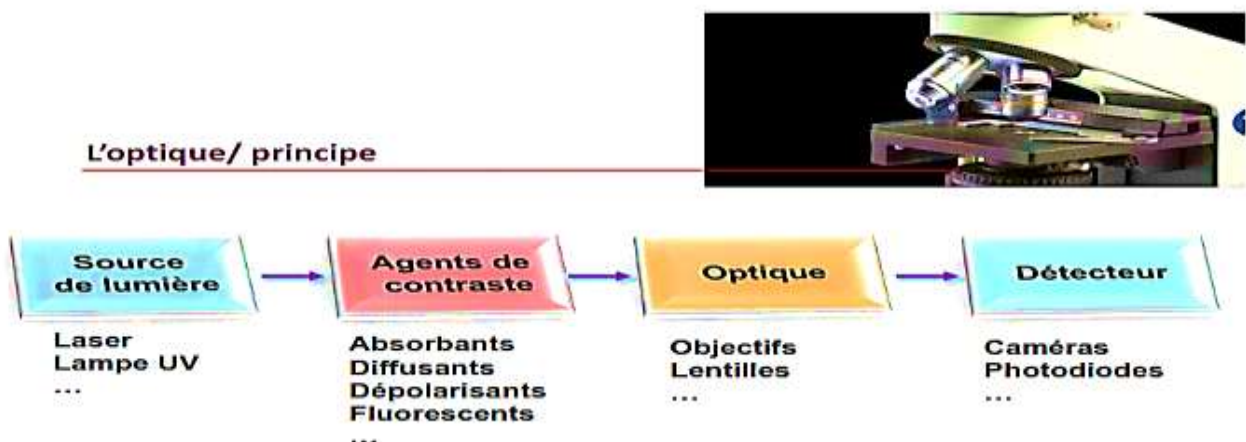
- Eprouvettes en acier,
- Polisseuse à plateaux et papiers abrasifs,
- Microscope optique,

**III. INTRODUCTION**

Les microscopes optiques sont utilisés pour les observations de microstructures des matériaux ayant subi différents traitements thermiques et thermomécaniques, permettant de faire le lien, en amont avec les procédés, et en aval avec les propriétés, en particulier mécaniques. Ces observations sont effectuées sur des échantillons polis miroir et souvent après attaque chimique pour révéler les différentes phases cristallographiques.

Les microscopes permettent d'obtenir des coupes optiques successives dans des échantillons transparents à la lumière. Couplés à un analyseur d'images, ils ouvrent la voie à l'analyse morphologique tridimensionnelle des matériaux à l'échelle du micromètre. Ils donnent également accès à des analyses granulométriques tridimensionnelles de particules, à des études de connexité dans l'espace tridimensionnel, ou bien encore à l'étude de la topographie de surfaces rugueuses réfléchissantes.

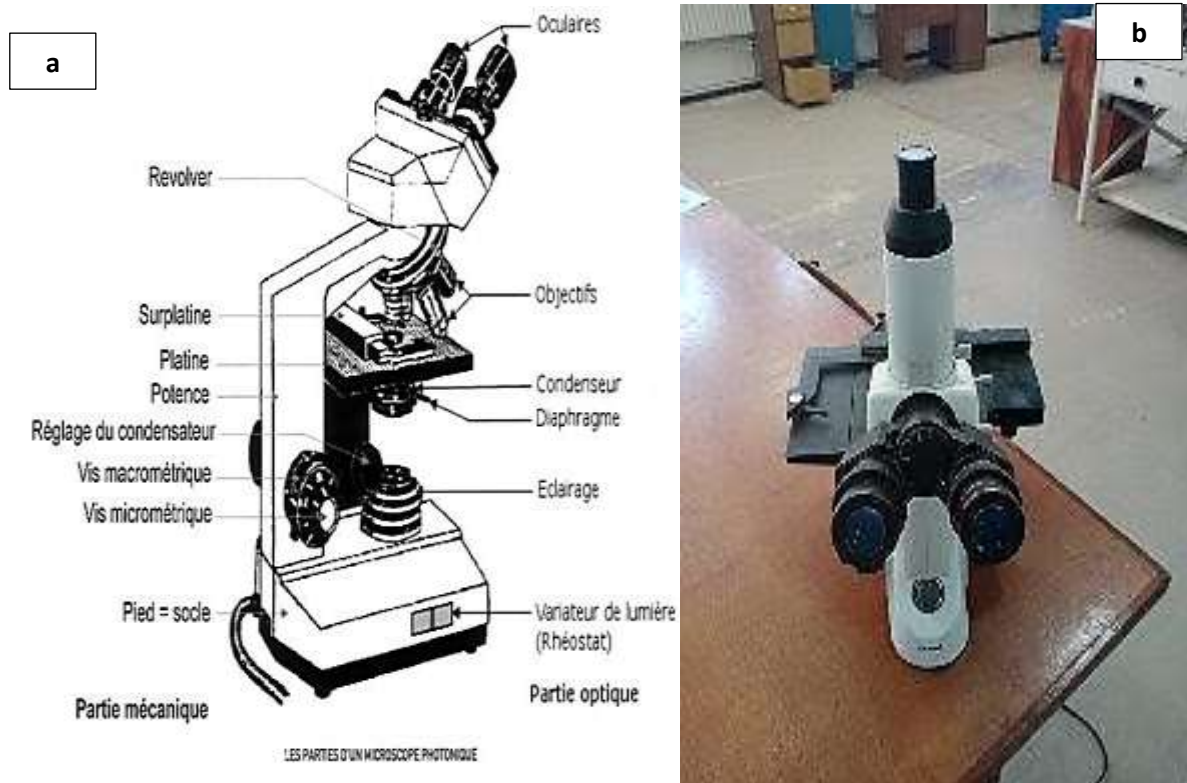
**IV. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU MICROSCOPE OPTIQUE**



Comme l'indique son étymologie (micro- [petit] et -scope [observer]), le microscope est un instrument permettant l'observation visuelle de petits objets ou détails d'objets proches de l'observateur, usuellement indiscernables à l'œil nu même lorsqu'ils sont placés au punctum proximum. Ainsi, à l'instar de la loupe, une des propriétés principales de cet appareil est son grossissement, c'est à dire son aptitude à fournir une image agrandie angulairement de l'objet étudié. Cependant, ce paramètre ne suffit pas à lui seul à caractériser les performances du dispositif. Il faut en effet que cette propriété s'applique à tous les détails de l'objet, y compris les plus fins. La seconde propriété clef du microscope est son pouvoir de résolution ou pouvoir de séparation. Ce dernier point a de très importantes conséquences pratiques puisqu'il implique de travailler avec des optiques de grande ouverture numérique limitées par la diffraction.

#### IV.1. Composants du microscope optique :

Tout microscope optique se compose de deux systèmes principaux : le système mécanique (le statif) et le système optique.





#### IV.1.1. Système mécanique (le statif) :

- ❖ **Tube** : Il supporte à chaque extrémité une partie du système optique.
- ❖ **Revolver ou la tourelle** : Cette pièce circulaire supporte les objectifs et tourne sur elle-même pour placer l'objectif choisi dans l'axe du tube optique.
- ❖ **Potence** : est une pièce en forme de poignée qui supporte les autres parties mécaniques. Elle comprend deux autres mécanismes :
  - a- **Vis macrométrique** : qui permet d'ajuster rapidement la distance entre l'objectif et l'objet à examiner ; elle sert à faire la mise au point grossière.
  - b- **Vis micrométrique** : qui permet d'ajuster lentement la distance entre l'objectif et l'objet à examiner ; elle sert à faire la mise au point finale.
- ❖ **Platine porte-échantillon** : où l'on pose l'échantillon ; les « valets » servent à tenir l'échantillon lorsque celui-ci est mince (par exemple une lame). La platine peut être mobile (gauche-droite et avant-arrière), ce qui permet de balayer l'échantillon et de sélectionner la partie observée.
- ❖ **Pied** : est une pièce lourde qui assure la stabilité de l'appareil et supporte tout l'ensemble.

#### IV.1.2. Système optique :

- **Miroir** : Il sert à réfléchir la lumière ambiante pour éclairer l'échantillon par en dessous, dans le cas d'un échantillon transparent (par exemple une lame mince en biologie ou en géologie, ou un liquide) ;
- **Source de lumière** : elle est souvent incorporée au pied et elle sert à illuminer l'objet.
- **Condensateur** : c'est un système de lentilles qui concentrent la lumière sur l'objet. Il peut être abaissé ou élevé par une vis de contrôle. Sur certains modèles, la lentille frontale du condensateur est escamotable grâce à une manette spéciale.
- **Diaphragme – Iris**: ouverture de diamètre variable permettant de restreindre la quantité de lumière qui éclaire l'échantillon. Comme pour un appareil photo, le diaphragme permet principalement de faire varier la profondeur de champ.
- **Objectifs** : lentille ou ensemble de lentilles réalisant le grossissement. Il y a en général plusieurs objectifs, correspondant à plusieurs grossissements, montés sur un barillet. Certains objectifs sont dits à immersion car leur puissance ne peut être atteinte qu'en éliminant la lame d'air entre l'échantillon couvert par la lamelle et la frontale de l'objectif. On utilise pour cela de l'huile de cèdre ou des huiles de synthèse dont l'indice de réfraction est proche de celui du verre.
- **Oculaire** : lentille ou ensemble de lentilles formant l'image d'une manière reposante pour l'œil ; les rayons arrivent parallèles, comme s'ils venaient de très loin, ce qui permet un relâchement des muscles contrôlant le cristallin ; deux oculaires placés sur une tête dite binoculaire rend plus confortable l'observation (même si elle n'apporte pas de vision stéréoscopique). L'oculaire peut être remplacé par un appareil photographique, ou par une caméra vidéo ou une caméra CCD pour faire une acquisition numérique. Ceci permet de faire l'observation sur un moniteur vidéo (écran de type télévision) et de faciliter l'utilisation et le traitement des images (impression, traitement informatique, télé-médecine, etc).

#### IV.1.2.1. Fonctionnement du microscope optique :

Un tube possède à ses deux extrémités des lentilles. Le premier groupe de lentilles, dirigé vers l'objet à examiner, constitue l'objectif. Ce dernier donne une image réelle, inversée et agrandie de l'objet. Cette image n'est pas formée sur un verre dépoli, mais se trouve quelque part dans le tube optique, l'image intermédiaire (Voir figure 2).

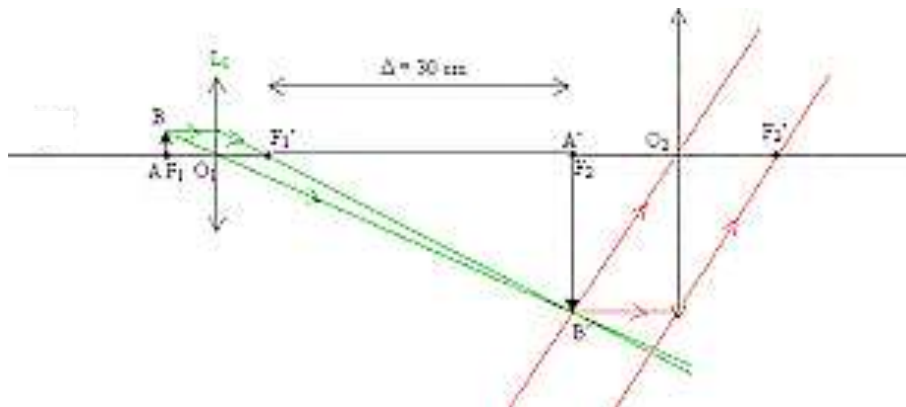
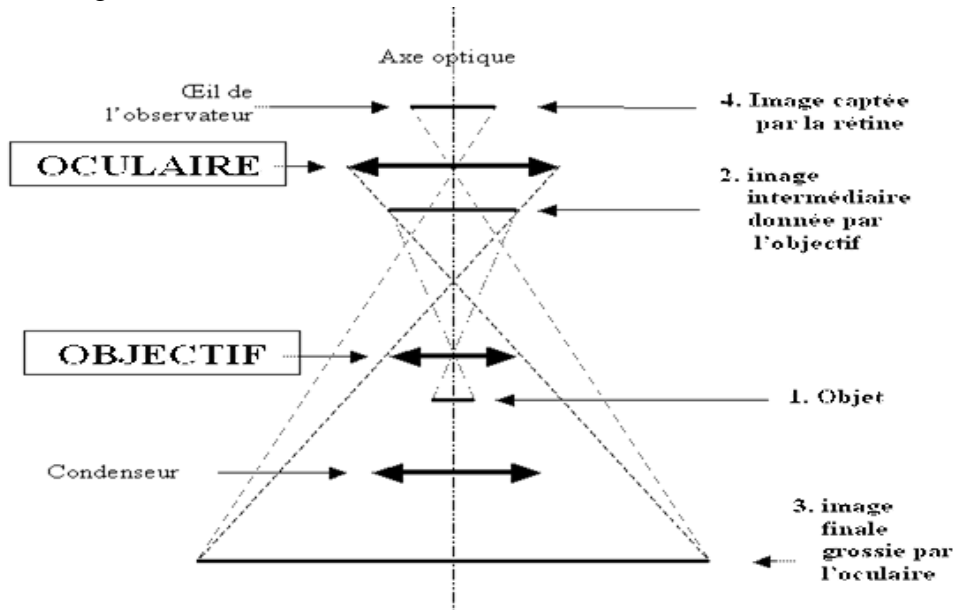


Figure 2 : Principe du microscope

- L'image intermédiaire formée par l'objectif est grossie par l'oculaire.
- L'objectif de distance focale  $f_1$  donne l'objet  $AB$  l'image  $A'B'$ . Cette image est examinée par l'oculaire de distance focale  $f_2$ , qui joue le rôle d'une loupe
- Le deuxième groupe de lentilles, dirigé vers l'œil de l'observateur, est appelé **oculaire** ; il fonctionne comme une simple loupe et grossit l'image précédente. On obtient alors l'image définitive virtuelle, plus ou moins fortement grossie et renversée de l'objet initial. Le grossissement total du microscope est égal au produit du grandissement de l'objectif (un rapport de longueurs) par le grossissement de l'oculaire (un rapport angulaire).

## POLISSAGE DES EPROUVETTES

Le polissage (Voir figure 3) se fait par des disques abrasifs collés aux plateaux qui sont entraînés par des moteurs électriques. Ce polissage se fait par des papiers abrasifs à différentes rugosités dans un ordre croissant jusqu'à obtenir des surfaces polies.



Figure 3 : Polisseuse du laboratoire Sciences des matériaux (Université de Tlemcen - Faculté de Technologie) - Algérie

---

## **COMPTE RENDU : CARACTERISATION MORPHOLOGIQUE DES MICROSTRUCTURES D'ACIER**

### **I. REALISATION DES ESSAIS**

- Préparer la surface des échantillons par un polisseur ;
- Analyser les différents échantillons au microscope avec le grossissement (20).

### **II. METHODE DE REGLAGE :**

- Eclairer convenablement le micromètre objectif à l'aide du miroir orientable.
- Mettre au point sur le réticule en faisant glisser l'oculaire seul.
- La mise au point du microscope doit se faire en remontant le tube à l'aide du bouton molette (sinon risque d'abîmer l'objectif pendant la préparation).
- Eviter les erreurs de temps perdu dans le déplacement du réticule.

### **III. ENREGISTREMENT D'OBSERVATION :**

La captation des images se fait soit par caméra à haute résolution, soit par caméra de téléphone.

### **IV. EXPLOITATION DES RESULTATS**

1. Observer par un microscope optique les différents échantillons (avant et après traitement thermiques), choisir la bonne structure et la sauvegarder.
2. Coller ces structures (Images d'observation de structure).

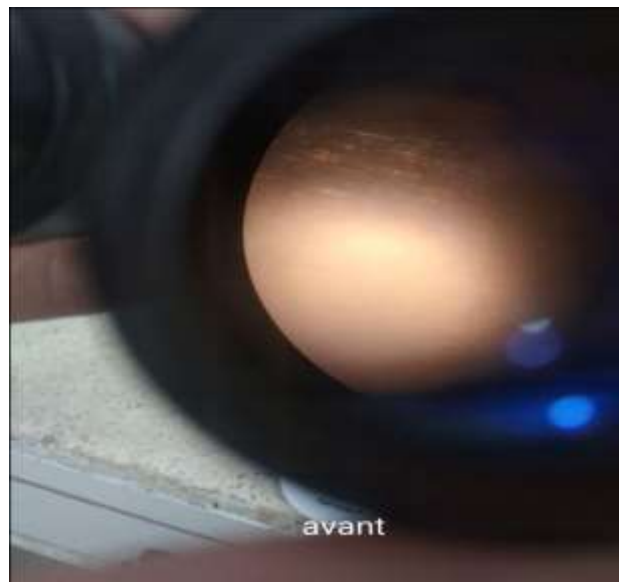


Figure 1 : Prise de vue par microscope optique de l'éprouvette étalon avant recuit  
(Université de Tlemcen)



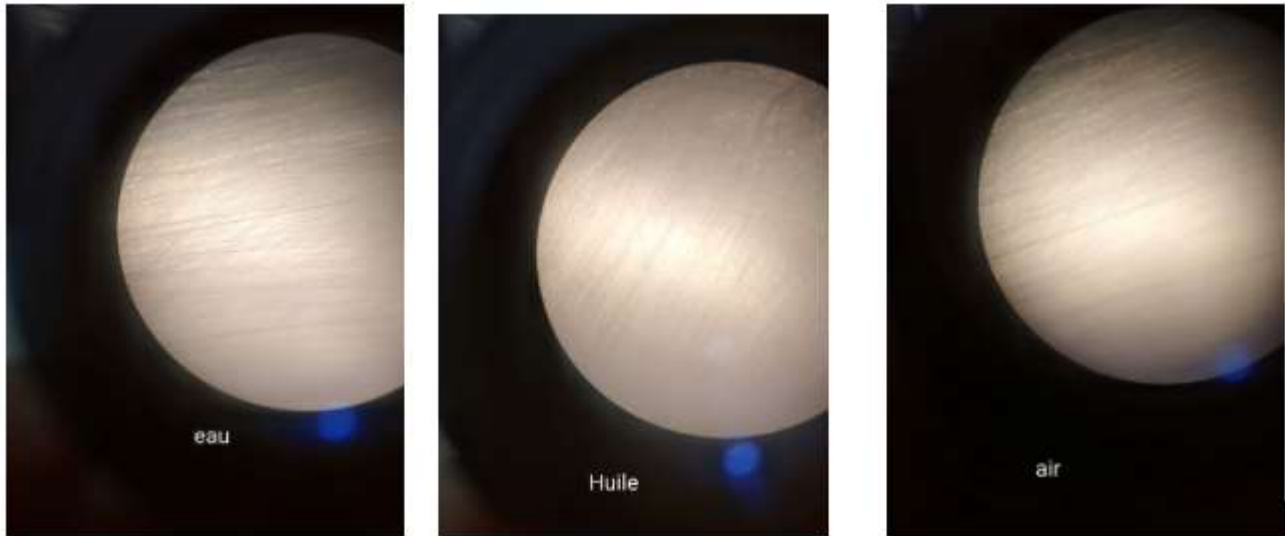


Figure 2 : Vue par microscope des éprouvettes refroidies à l'eau, dans l'huile, à l'air

➤ **Comment explique-t-on les différentes observations ?**

La première étape de la manipulation passe par le recuit d'homogénéisation à haute température à plus de 200°C (destiné à atténuer ou à faire disparaître l'hétérogénéité chimique des échantillons) suivi d'un refroidissement lent.

Il s'agit d'une réinitialisation pour l'acier afin d'avoir une distribution uniforme des grains et d'augmenter sa résistance. Une fois a atteint sa température de transition, nous le laissons tremper pour donner à sa structure cristalline le temps de se stabiliser.

L'étape suivante de l'homogénéisation consiste à laisser l'acier refroidir lentement à l'air. Ce qui se passe maintenant dépend de la teneur en carbone ; si nous prenons un acier au carbone à 0,8% et le refroidissons à travers la température de transition, l'austénite et le carbone interstitiel se transformeront lentement en un mélange de ferrite et de cémentite, qui prend la structure laminaire appelée perlite. La perlite ne se forme qu'avec une solution de 0,8% de carbone.

D'autre part, si nous prenons un acier 0,55% de carbone, comme celui que nous avons utilisé et le refroidissons lentement jusqu'à sa première température de transition alors, la ferrite commence à se former, la ferrite est du fer pur, donc au fur et à mesure qu'elle se forme, le pourcentage de carbone commence à augmenter, cela continuera jusqu'à ce que l'austénite restante ait un pourcentage de carbone de 0,8% et se la perlite se formera. Cela forme une structure cristalline dominée par la ferrite, se présentant ici comme une couleur plus claire entourée d'une perlite plus foncée. Il a un petit effet sur la rigidité des aciers.



Si nous refroidissons rapidement dans de l'huile, les atomes de carbone qui se sont répandus dans la structure chaude de l'austénite ne peuvent pas se diffuser hors du réseau cristallin, pour former la cémentite, et se bloquent à la place dans la solution, créant une nouvelle structure cristalline appelée martensite.

Cette structure cristalline a une énorme quantité d'étirement interne. En partie parce que le carbone piégé dans la structure cristalline provoque la déformation du réseau cristallin, mais aussi parce que pendant le refroidissement rapide, la surface s'est refroidie beaucoup plus rapidement que le matériau interne. Ce qui provoque une tension interne dans le matériau rend plus difficile l'apparition de déformations supplémentaires. Cependant cela ne rend pas le matériau plus solide ; cela signifie simplement qu'il ne s'étirera pas et ne se pliera pas avant de se casser, et quand il finit par se fracturer, toute sa tension interne est soudainement relâchée dans une expansion explosive.

## V. CONCLUSION GENERALE

L'intérêt de cette manipulation réside dans la caractérisation de la morphologie de la surface des éprouvettes en acier. Des prises de vue par capteur caméra de téléphone mobile ont été effectuées avant et après recuit. Les différentes micrographies présentent des différences de surface. Le refroidissement dans les trois milieux a un impact sur la structure des éprouvettes. L'étape du microscope est importante pour la suite des travaux pratiques. Afin de vérifier la limite d'élasticité des matériaux (capacité d'absorber l'énergie sans se déformer de façon permanente), nous étudions la dureté des matériaux et la trempabilité (Essai Jominy). Ce sont nos prochaines étapes.

# II: ESSAI DE DURETE







## CARACTERISATION DES MATERIAUX

4<sup>ème</sup> année ELECTROTECHNIQUE Option : Energie et Environnement

2021/2022

### TP 2 : ESSAI DE DURETE

#### I. BUT

- ✓ 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.

#### II. OBJECTIFS

- Comprendre les évolutions des microstructures,
- Expliquer les propriétés mécaniques obtenues,
- Comparer la dureté de matériaux métalliques (éprouvettes en Acier) à différents modes de refroidissement (eau, huile et air).

#### III. MATERIELS :

- Echantillons,
- Four « Protherm »
- Duromètre,
- Polisseuse à plateaux « MECAPOL P230 », papiers abrasifs à différentes rugosités.



Figure1 : Equipements utilisés

#### IV. INTRODUCTION

Les essais mécaniques sont utilisés pour caractériser le comportement d'un matériau. Les plus fréquents sont l'essai de dureté lequel est destiné le plus souvent, à estimer rapidement et simplement la limite d'élasticité du matériau.

#### V. THEORIE

##### V.1. Essai de dureté

L'essai de dureté est largement utilisé sur les métaux. Il caractérise la résistance qu'oppose le matériau à la pénétration d'un autre corps plus dur que lui. Cet essai mesure la pression moyenne de contact des matériaux, lors de l'enfoncement d'un indenteur (conique, pyramidal ou sphérique) sur une surface plane. La dureté est évaluée après retrait de l'indenteur, à partir de la mesure de la dimension de l'empreinte de l'indenteur, ou pendant l'essai à partir de la courbe d'indentation qui lie la profondeur d'indentation à la charge appliquée. C'est bien une manière de caractériser le comportement plastique d'un matériau.



La dureté, lorsqu'elle est mesurée sur un matériau ductile dans les conditions définies par les normes, peut être considérée comme un paramètre intrinsèque du matériau. Cependant, bien que le résultat obtenu soit une pression, on l'exprime sans dimension puisque la pression mesurée dépend de la géométrie de l'indenteur. Ainsi, une valeur de dureté est un **nombre** (la pression moyenne de contact). Des tests de dureté sont également utilisés pour étudier les effets de traitement thermique, l'érouissage, la trempe et du formage à froid (exprimée en  $\text{Kgf/mm}^2$ ) suivi d'un sigle **H** (pour dureté – Hardness en anglais) et d'un indice qui indique le type de pénétrateur utilisé (**V** pour Vickers ou **B** pour Brinell, par exemple).

Ainsi, pour des conditions expérimentales données, la dureté du métal sera d'autant plus grande que la pénétration du corps sera faible.

Il existe trois principaux types d'essais de dureté, qui diffèrent essentiellement par la forme du pénétrateur : l'essai Brinell, l'essai Vickers et l'essai Rockwell (utilisé dans ce TP).

### HRC (ou HRB) = Indices de dureté Rockwell



L'essai consiste à appliquer une force de 100 N (par exemple) sur un cône en diamant à  $120^\circ$ . Le cône s'enfonce d'une profondeur  $e$  (mm). On applique une force de  $100 \text{ N} + F$ , avec  $F = 1400 \text{ N}$ . La dureté est prélevée sur le cadran.

**V.2. Types d'essai :** Les procédés de mesure de la dureté consistent à faire une empreinte sur une éprouvette au moyen d'un pénétrateur sous une force  $F$  pendant un temps déterminé.

Les formes et dimensions des pénétrateurs, les charges et les durées d'application sont standardisées. Les essais de dureté usuels sont résumés dans le tableau ci-après :



Type d'essai	Brinell	Vickers	Rockwell
<b>Symbole</b>	<b>HB</b> (Hardness Brinell)	<b>HV</b> (Hardness Vickers)	<b>HR</b> (Hardness Rockwell)
<b>Pénétrateur</b>	Bille de diamètre D en acier trempé Dureté 6 HB	Pyramide régulière à base carrée. Angle entre 2 faces opposées : 136°	HRC : cône en diamant. Angle au sommet = 120° HRB : bile d'acier
<b>Mode d'application de la charge</b>	Chargement progressif pendant 15s, maintien 15s puis décharge	Comme HB	Précharge F <sub>0</sub> puis charge supplémentaire, et retour à F <sub>0</sub>
<b>Valeur mesurée</b>	Moyenne de 2 diamètres perpendiculaires d1 et d2 de l'empreinte	Moyenne des 2 diagonales d1 et d2	Profondeur de pénétration
<b>Adaptation</b>	Choix de la charge F telle que 0.3<d<0.6d	Choix de la charge F telle que d>0.4mm	
<b>Mesure pour H (Voir formules)</b>	P/surface de la calotte sphérique	P/surface de l'empreinte pyramidale	Complément de la profondeur de pénétration
<b>Application principale</b>	Aciers non trempés. Fontes, soudures, métaux non-ferreux	Aciers trempés. Aciers à outils	Aciers trempés
<b>Avantages</b>	Etant relativement margo HB convient pour les matériaux hétérogènes	Pratiquement indépendant de la charge. Il convient bien pour les pièces minces	Mesure plus simple. La lecture directe permet une acquisition des données
<b>Inconvénients</b>	HB est fonction de la charge. Formation de bourrelets au bord de l'empreinte	Ne convient pas pour les matériaux hétérogènes (petites empreintes)	Dispersion importante des mesures

**Tableau 1 : Types d'essai**

Selon la norme (ISO 6506), le temps de maintien de la charge d'essai est en règle générale de 10 à 15 secondes (s).

### V.3. Intérêt de l'essai de dureté :

L'intérêt principal de cet essai est qu'on peut le réaliser sur des échantillons de dimensions très réduites, sans préparation particulière excepté un polissage de surface. Ceci permet de tester la réussite d'un traitement de surface qui porte sur quelques centaines de micromètres de profondeur, ou la qualité d'un revêtement de surface, ou encore la taille de la zone affectée par le soudage de deux tôles. On l'utilise préférentiellement lorsque le prélèvement d'éprouvettes de traction conventionnelle est difficile.

Des essais de microdureté et nanodureté ont ainsi été développés afin de tester des zones de plus en plus réduites, jusqu'à des surfaces de quelques micromètres carrés. D'autre part, l'essai de dureté présente l'intérêt d'être plus ou moins non destructif, facile à mettre en œuvre et peu coûteux par comparaison avec des essais de traction. C'est donc une méthode de contrôle couramment utilisée pour établir des cartographies de dureté sur des sections de pièces massives, après mise en forme et traitements thermiques

Le refroidissement sur une génératrice s'effectue donc suivant une vitesse décroissante depuis la face trempée jusqu'à la face opposée. Les conditions opératoires de cet essai sont normalisées.

#### V.4. Présentation du duromètre :

Placer les éprouvettes dans son endroit sur le dispositif de l'essai de dureté

On dispose au laboratoire des Sciences de Matériaux d'un duromètre Simple constitué de (Voir Figure2) :

- Une unité de réglage de la charge appliquée sur l'échantillon.
- Un support d'échantillon ou enclume.
- Un volant permettant la montée ou la descente de cette enclume.
- Un système de maintien du pénétrateur.
- Un levier permettant d'appliquer la charge choisie.
- Un cadran pour la lecture de la valeur de la dureté.

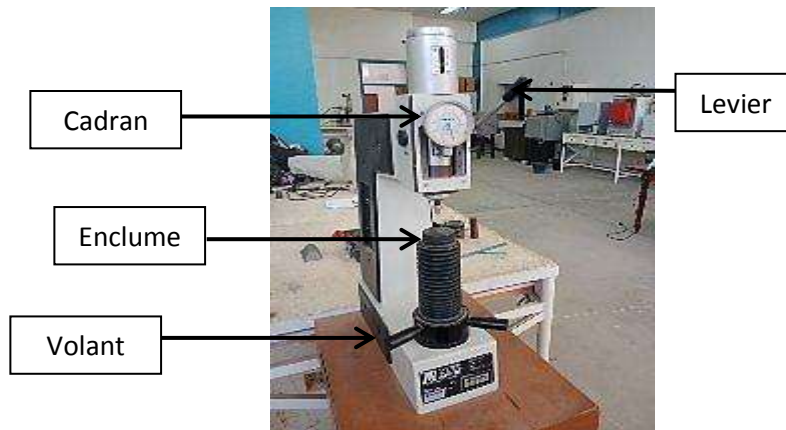


Figure 2 : Duromètre du laboratoire Sciences des matériaux  
(Université de Tlemcen - Faculté de Technologie)

#### Rappel

- **Fragilité d'un matériau**

Un matériau solide est fragile s'il se fracture dès que sa limite d'élasticité est atteinte. La fragilité s'oppose à la ductilité. Il ne faut confondre fragile avec peu tenace qui signifie que le matériau résiste peu à la propagation de fissures.

- **Ductilité d'un matériau**

Propriété d'un matériau de se laisser déformer facilement ; en particulier, propriété d'un métal de se laisser étirer facilement.

- **Dureté d'un matériau**

La dureté d'un matériau est définie comme la résistance mécanique qu'un matériau oppose à la pénétration.





## CORRIGE TP : ESSAI DE DURETE

### I. REALISATION DES ESSAIS

1. Chauffer les éprouvettes à la température 850°C pendant 10min.
2. Faire la trempe des éprouvettes respectivement dans l'eau, l'huile et l'air.
3. Placer l'éprouvette sur le centre du porte-échantillon du duromètre.
4. Mettre le cadran à 0 après avoir effectué la pré-charge (Aiguille fine à la position 3).
5. Revenir au point stable quand la manivelle est du côté droit.
6. Prélever la valeur de la dureté.

### II. EXPLOITATION DES RESULTATS

(NB : Des images peuvent être prises durant les TP et utilisées dans la rédaction du rapport).

L'essai consiste à faire subir un cycle thermique bien déterminé à la pièce en question. Une mesure de la dureté de pièce avant et après traitement nous permet d'avoir une idée sur l'influence de la trempe sur la dureté et donc sur certaines propriétés mécaniques.

- Reporter les différentes valeurs de dureté dans un tableau.

Eprouvette	Eprouvette témoin	Refroidissement rapide (Eau)	Refroidissement moyen (Huile)	Refroidissement lent (Air)
Test 1	19	50	40	8
Test 2	18,5	55	42	7

- Classer et comparer l'ensemble des éprouvettes testées par ductilité croissante selon les propriétés suivantes : ductilité, fragilité et dureté, en déduire les plus fragiles et les plus ductiles rencontrés (Temps de refroidissement - Trempe).

Refroidissement rapide (Eau)	Refroidissement moyen (Huile)	Eprouvette témoin	Refroidissement lent (Air)
50	40	19	8

**Ductilité :** Eprouvette trempée dans l'eau < Eprouvette trempée dans l'huile < Eprouvette trempée témoin < Eprouvette refroidie à l'air ambiant.

**Fragilité :** Eprouvette trempée dans l'eau < Eprouvette trempée dans l'huile < Eprouvette trempée témoin < Eprouvette refroidie à l'air ambiant.

**Dureté :** Eprouvette trempée dans l'eau < Eprouvette trempée dans l'huile < Eprouvette trempée témoin < Eprouvette refroidie à l'air ambiant.

- Citer d'autres essais de dureté. (Vickers, Rockwell et Brinell).

### Maintien en température

Lorsqu'un métal est porté à une température supérieure au point AC3 (Voir Figure 3) : Température supérieure à 900°C, fin de la transformation du fer  $\alpha$  (Réseau cubique centré) en fer  $\gamma$  (Cubique à faces centrés), il se produit des transformations internes comportant notamment, pour les aciers, la dissociation du carbure de fer. Ces réactions ne sont pas instantanées et elles doivent intéresser toute la masse si l'on veut obtenir une trempe à cœur.



Il est donc nécessaire :

- Que toutes les parties des pièces soient réellement portées à une température supérieure à  $A_{C3}$  ;
- Que la transformation, qui commence par les parties extérieures de la pièce, gagne toute la masse métallique.

Etude de refroidissement :

- Lorsqu'on refroidit très lentement le métal chauffé, les transformations inverses se produisent et l'on retrouve les constituants d'équilibres ferrito-perlitique de l'acier recuit. Par contre, si le refroidissement est rapide, une nouvelle phase sursaturée en carbone apparaît, que l'on appelle la martensite.

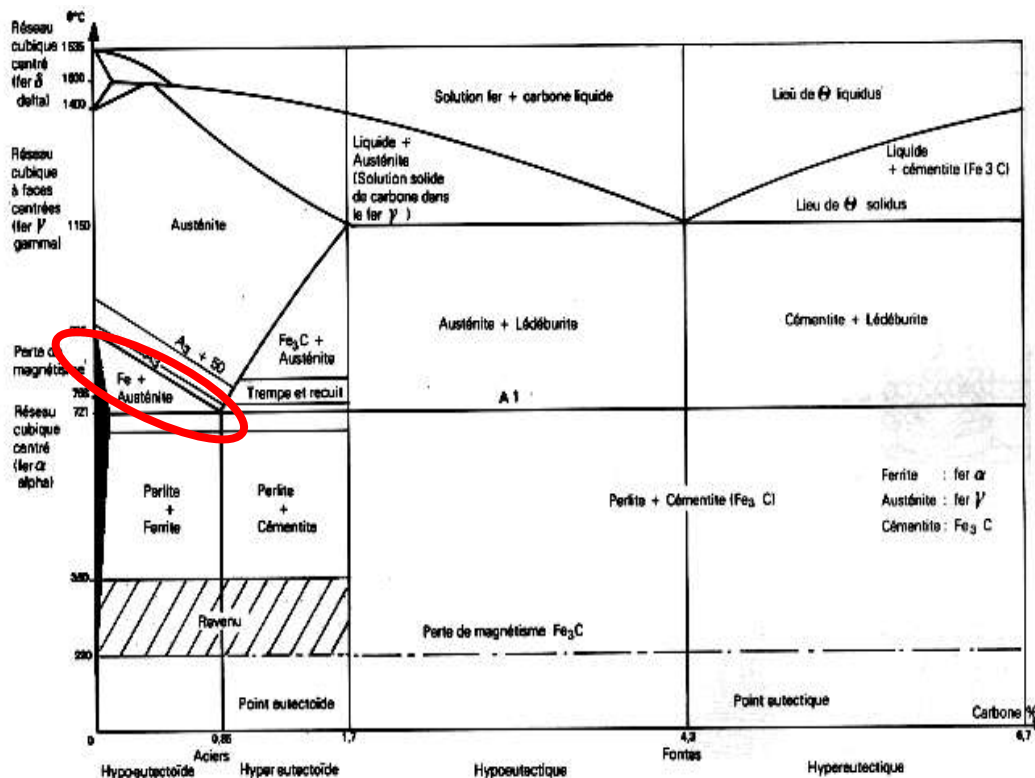


Figure 3 : Diagramme d'équilibre des alliages Fer-carbone

### III. COMMENTAIRES – INTERPRETATION

#### ▪ Trempe à l'eau :

La courbe de refroidissement se situe vraiment à gauche de TRC (Transformations en Refroidissement Continu-Figure 4), ainsi on aboutit directement à la formation de martensite. La transformation de l'austénite en martensite débute à  $390^{\circ}\text{C}$  et 100% de l'austénite est transformé martensite. La courbe de refroidissement passe devant le nez de bainite, on a une bonne trempe avec la formation de beaucoup de martensite.

Au final, l'acier possède : 100% de martensite

Dureté estimée : 40Hrc

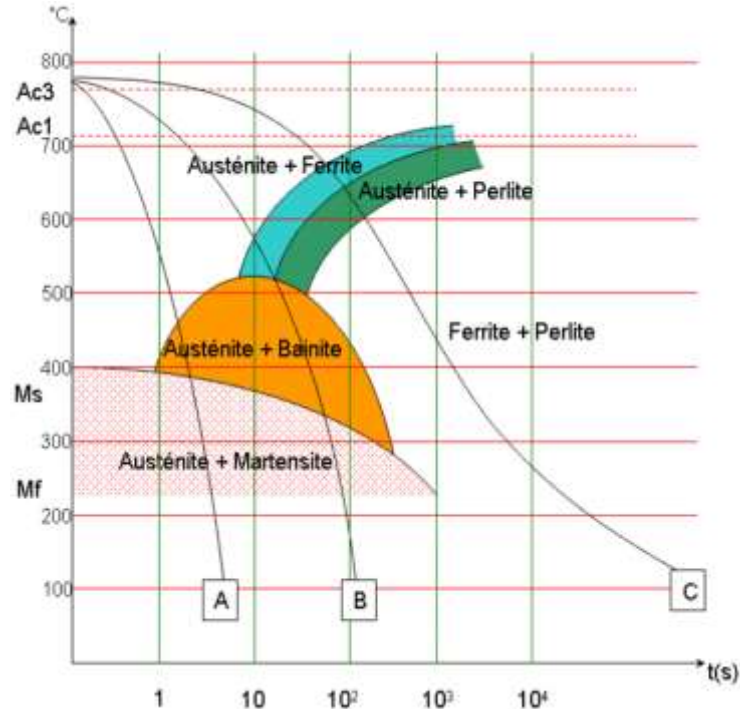


Figure 4 : Diagramme de transformations en refroidissement continu, ou diagramme TRC

▪ **Trempe à l'huile :**

La transformation ferritique de l'austénite débute à 640°C. A 540°C, cette transformation se termine, avec environ 5% de l'austénite initiale transformée. Ensuite débute la transformation en bainitique (A+F+C). Puis à 390°C, la transformation se termine avec 95% de bainite inférieur car la transformation a eu lieu à une température inférieure à 550°C.  
Au final, l'acier possède : 5% de ferrite et 95% de bainite.  
Dureté estimée : 30Hrc.

▪ **Trempe à l'air :**

La transformation ferritique de l'austénite débute à 690°C. A 580°C, cette transformation se termine, avec environ 50% d'austénite initiale transformée en ferrite. Ensuite la transformation débute en perlite (A+F+C). Puis à 390°C, la transformation se termine avec 45% de cémentite formée. Il se forme en fin de refroidissement un peu de martensite à 5%.  
Au final, l'acier possède : 50% de ferrite, 45% de perlite et 5% de martensite.  
On constate que la composition la plus dure est celle qui contient la martensite. Puis s'en suivent la structure bainitique et enfin la structure perlitique.



#### IV. CONCLUSION GENERALE

Notre étude sur le traitement thermique a porté sur l'étude de la dureté dans trois milieux de trempé différent (huile, eau, air).

Pour avoir un acier dur, il suffit d'effectuer une trempé à l'eau. Mais cette dureté entraîne une grande fragilité du métal car le matériau contient beaucoup de contraintes internes. Ce matériau est certes très dur mais peu résistant aux chocs pour pouvoir exploiter cette nuance. Il faut diminuer ces contraintes internes en effectuant des revenus. Un c'est un traitement thermique à basse température (150 à 650°C) destiné à éliminer les contraintes et la fragilisation provoquées par la trempé et obtenir les propriétés mécaniques requises.

Le traitement thermique est un outil essentiel permettant de produire des aciers avec des propriétés désirées. En effet, la connaissance des différents aspects du traitement permet de choisir un acier pour une utilisation donnée.

Cet essai nous a permis de classer les éprouvettes en fonction du type de refroidissement (rapide, moyen et lent). D'autres manipulation son à venir.

# III : ESSAI JOMINY







## CARACTERISATION DES MATERIAUX

4<sup>ème</sup> année ELECTROTECHNIQUE Option : Energie et Environnement 2021/2022

### TP 3 : ESSAI DE JOMINY - ESSAI DE TREMPABILITE

#### I. BUT

Maîtriser une méthode pratique de détermination de la trempabilité de l'acier à travers l'essai Jominy.

#### II. MATERIELS :

- Four « Protherm »,
- Epreuve appelée épreuve Jominy,
- Appareil Jominy,
- Polisseuse à plateaux « MECAPOL P230 », et papiers abrasifs à différentes rugosités,
- Duromètre.

#### III. INTRODUCTION

L'essai Jominy est un essai permettant de déterminer la trempabilité de l'acier. Dans cet essai, une éprouvette cylindrique de 25 mm de diamètre et de 100 mm de longueur (Voir Figure 1) est chauffée à la température d'austénitisation (Température de tremp) puis refroidie sur la face terminale par un jet d'eau.

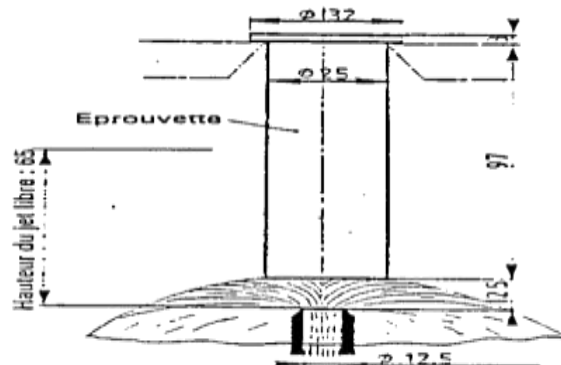


Figure 1 : Epreuve Jominy

Le refroidissement s'effectue sur une génératrice suivant une vitesse décroissante depuis la face trempée jusqu'à la face opposée. Les conditions opératoires de cet essai sont normalisées.

Cet essai a un grand intérêt pratique car il permet une appréciation rapide et économique de la trempabilité ; en particulier pour contrôler la régularité de trempabilité de coulée pour une nuance déterminée.

Les courbes Jominy permettent aussi de prévoir la dureté dans la masse des pièces.

Pour cela il faut disposer des courbes de correspondance indiquant pour la pièce éprouvette Jominy les endroits où les vitesses de refroidissement sont identiques. Si les vitesses de refroidissement sont identiques, les structures obtenues le sont ainsi que les propriétés mécaniques, dont la dureté.

#### IV. Description et Consignes pour l'utilisation de l'appareillage pour essai de trempabilité JOMINY

L'appareillage contient :

- Four de chauffage des éprouvettes Jominy ( $T_{max}=850^{\circ}C$  pendant 10mn) équipé d'un régulateur de température (Figure 2).

Le four permet de chauffer l'extrémité d'une éprouvette. La température dans ce four est gérée par un thermocouple et s'affiche sur l'écran du contrôleur digital de température. Grâce à un bouchon isolant, les pertes de chaleur sont réduites après introduction de l'éprouvette.



Figure 2 : Four du laboratoire Science des matériaux  
(Université de Tlemcen - Faculté de Technologie)

- Fontaine qui comporte une buse qui éjecte de l'eau vers l'extrémité de l'éprouvette. Le niveau d'eau permet de tremper uniquement l'extrémité de l'éprouvette. L'eau éjectée est ensuite évacuée via un conduit vers la sortie d'évacuation.
- Réservoir à eau équipé lui aussi d'un régulateur de température et d'une pompe :  
Il stocke l'eau extérieure et envoie cette eau grâce à une pompe vers la buse. Il est équipé d'un tremplin relié à la sortie d'évacuation.
- Eprouvette est placée dans son endroit sur le dispositif de l'essai Jominy (Figure 3).
- Robinet ouvert permet de refroidir l'éprouvette produisant ainsi un jet vertical d'eau sur la face inférieure de l'éprouvette de telle sorte qu'on obtienne la forme d'un parapluie d'eau.





Figure 3 : Banc d'essai Jominy du laboratoire Science des matériaux  
(Université de Tlemcen - Faculté de Technologie)

- Une fois l'éprouvette est refroidie, retirer la du support puis passer au polissage ensuite aux essais de dureté.

## COMPTE-RENDU : TP : ESSAI DE JOMINY - ESSAI DE TREMPABILITE

### REALISATION DES ESSAIS

Après refroidissement de l'éprouvette, on peut procéder à la mesure de la dureté de l'éprouvette d'acier en plusieurs positions sur la surface de la pièce pour détecter la profondeur de la trempé dans la pièce. Pour ce faire, on peut utiliser un duromètre Vickers avec les valeurs de duretés prises sur les distances : 1, 3, 5, 7, 9, 10, 13, 15, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50 et 70 mm de l'éprouvette.

L'essai se déroule en trois étapes :

1. Chauffage de l'échantillon à une température définie dans le domaine austénitique pour une période définie ;
  2. Trempe de l'échantillon par un jet d'eau selon des conditions spécifiées ;
  3. Contrôle de la dureté à des points définis dans le sens longitudinal de la surface de contrôle poncée de l'échantillon.
- Tracer au crayon les distances (en mm) 1, 3, 5, 7, 9, 10, 13, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 70...prises à partir de l'extrémité de l'éprouvette trempée par le jet. Ces distances seront désignées J1, J3, J5, J7.
  - Mesurer la variation de la dureté sur le méplat poli de la génératrice de l'éprouvette à partir de son extrémité trempée.



Figure 4 : Essai de dureté sur l'éprouvette JOMINY

Remplir le tableau 1 :

d(mm)	1	3	5	7	9	10	13	15	20	25	30	35	40	50	70
H	60	55	53	50	45	40	38	33	29	25	23	19	17	16	13

Tableau 1

- Tracer la courbe de la dureté H en fonction de la distance d (mm) entre la base refroidie et le point de relèvement de la mesure de dureté. Cette courbe, dite courbe Jominy, permet de déterminer la trempabilité de l'acier.

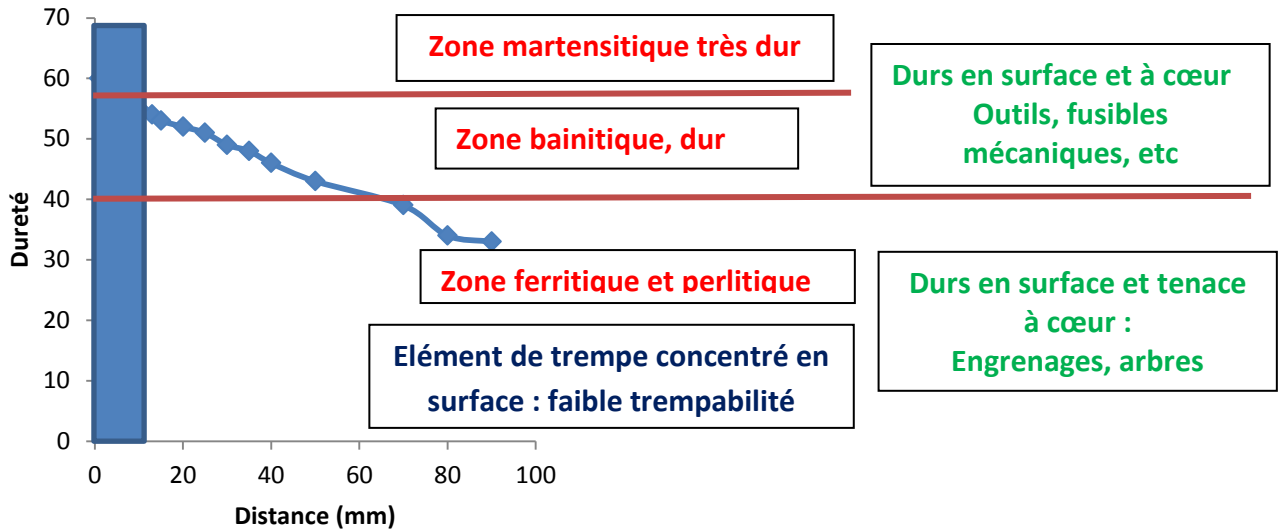


Figure 5 : Courbe de Jominy

Un certain nombre de paramètres définis par la norme permet de quantifier la trempabilité à partir d'une courbe Jominy : la pente au point d'inflexion est l'une d'eux.

La trempabilité est l'aptitude à se transformer par refroidissement rapide en composant formé à basse température dit martensite et d'éviter la formation de ferrite, perlite et bainite.

### COMMENTAIRES ET INTERPRETATION

Le chauffage doit permettre de chauffer la pièce jusqu'au cœur à la température d'austénitisation. Or, la chaleur étant apportée par transmission à travers sa surface, la température de ce dernier est toujours supérieure à celle du cœur. L'opération s'achève quand, justement, la différence entre ces deux températures devient nulle ou tout au moins inférieure à la tolérance admise.

### CONCLUSION GENERALE

Le but de notre travail est d'utiliser dispositif dont le principe consiste à réaliser la trempe, d'un acier chauffé à la température d'austénitisation, par un jet d'eau. Il s'agit de l'essai de Jominy. Puis mesurer la pénétration de la trempe dans l'acier par un essai de dureté.



# IV : ESSAI DE RESILIENCE







## CARACTERISATION DES MATERIAUX

4<sup>ème</sup> année ELECTROTECHNIQUE Option : Energie et Environnement 2021/2022

### TP 4 : ESSAI DE RESILIENCE CHARPY - RESISTANCE AU CHOC

#### I. BUT

Les essais de résilience permettent de caractériser la fragilisation d'un matériau (Acier). Ils consistent à rompre une éprouvette entaillée (l'entaille a pour but de fragiliser le matériau « éprouvette Charpy »), sous l'impact d'un "Mouton-pendule".

On mesure l'énergie absorbée par la rupture, ce qui permet de remonter à la résilience du matériau (énergie absorbée ramenée à la surface ( $J/cm^2$ )).

#### II. OBJECTIFS

- Comparer la résilience des matériaux métalliques semblables (éprouvettes en Acier entaillées en U) à différents modes de refroidissement (eau, huile et air).
- Observer les surfaces de rupture des éprouvettes rompues et établir le lien avec l'énergie absorbée.

#### III. MATERIEL

- Four « Protherm ».
- Machine de résilience ROELL AMSLER type RKP 450.
- Eprouvettes avec entaille en forme U.

#### IV. INTRODUCTION

L'étude du phénomène de rupture sous choc (ou impact) est d'une importance cruciale. Les ruptures en service sont extrêmement coûteuses et peuvent entraîner la perte de vies humaines, de temps et de coûts. À titre d'exemples, on peut citer :

- l'impact des pièces mécaniques d'un train d'atterrissage d'un avion.
- L'impact de l'outil de forage qui peut valoir un temps et un coût considérable pour son changement.

Il est donc important de pouvoir caractériser expérimentalement ce phénomène de façon satisfaisante.

D'autre part, il a été constaté que certains matériaux, en particulier les aciers traités thermiquement, sont susceptibles de subir une rupture sous charge de choc.

L'essai de résilience est un test qui permet d'étudier la capacité des matériaux à résister aux charges de choc en mesurant l'énergie absorbée par la rupture ; la résilience, donc est la détermination de fragilité ou de ductilité.

## V. PRINCIPE

Le principe de l'essai de résilience consiste à mesurer l'énergie absorbée suite à un choc d'une masse en mouvement pendulaire sur une éprouvette. Cette dernière est sollicitée en flexion. L'énergie absorbée est celle consommée par la rupture de l'éprouvette. Pour le test de résilience, un dispositif appelé banc de Charpy ou mouton Charpy est utilisé avec des éprouvettes normalisées. Il existe différentes formes d'entailles (Figure 1).

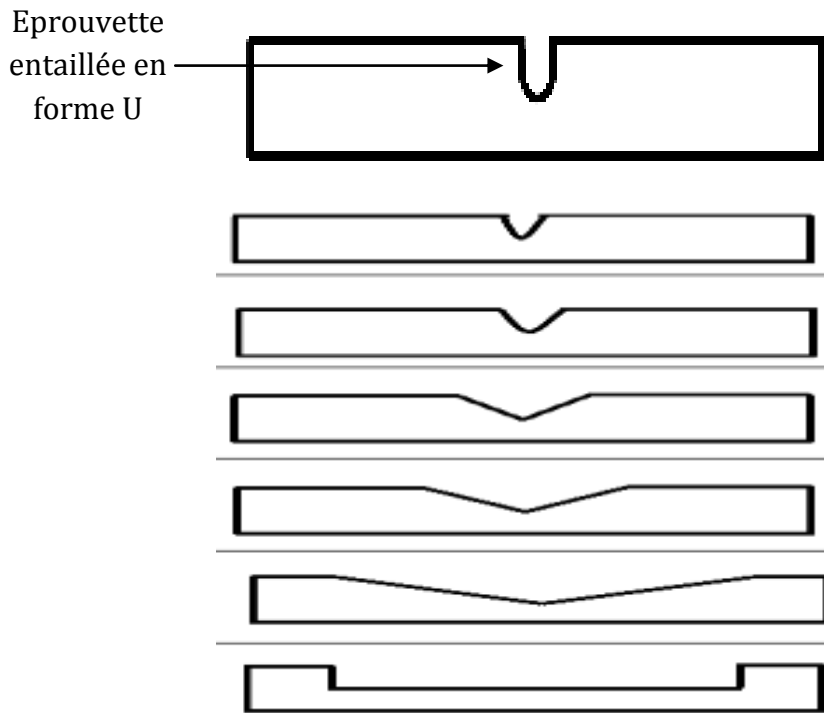


Figure 1 : Formes d'éprouvettes

### **Mouton Charpy**

Le mouton Charpy (Figure 2 et 3) est constitué d'un couteau fixé sur un marteau qui oscille dans un plan vertical autour d'un axe. Pour un essai, le couteau est amené à une hauteur **H** qui correspond à l'énergie de départ  $W_H = m g H$ .

Dans sa chute, le couteau va provoquer la rupture de l'éprouvette qui sera accompagnée d'une absorption d'énergie, et le marteau remontera à une hauteur **H'** à laquelle est associée une énergie potentielle  $W_{H'} = m g H'$ .

Il vient alors  $\Delta W = W_H - W_{H'} = m g L (\cos \beta - \cos \alpha)$

Avec :

m : Masse du marteau (m = 80 kg).

S : Section de l'entaille (S = 0,8 cm<sup>2</sup>).

g : Accélération de la pesanteur (9,81 m/s<sup>2</sup>).

H et H' : Hauteur de départ et d'arrivée du marteau (m).

L : Longueur du bras (L = 0,8m).

$\alpha$  : Angle de chute (°).

$\beta$  : Angle de remontée (°).



Plus la hauteur de remontée  $H'$  est faible, plus le métal a l'aptitude à résister au choc (métal résilient). La résilience est définie par la lettre  $K_U$  (U: Forme de l'entaille de l'éprouvette).

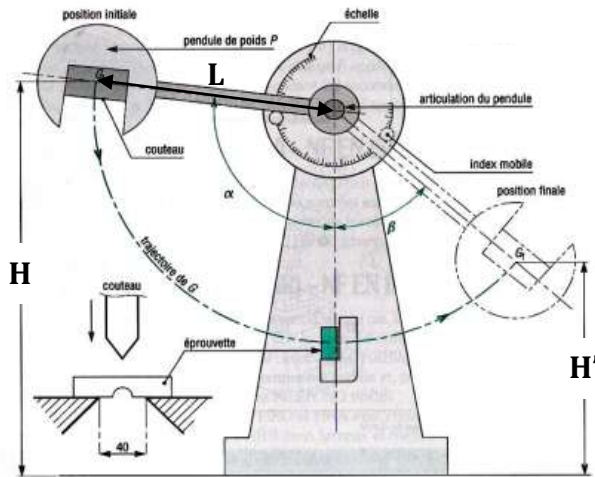


Figure 2 : Essai de résilience.

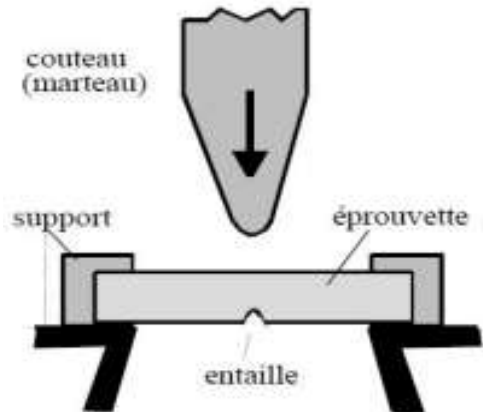


Figure 3 : Appui de l'éprouvette vue d'en haut

Il s'agit donc de relever le marteau (masse contenant un couteau) à une certaine hauteur. Ensuite, placer l'éprouvette au niveau le plus bas du passage du marteau (attention à bien enclencher la sécurité pour fixer la masse). Par la suite, lâcher la masse.

Le couteau, dans sa course, va percuter l'éprouvette et la casser, y perdant une partie de son énergie. L'énergie absorbée par l'éprouvette est égale à la perte d'énergie du marteau, i.e. à sa perte d'énergie potentielle.

**N.B : ATTENTION, LA MANIPULATION EST DANGEREUSE.**

La résilience est définie par l'énergie de rupture (sous choc) ramenée à la section  $S$  de l'éprouvette à l'endroit de la fissure :  $K_U = \Delta W / S$  ( $J/cm^2$ ).

A mentionner le type d'échantillon normé qu'on a utilisé pour la détermination de la résilience. Les éprouvettes les plus fréquemment utilisées aujourd'hui sont de types ISO-V et ISO-U.

## VI. PRESENTATION DE LA MACHINE DE RESILIENCE (Figure 4) :

C'est une machine constituée essentiellement de:

- Pendule contenant le couteau,
- Volant qui sert à monter ou baisser le pendule,
- Système de transmission par engrenages coniques qui joue le rôle de transmettre le mouvement de rotation du volant en une rotation de pendule,
- Cadran de lecture graphique de l'énergie,
- Système de maintien de l'éprouvette,
- Levier servant au démarrage de l'essai,
- Frein à pied qui sert à stopper la rotation du pendule après l'essai.



Figure 4 : Machine de résilience du laboratoire Sciences des matériaux  
(Université de Tlemcen - Faculté de Technologie)



## **TP : COMPTE RENDU : ESSAI DE RESILIENCE CHARPY – RESISTANCE AU CHOC**

### **I. REALISATION DES ESSAIS**

1. Chauffer les éprouvettes en Acier au four à la température 850°C pendant 10min.
2. Faire la trempe des éprouvettes respectivement dans l'eau, l'huile et l'air.
3. Placer l'éprouvette sur le bâti de la machine en utilisant le levier de centrage.
4. Une seule personne monte le pendule dans sa position haute initiale. L'aiguille de mesure se superpose à l'aiguille de sauvegarde.
5. Libérer le pendule en tirant le doigt de verrouillage vers soi et en lâchant le levier de maintien.
6. Freiner le pendule à l'issue de la première remontée du pendule (après rupture de l'éprouvette).
7. Noter l'énergie absorbée par l'éprouvette au cours de sa rupture : valeur indiquée par l'aiguille de sauvegarde.
8. Récupérer les morceaux d'éprouvette après l'arrêt complet du mouton pendulaire.
9. Solliciter l'aide du chargé du TP en cas de souci.

### **II. EXPLOITATION DES RESULTATS**

- Remplir le tableau suivant :

Eprouvette	Eprouvette témoin		Refroidissement rapide (Eau)		Refroidissement moyen (Huile)		Refroidissement long (Air)	
Angle $\beta$ (°)	62		84		69		56,5	
Valeur expérimentale de l'Energie absorbée (J)	214		161		189		228	
Valeur théorique de l'Energie absorbée (J)	294,75		65,62		224,99		346,52	
Résilience $K_U$ (J/cm <sup>2</sup> )	267,6	268,43	201,25	82,02	236,25	281,93	285,00	433,15

- Classer l'ensemble des éprouvettes testées par ductilité croissante, en déduire les plus fragiles et les plus ductiles rencontrés (Temps de refroidissement - Trempe).

### **III. COMMENTAIRES ET INTERPRETATION**

On porte le métal à une température d'austénitisation qui dépend de la composition chimique de la nuance d'acier traitée.

D'après le tableau précédant on remarque que l'énergie absorbée par la rupture lors du refroidissement par l'eau (Refroidissement rapide) est la plus faible tandis que celle par l'air (Refroidissement long) est la plus importante de même pour la résilience. De ce fait le temps et le milieu de refroidissement influent sur les caractéristiques mécaniques de l'éprouvette avec une entaille en forme de U.



Ces traitements thermiques permettent à l'éprouvette d'être dure et fragile car les liaisons entre les molécules deviennent plus faibles pour les différents types de refroidissements.

On constate que lorsqu'on effectue des essais de résilience sur plusieurs pièces ayant subi des revenus à une température constante, 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.

#### IV. CONCLUSION GENERALE

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 (n'est plus récupérée). 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.

# V : ESSAI DE TRACTION







## CARACTERISATION DES MATERIAUX

4<sup>ème</sup> année ELECTROTECHNIQUE Option : Energie et Environnement

2021/2022

### TP 5 : ESSAI DE TRACTION

#### I. BUT

- Se familiariser avec les différents types de courbes de traction.
- Etablir la différence entre les contraintes et les déformations nominales et réelles.
- Identifier les caractéristiques mécaniques d'un matériau.

#### II. OBJECTIF DU TP

- Connaître et analyser la courbe de traction de différents types de matériaux (Acier et Aluminium).
- Observer les comportements élastique et plastique des matériaux.
- Déterminer les caractéristiques mécaniques des matériaux : module de Young (E), limite d'élasticité ( $\sigma_e$  ou  $R_e$ ), résistance maximale à la rupture ( $R_m$ ), allongement après rupture (A%) et coefficient de striction (Z%).

#### III. MATERIEL

- Deux éprouvettes cylindriques (Acier et Aluminium).
- Machine de traction (Oehlgaass MP12) de charge maximale 120 KN.

#### IV. INTRODUCTION

En service, les matériaux sont sollicités par des charges ou des forces provoquant des déformations. Il est donc important de connaître les conditions de déformation et de rupture des matériaux. Les propriétés mécaniques les plus importantes sont la rigidité, la limite élastique et la ductilité mesurées par l'essai de traction. Ces propriétés sont mesurées par des essais mécaniques normalisés à l'aide d'éprouvettes standard soumises à des conditions de mise en charge bien définies. Une éprouvette d'essai est prélevée dans le matériau à caractériser et usinée à des dimensions normalisées, afin d'assurer une meilleure comparaison des essais effectués dans différents laboratoires. On simule également certaines conditions d'utilisation par des essais particuliers (vieillessement accéléré, usure, fatigue...). Une très grande prudence s'impose lorsqu'on veut transposer le résultat d'essais de laboratoire au comportement en service, car les conditions réelles de service sont généralement plus complexes que celles simulées lors des essais normalisés. Pour cela, on adopte souvent des coefficients de sécurité ou de correction dans le calcul et dimensionnement des éléments de machine ou de structure.

### V. PRINCIPE DE L'ESSAI DE TRACTION :

C'est l'essai est le plus courant, que permet de déterminer le comportement mécanique d'un matériau. Il s'agit d'exercer une force de traction sur un barreau de forme et de dimensions normalisées (Figure 1), jusqu'à sa rupture, en suivant un processus de mise en charge à une vitesse de déformation constante.

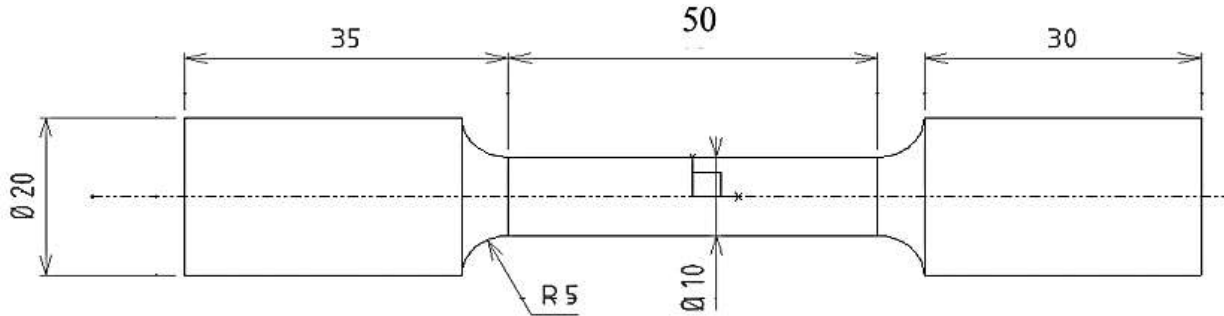


Figure 1 : Eprouvette de traction de forme cylindrique

En enregistrant la force appliquée à l'éprouvette par la machine de traction et son allongement progressif, on détermine une série de caractéristiques mécaniques importantes. On rapporte en général la force  $F$  et l'allongement  $\Delta l$  aux dimensions initiales de l'éprouvette d'essai. On obtient ainsi la contrainte nominale  $\sigma$  [MPa] :

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

(1)

Avec  $S_0$ : Aire de la section initiale. De même, on définit la déformation nominale  $\epsilon$  :  $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$

$l_0$  : Longueur initiale de l'éprouvette. La valeur de  $\epsilon$  est la plupart exprimée en pourcentage.

La figure 2, présente la courbe de traction d'un métal à comportement ductile. Une courbe de traction de ce type permet de déterminer les grandeurs caractéristiques de résistance et de plasticité ; la plasticité est la capacité d'un matériau à se déformer de manière permanente et irréversible avant rupture.

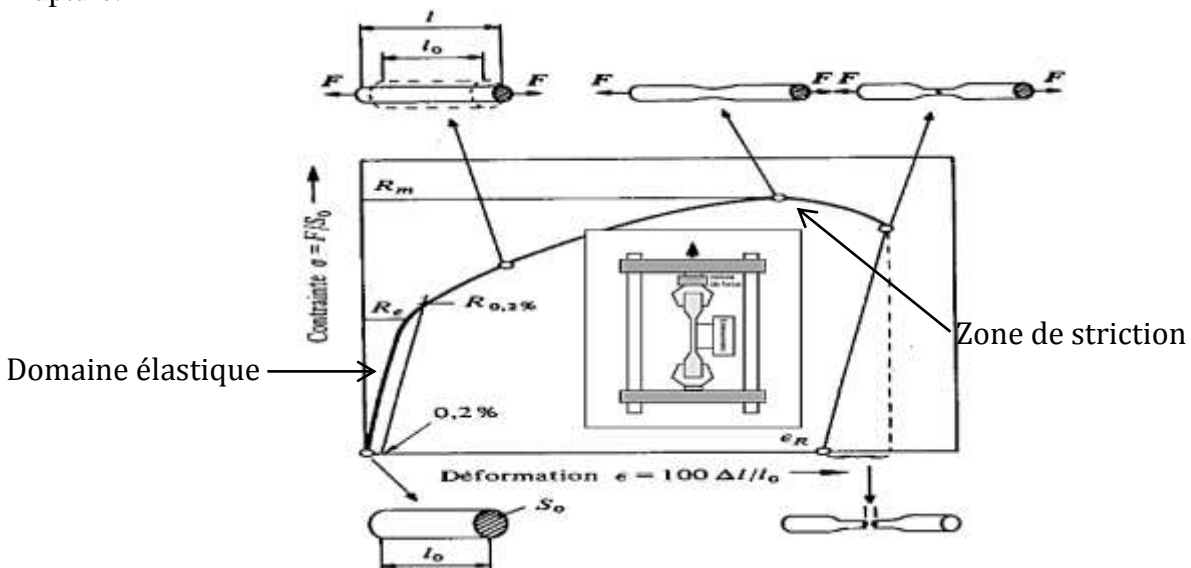


Figure 2 : Courbe de traction





▪ **Limite de proportionnalité**

C'est la contrainte calculée pour une charge égale à  $F_P : R_P = \frac{F_P}{S_0} [\text{N/mm}^2]$  (2)

Les contraintes inférieure à  $R_P$  ne produisent que des déformations élastiques qui disparaissent avec la suppression de la charge. C'est pourquoi on identifie souvent la limite de proportionnalité à la limite élastique.

▪ **Limite apparente d'élasticité**

C'est la contrainte relative à la forme  $F_e$  qui est l'une des propriétés principales de l'acier ou l'Aluminium. La contrainte supportée par le métal en service ne doit jamais la dépasser.

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} [\text{N/mm}^2] \quad (3)$$

Ces valeurs  $R_P$  et  $R_e$  caractérisent la résistance aux faibles déformations plastiques.

▪ **Résistance à la rupture**

C'est la contrainte qui correspond à la charge maximale que l'éprouvette peut supporter sans se rompre.

$$R_m = \frac{F_M}{S_0} [\text{N/mm}^2] \quad (4)$$

Pour une contrainte supérieure à  $R$ , la déformation se concentre en un secteur déterminé. Sur l'éprouvette apparaît un rétrécissement local de la section dit striction. L'effort de traction diminue et l'éprouvette rompt.

▪ **Allongement (A%)**

Il est défini par le rapport de l'augmentation de la longueur de l'éprouvette après rupture à sa longueur pratique initiale.

$$A = \frac{l_1 - l_0}{l_0} 100\% \quad (5)$$

Avec :  $l_0$  : Longueur initiale (entre repère) (mm).

$l_1$  : Longueur après rupture (mm).

▪ **Striction (Z%)**

C'est le rapport de la diminution de la section de l'éprouvette après rupture à la section initiale.

$$Z = \frac{S_0 - S_1}{S_0} 100\% \quad (6)$$

Avec :  $S_0$  : Section initiale ( $\text{mm}^2$ ).

$S_1$  : Section après rupture ( $\text{mm}^2$ ).

Le coefficient de striction Z constitue également une mesure de la ductilité :

- Le facteur Z varie de zéro (matériaux fragiles) jusqu'à l'unité en fonction de la ductilité des matériaux.

Lorsque la rupture se produit, l'éprouvette se contracte rapidement de manière brutale en restituant l'énergie stockée. Cette contraction s'accompagne d'une émission sonore qui a pour origine la transformation de l'énergie élastique en énergie cinétique.



Le module d'élasticité longitudinale d'un matériau E (Tableau 1) est le rapport constant des contraintes normales en traction aux déformations élastiques relatives correspondantes.

Matériaux	$R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_e$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	E (Module de Young) (N/mm <sup>2</sup> )
<b>Aciers ordinaires</b>	40 à 80	20 à 40	6 à 18	20000
<b>Aciers spéciaux</b>	<=200	<=150	100	20000
<b>Fer</b>	30 à 36	15	6 à 7	20000
<b>Fonte</b>	12 à 20	7	2 à 3	10000
<b>Duralumin</b>	40	26	6 à 8	7000
<b>Aluminium</b>	20	-	5	6750
<b>Bronze mécanique</b>	13 à 20	-	3	3500
<b>Cuivre</b>	24	6	3	12000
<b>Plomb</b>	1,3	0,4	0,2	500
<b>Chêne</b>	10	2,5	1	1000

Tableau 1 : Ordres de grandeur de  $R_m$ ,  $R_e$ ,  $R_p$  et  $E$ .

## VI. MACHINE DE TRACTION « OEHLGASS »

La machine OEHLGASS (Figure 3), comme toute machine de traction hydraulique, est dotée d'un vérin de traction (de type MP12) et d'un porte-outil sensée recevoir la tête de serrage supérieur, de deux colonnes et une traverse mobile ainsi qu'une partie inférieure fixe laquelle recevra la tête de serrage inférieure.

C'est une machine de traction manuelle ; le contrôle de la course du vérin se fait donc à l'aide d'une manivelle ou soupape de levage. Pour l'indication de la force appliquée aux éprouvettes, la machine est équipée d'un dynamomètre sur lequel sont indiqués les divisions de force allant de 0KN à 120KN, sans toutefois dépasser cette valeur (120KN), afin de préserver la machine de tout imprévu.

Le réglage de la force d'injection se fait manuellement au moyen de la soupape de limitation de force. A noter que sur cette machine, tous les essais pour lesquels la force de pression ou de traction est mesurée, doivent être réalisés à une très faible vitesse de déplacement. **Exemple** : 0,1 à 0,3 mm/mn. Les têtes de serrage sont conçues de manière à pouvoir supporter la force de traction maximale (120 KN).

### Spécification :

- Appareil d'essai hydraulique universel pour les essais de matériaux.
- Production des forces de traction et de compression.
- Force d'essai et vitesse de déplacement ajustable.
- Production de la force d'essai via pompe hydraulique.
- Mesure de force via indicateur de force (dynamomètre).
- Mesure de déplacement via comparateur.

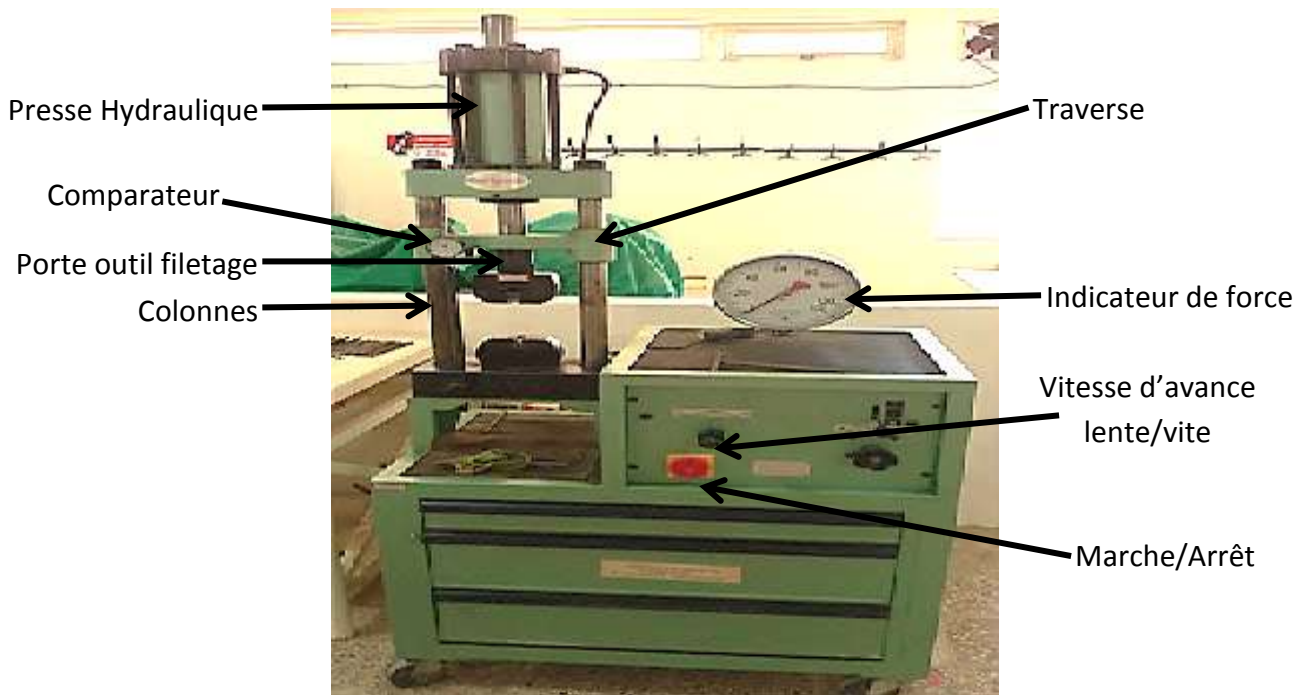


Figure 3 : Machine de traction OEHLGASS



## GLOSSAIRE

### LA TRACTION

En résistance des matériaux, la traction, ou tension, est une sollicitation qui consiste à tirer sur une poutre droite selon l'axe de sa plus grande dimension. Le contraire de la traction est la compression.

### LA COMPRESSION

En mécanique, la compression est l'application de forces équilibrées vers l'intérieur (« pousser ») à différents points sur un matériau ou une structure, c'est-à-dire des forces sans somme nette ou couple dirigé de manière à réduire sa taille dans une ou plusieurs directions<sup>1</sup>

### CONTRAINTE

En mécanique des milieux continus, et en résistance des matériaux en règle générale, la contrainte mécanique décrit les forces que les particules élémentaires d'un milieu exercent les unes sur les autres par unité de surface. Ce bilan des forces locales est conceptualisé par un tenseur d'ordre deux : le tenseur des contraintes. La contrainte va de pair avec une déformation de la matière dans laquelle elle s'exerce.

La contrainte mécanique est homogène à une pression (Pa).

### DEFORMATION D'UN MATERIAUX

La déformation des matériaux est une science qui caractérise la manière dont réagit un matériau donné quand il est soumis à des sollicitations mécaniques. Cette notion est primordiale dans la conception (aptitude de la pièce à réaliser sa fonction), la fabrication (mise en forme de la pièce), et le dimensionnement mécanique (calcul de la marge de sécurité d'un dispositif pour éviter une rupture).

### LOI DE HOOK

En physique, la loi de Hooke modélise le comportement des solides élastiques soumis à des contraintes. Elle stipule que la déformation élastique est une fonction linéaire des contraintes. Sous sa forme la plus simple, elle relie l'allongement (d'un ressort, par exemple) à la force appliquée. Cette loi de comportement a été énoncée par le physicien anglais Robert Hooke en 1676.

### MATERIAU

Un matériau désigne toute matière utilisée pour réaliser un objet au sens large. Ce dernier est souvent une pièce d'un sous-ensemble. C'est donc une matière de base sélectionnée en raison de propriétés particulières et mise en œuvre en vue d'un usage spécifique. La nature chimique, la forme physique (phases en présence, granulométrie et forme des particules, par exemple), l'état de surface des différentes matières premières, qui sont à la base des matériaux, leur confèrent des propriétés particulières. On distingue ainsi quatre grandes familles de matériaux.



---

## COMPTE-RENDU : TP : ESSAI DE TRACTION

### REALISATION DES ESSAIS

1. Préparer les éprouvettes (Acier et Aluminium) en mesurant les dimensions de la section  
**Eprouvette Acier** : Diamètre 8mm,  $L_0=13,5\text{cm}$ .  
**Eprouvette Aluminium** : Diamètre 6mm,  $L_0=8,5\text{cm}$ .
2. Prendre connaissance de la marche à suivre pour l'exécution d'un essai de traction :
3. Effectuer l'essai sur deux éprouvettes de matières différentes (Acier et Aluminium).  
Afin d'éviter de fausser les résultats, la vitesse d'allongement appliquée doit être faible. La force et la déformation de l'éprouvette sont mesurées, lors de l'essai de traction.
4. Enregistrer les courbes de traction. Mettre en évidence sur ces courbes les différents domaines.
5. Déterminer pour les éprouvettes rompues les caractéristiques de résistance et de plasticité. En Dédire l'état de chaque éprouvette.
6. Comparer les résultats. Discuter.
7. Comparer les cassures (forme de grain, cassure...).
8. Solliciter l'aide du chargé du TP en cas de souci.



**Eprouvette en Acier :**  $l_0 = 13,5\text{cm}$ ;  $D_0 = 8\text{mm}$ ;  $S=50,26\text{mm}^2$ ;  $\sigma = E \epsilon$

Pour déterminer le module d'élasticité E d'un matériau isotrope, on réalise un essai de traction et on enregistre la courbe contrainte = f(déformation). La pente de la courbe dans sa partie linéaire correspond au module d'élasticité en traction du matériau.

POINTS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$F = 10^3$ [N]	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
$\Delta l$ [mm]	0,005	0,03	0,09	0,16	0,25	0,31	0,69	1,13	1,83	2,25	3,06	3,08	4,49	6,68	14,06	18
$\sigma = \frac{F}{S}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	39,80	79,58	119,37	159,17	198,96	238,75	278,55	318,34	358,13	343,28	437,72	477,51	517,30	557,10	596,89	636,68
$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$	$3,70 \cdot 10^{-5}$	$2,22 \cdot 10^{-4}$	$6,66 \cdot 10^{-4}$	0,0011	0,0018	0,0022	0,0051	0,0083	0,0130	0,0160	0,0226	0,0228	0,0332	0,0494	0,1041	0,1333
E [daN/cm <sup>2</sup> ]	$2,56 \cdot 10^6$	$2,12 \cdot 10^6$	$2,02 \cdot 10^6$	$1,78 \cdot 10^6$	$1,58 \cdot 10^6$	$1,46 \cdot 10^6$	$1,44 \cdot 10^6$	$1,39 \cdot 10^6$	$1,27 \cdot 10^6$	$1,26 \cdot 10^6$	$1,25 \cdot 10^6$	$1,24 \cdot 10^6$	$1,23 \cdot 10^6$	$1,22 \cdot 10^6$	$1,22 \cdot 10^6$	$1,20 \cdot 10^6$

**Tableau 1 :** Eprouvette Acier

**Eprouvette en Aluminium :**  $l_0 = 8,5\text{cm}$ ;  $D_0 = 6\text{mm}$ ;  $S=28,27\text{mm}^2$ ;  $\sigma = E \epsilon$

POINTS	1	2	3	4	5	6	7
$F = 10^3$ [N]	2	4	6	8	10	12	14
$\Delta l$ [mm]	0,005	0,10	0,27	0,73	1,31	4,45	5,58
$\sigma = \frac{F}{S}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	70,74	141,49	212,23	283	353,73	424,47	495,22
$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$	$5,88 \cdot 10^{-5}$	0,0035	0,0095	0,025	0,046	0,157	0,197
E [daN/cm <sup>2</sup> ]	$6,33 \cdot 10^7$	$6,10 \cdot 10^7$	$5,33 \cdot 10^7$	$6,33 \cdot 10^7$	$6,33 \cdot 10^7$	$6,12 \cdot 10^7$	$5,56 \cdot 10^7$

**Tableau 2 :** Eprouvette Aluminium (Al)



## COMMENTAIRES ET INTERPRETATION

L'application d'une force provoque initialement une déformation élastique de l'éprouvette. Cela se traduit sur le diagramme (Voir Figure 2) par une droite car la déformation est proportionnelle, pour un métal, à la contrainte (loi de HOOKE). Cette déformation élastique est réversible. Si la contrainte est annulée, l'éprouvette revient instantanément à sa forme initiale. Cette déformation élastique est suivie d'une déformation irréversible (permanente) appelée déformation plastique, qui se traduit sur le diagramme par une courbe qui se termine au moment de la rupture de l'éprouvette.

D'après les résultats obtenus, on remarque que le module de Young pour l'acier est plus faible que celui de l'Aluminium mais la rupture de l'Aluminium est plus rapide que la rupture de l'Acier due au phénomène de plasticité.

Durant la première partie de l'essai, l'éprouvette a un comportement élastique linéaire. Théoriquement, la pente de la droite est égale au module de YOUNG. Il y a réversibilité totale et instantanée de la déformation. La déformation élastique est suivie de la déformation plastique. D'abord, l'allongement de l'éprouvette est accompagné d'une contraction homogène (uniforme) sur toute la longueur de l'échantillon. À partir d'un certain taux de déformation critique (contrainte maximale) la contraction de la section cesse d'être homogène et devient de plus en plus importante en un seul endroit.

On parle du phénomène de striction. Dès le début du processus de striction, la section locale diminue rapidement et la résistance à l'allongement de l'éprouvette qui est proportionnelle à la section diminue également. Lorsque la rupture se produit l'éprouvette se contracte de manière brutale en restituant l'énergie stockée. Cette contraction s'accompagne d'une émission sonore qui a pour origine la transformation de l'énergie élastique en énergie cinétique.

La déformation élastique réversible est sous la dépendance de l'énergie des liaisons interatomiques. La force de rétraction élastique résulte d'un déplacement minime des atomes du solide de leur position d'équilibre. L'énergie de cohésion de ces solides est très élevée. Les forces de rétraction élastique sont intenses, le module d'élasticité est élevé et le domaine élastique réversible limité. La limite élastique est atteinte lorsque l'échantillon sur lequel on exerce une traction peut être considéré comme un empilement de plans atomiques. La déformation plastique des matériaux cristallins ductiles provient du glissement irréversible de certains plans les uns par rapport aux autres, similaire à celui d'une pile de pièces de monnaie soumise à un cisaillement.

La cassure d'une éprouvette de traction présente, trois aspects :

1. Une zone fibreuse au centre, formée par des rides circulaires discontinues, ayant pour l'origine de la fracture.
2. Une zone de rupture fragile à relief radial, rappelant les rayons d'une roue.
3. Une zone périphérique.



Figure 4 : Cassure d'une éprouvette



---

### CONCLUSION GENERALE

Dans cet essai de traction on a déterminé le module d'élasticité E de l'Acier et de l'Aluminium. Il nous a permis de déterminer les caractéristiques mécaniques en particulier : La déformation d'une pièce.

En effet, l'acier tient environ 4 fois plus de chocs que l'Aluminium. Il est plus lourd que l'aluminium, et aussi plus résistant.

Par contre, à masse égale, l'aluminium offre une plus grande résistance et une meilleure rigidité que les autres matériaux les plus courants en construction. L'aluminium est ainsi un métal dont la densité spécifique est de  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , soit environ un tiers de celle de l'acier ( $7-8 \text{ g/cm}^3$ ). Il (Aluminium) est un matériau dont le module de Young est très élevé. Quant à l'acier, il est un matériau très rigide par rapport à l'Aluminium.



# VI : ESSAI DE FLEXION







## CARACTERISATION DES MATERIAUX

4<sup>ème</sup> année ELECTROTECHNIQUE Option : Energie et Environnement

2021/2022

### TP N°6 : ESSAI DE FLEXION

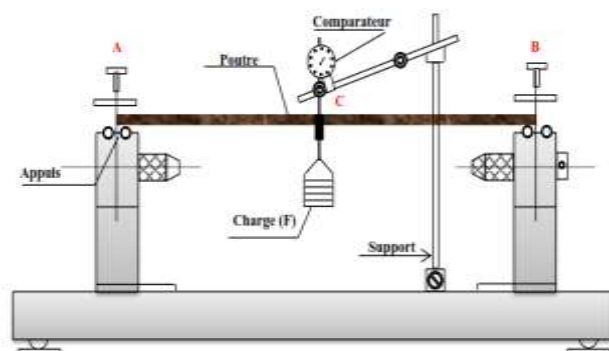
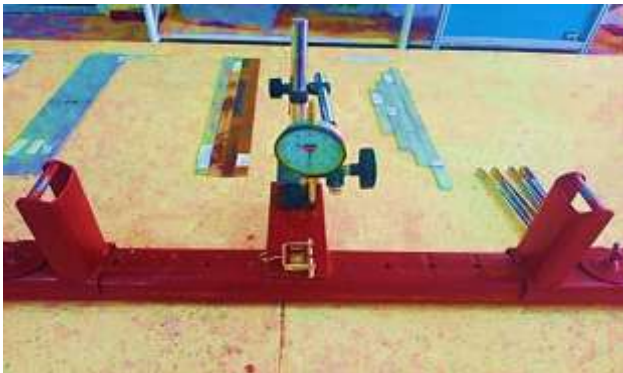
#### I. BUT

- ✓ Mettre en évidence l'essai de flexion.
- ✓ Déterminer la flèche maximale pour différentes barres.
- ✓ Déduire le module d'élasticité E.
- ✓ Etudier l'influence du type de matériau, de la longueur, de la largeur et de l'épaisseur des barres

#### II. OBJECTIFS

- Comprendre le phénomène de flexion simple.
- Etudier l'influence de longueur de différentes éprouvettes.
- Expliquer les propriétés élastiques de certains matériaux.

#### III. MATERIEL :



#### A : Banc d'essai de flexion

#### B. Présentation schématique du banc d'essai de la flexion

- Banc d'essai de flexion,
- Eprouvettes rectangulaires de différents matériaux et de différents paramètres géométriques (barres flexibles en aluminium).
- Micromètre,
- Support horizontal, support vertical,
- Couteau de support,
- Poids de traction.

#### IV. INTRODUCTION

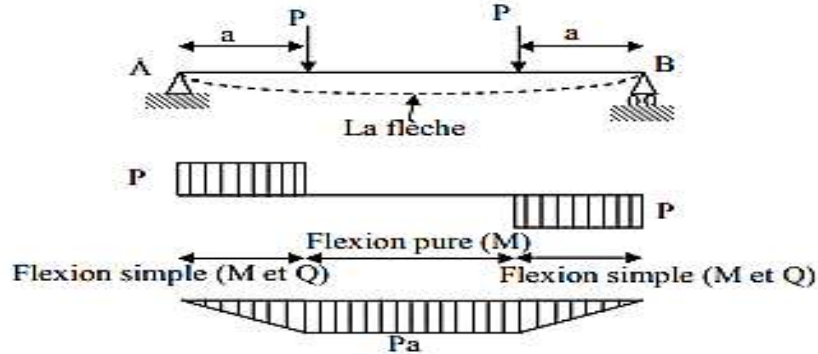
Les essais mécaniques sont utilisés pour caractériser le comportement d'un matériau. Ainsi, l'essai de flexion est un essai destiné le plus souvent à estimer rapidement et simplement la limite d'élasticité du matériau.

Il existe différents types de flexion. On cite la flexion pure, la flexion composée, la flexion déviée et aussi la flexion simple. Ces différents types dépendent de la nature de la matière, des sollicitations mécaniques extérieures.

Types de flexion	Schéma d'étude
Flexion pure	
Flexion simple	
Flexion composée	
Flexion déviée	

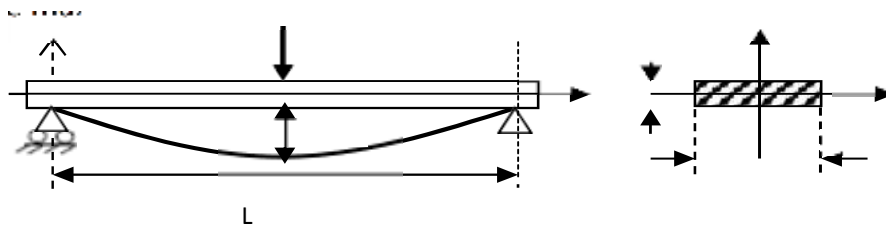
Tableau 1 : Différents types de flexion

L'action des forces latérales sur une éprouvette se traduit en une déformation de l'axe longitudinal initialement droit en une courbe curviligne. L'état d'une section d'éprouvette ou de toutes les composantes des efforts internes, seul un moment fléchissant  $M_y$  ou  $M_z$  n'est pas nul, est dit état de flexion plane pure. La déformation résultante de ce genre de sollicitation est connue sous le nom de la flèche. Lorsque l'effort tranchant n'est pas nul, la sollicitation est dite flexion simple.



### V. PARTIE THEORIQUE

Une barre ou une éprouvette (en génie civil ; une poutre) est dite en flexion lorsqu'elle est soumise à des forces ainsi que des couples se trouvant dans un plan contenant l'axe longitudinal de la barre. Ces forces agissent perpendiculairement à l'axe longitudinal et le plan contenant les forces est un plan de symétrie de l'éprouvette.



**CONTRAINTES TANGENTIELLES EN FLEXION :** Quand une éprouvette est soumise à l'action simultanée d'un moment fléchissant et d'un effort tranchant, en plus des contraintes normales, des contraintes tangentielles apparaissent aussi au niveau des sections droites. Aux contraintes tangentielles d'un élément unitaire sont associées des contraintes tangentielles égales sur les facettes horizontales (réciprocité des contraintes tangentielles).



#### Sollicitation cinématique « sollicitation flexion »

La flexion d'une éprouvette de longueur L, qui s'exprime à l'aide du déplacement maximal  $f_{max}$



Ce déplacement maximal  $f_{max}$  vaut :

$$f_{max} = \left( \frac{L^3}{48EI_Z} \right) F$$

Avec **E** : module d'élasticité en  $N/mm^2$  ou **MPa** ;

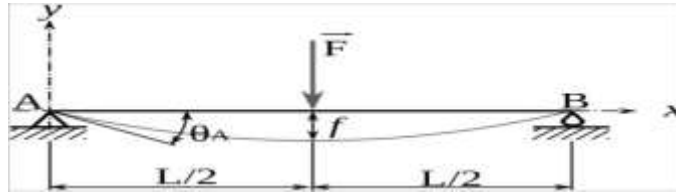


**Élasticité** : La propriété physique d'un corps à reprendre sa forme après suppression de la sollicitation (charge).

$I_{GZ}$  : moment quadratique par rapport à l'axe  $(G, \vec{Z})$ , en  $\text{mm}^4$ . Son expression s'écrit comme suit :

$I_{GZ} = \frac{\pi D^4}{64}$  (pour une poutre de forme cylindrique) où  $D$  est le diamètre de l'éprouvette de forme cylindrique.

Le moment quadratique caractérise la raideur de l'éprouvette au fléchissement.  
Quant à l'essai **de flexion simple**, l'effort tranchant est constant en valeur absolue.



Afin de calculer la flèche maximale, la charge est appliquée au centre de la poutre. Dans ce cas, on utilise les lois statiques de la résistance des matériaux.

La flèche maximale est donnée en fonction d'une charge appliquée  $F$  par la loi suivante :

$$f_m = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I_z}$$

Avec :

$f_m$  : Flèche maximale [mm].

$I_z = \frac{b \cdot h^3}{12}$  : Moment d'inertie [ $\text{mm}^4$ ].

$l$  : Distance mesurée entre les appuis, [mm].

$E$  : Module d'élasticité transversal [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ].

$b$  : Largeur de l'éprouvette [mm].

$h$  : Epaisseur de l'éprouvette [mm].



**TP N°6: COMPTE RENDU : ESSAI DE FLEXION SIMPLE**

**I. MODE OPERATOIRE**

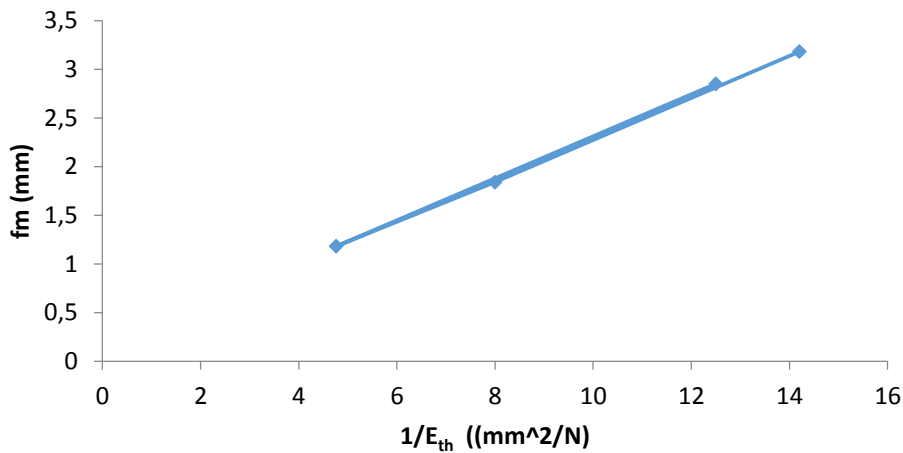
1. Placer l'éprouvette dans le banc
2. Placer la masse au milieu de l'éprouvette.
3. La lecture de la flèche ( $f_{max}$ ) se fait directement sur le comparateur associé au banc.

**II. EXPLOITATION DES RESULTATS**

1. Remplir les tableaux suivants : La charge(N)= 1 (kg) x g ( $m.s^{-2}$ )/g= 9,81m.s<sup>-2</sup>

**1.1 Influence de matériau**

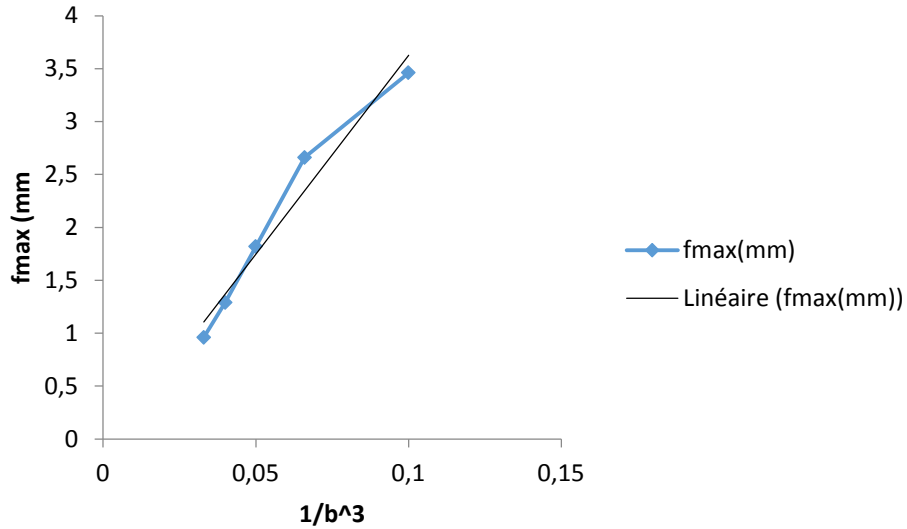
Matériau	$f_m$ (mm)	$E_{exp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{th}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$1/E_{th}$ (mm <sup>2</sup> /N)
Aluminium	3,18	75315,07	70000	$1,42 \times 10^{-5}$
Cuivre	1,84	130164,10	125000	$8 \times 10^{-6}$
Acier	1,18	202967,75	210000	$4,76 \times 10^{-6}$
Bronze	2,85	84035,77	80000	$1,25 \times 10^{-5}$



**1.2 Influence de la largeur  $b$  de la barre,  $h= 5mm$ ,  $l=50cm$**

Largeur $b$ (mm)	10	15	20	25	30
$1/b$ [mm <sup>-1</sup> ]	$10^{-1}$	0,066	0,05	0,04	0,033
$f_{max}$ (mm)	3,18	2,50	1,75	1,20	0,86

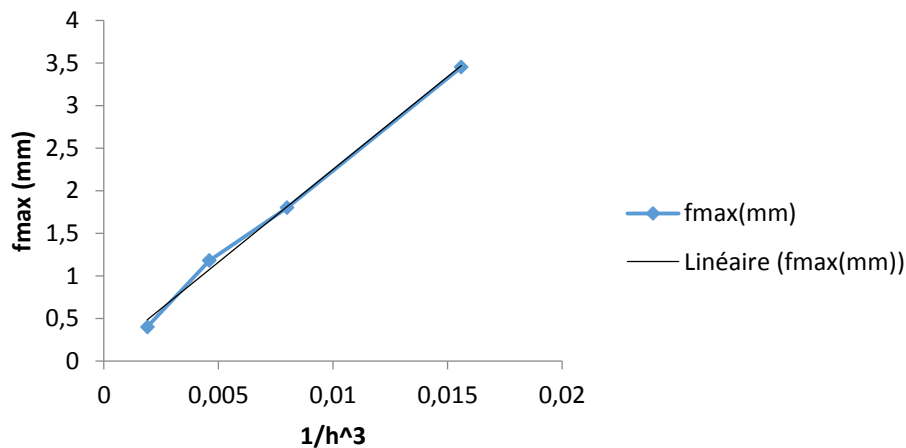
Tracer la courbe  $f_{max} = f(1/b)$



### 1.2 Influence de l'épaisseur $h$ de la barre, $b=20\text{mm}$ , $l=50\text{cm}$

Epaisseur $h$ (mm)	4	5	6	8
$1/h^3$ (mm <sup>-3</sup> )	0,0156	0,008	0,0046	0,0019
$f_{max}$ (mm)	3,06	1,9	1,14	0,4

Tracer la courbe  $f_{max} = f(1/h^3)$



### 1.3 Influence de la longueur $l$ de la barre, $b=20\text{mm}$ , $h=5\text{mm}$

Longueur $l$ (cm)	20	30	40	50
$f_{max}$ (mm)	0,15	0,60	1,25	3,15

Tracer la courbe  $f_{max} = f(l)$

- Déterminer la valeur expérimentale du module d'élasticité pour les différents paramètres géométriques de l'éprouvette.





La valeur du module de Young est déterminée à partir de l'équation

$$f_m = \frac{F.l^3}{48.E.I_z} \text{ et } I_z = \frac{b.h^3}{12}$$

Donc,

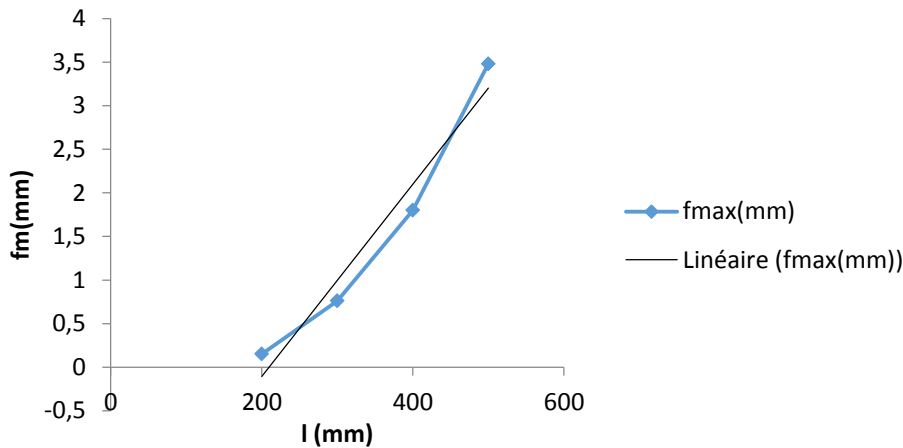
$$E = \frac{F.l^3}{4.f_m.bh^3}$$

a. Influence de la largeur  $b$  de la barre

$1/b \text{ [mm}^{-1}\text{]}$	$10^{-1}$	0,066	0,05	0,04	0,033
$f_{max}(\text{mm})$	3,18	2,50	1,75	1,20	0,86
$E(10^6) \text{ (N/mm}^2\text{)}$	7,712	14,863	28,028	51,10	86,416

b. Influence de l'épaisseur  $h$  de la barre

$1/h^3 \text{ (mm}^{-3}\text{)}$	0,0156	0,008	0,0046	0,0019
$f_{max}(\text{mm})$	3,06	1,9	1,14	0,4
$E(10^6) \text{ (N/mm}^2\text{)}$	32,185	100,842	2990,853	



### III. COMMENTAIRES –INTERPRETATION

Cette manipulation consiste à calculer la distance de déplacement causé par l'effort de flexion sur des barres métalliques due à la charge appliquée. Elle se fonde sur l'étude de l'influence du type de matériau (acier, cuivre, bronze et aluminium) en plus des paramètres géométriques (largeur  $b$ , longueur  $l$  et épaisseur  $h$ ) sur la flèche maximale des barres en aluminium.

La comparaison des valeurs du module de Young pour chaque barre donne une valeur différente (coefficient d'élasticité différent). Ceci nous permet de conclure que le module de Young varie en



fonction des paramètres étudiés. Une barre de longueur plus grande a un coefficient d'élasticité plus grand. Par contre une barre d'épaisseur plus grande a un déplacement de flèche plus petit.

D'après les résultats expérimentaux on remarque aussi que la rigidité dépend du matériau. La rigidité diffère d'un matériau à l'autre. L'acier est plus rigide que l'aluminium par exemple.

Cette expérience permet de choisir le matériau adéquat selon le besoin et la disponibilité. Ainsi, on peut obtenir la même caractéristique en utilisant des matériaux différents mais en changeant la géométrie.

#### IV. CONCLUSION GENERALE :

L'essai de flexion détermine l'aptitude à la déformation d'un matériau soumis à un effort progressif. Il constitue des sollicitations typiques pour les composants des structures. Les contraintes et déformations qui en résultent peuvent entraîner une défaillance. Le choix de différents facteurs tel que : le matériau, la section, la longueur et le type d'appui peut avoir une influence capitale sur la stabilité des structures. En conclusion, 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.

Dans ce TP, nous avons cherché le module d'élasticité de Young. La condition de résistance en flexion est la même qu'en traction en prenant la valeur maximale de la contrainte.

# VII : DIFFRACTION DES RAYONS X







CARACTERISATION DES MATERIAUX

4<sup>ème</sup> année ELECTROTECHNIQUE Option : Energie et Environnement 2021-2022

TP 7 : DIFFRACTION DES RAYONS X- LOI DE BRAGG

**I. BUT**

- Etude du phénomène de diffraction des rayons X par un cristal.
- Mesure de la distance réticulaire du cristal.

**II. OBJECTIFS**

- Comprendre le phénomène de la diffraction des rayons X,
- Expliquer le spectre des raies,
- Savoir appliquer la loi de Bragg,
- Déterminer la distance réticulaire d'un cristal.

**III. MATERIEL :**

- Cristal KCl,
- Diffractomètre à rayons X,
- Amplificateur compteur d'impulsions

**IV. INTRODUCTION**

Découverte au début du siècle, la diffraction des rayons X par des cristaux révolutionna les débuts de la physique du solide. D'énormes progrès ont été réalisés depuis ces premières tentatives qui permettent maintenant d'étudier des matériaux à structures très complexes.

Le nom de rayons X provient d'un mystère qui avait entourait la nature du phénomène au lendemain de sa découverte en 1895 par le savant allemand Roentgen. La nature électromagnétique des rayons X est prouvée par les expériences de réflexion, de polarisation et de diffraction observées avec ce rayonnement. Ce phénomène est lié à la longueur d'onde  $\lambda$  de l'ordre de grandeur de l'Angström correspondant à des fréquences très élevées du rayonnement étudié.

On distingue des rayons X durs et les rayons X mous. Les premiers de plus grande énergie, donc de faibles longueurs d'onde, sont plus pénétrants. On les utilise dans les applications médicales (radiographie :  $\lambda$  est de l'ordre de  $0,1 \text{ \AA}$ ). Les deuxièmes sont réservées à l'étude des cristaux. Leur domaine de longueurs se situe aux alentours de  $10 \text{ \AA}$ .

La diffraction des rayons X permet la détermination des phases minérales micro et poly-cristallines des matériaux. Cette technique de base de caractérisation des matériaux n'est applicable qu'à des matériaux composés d'un nombre relativement important de cristaux aux orientations non préférentielles (céramiques, roches et monocristaux) et pratiquement tous les domaines de la physique du solide ont recours à l'une ou l'autre des méthodes de caractérisation des rayons X.

Au cours de ce TP, nous allons d'abord faire une description détaillée de l'appareillage utilisé en diffraction rayon X, ensuite décrire son principe de fonctionnement et enfin introduire la loi de Bragg

## V. APPAREILLAGE :

### V.1. DIFFRACTOMETRE (Figure 1) :

Le diffractomètre est un appareil qui permet de faire la mesure de la diffraction d'une onde sur une cible. Ce terme est surtout utilisé pour la diffraction de rayons X. Il est constitué :

- d'un générateur de rayons X
- d'un ensemble de goniomètre
- d'une chaîne de détections ou de mesures

#### V.1.1. Générateur de rayons X

Il existe plusieurs types de générateur de rayons X (Tube de Crookes, Tube de Coolidge, Tube à anode tournante, Tubes à cathode chaude, etc.) dont le principe reste toujours le même.

Une haute tension électrique (de l'ordre de quelques dizaines de kV) est établie entre deux électrodes. Il se produit alors un courant d'électrons de la cathode vers l'anode parfois appelé anticathode ou cible. Les électrons sont freinés par les atomes de la cible, ce qui provoque un rayonnement continu de freinage ou « Bremsstrahlung » dont une partie du spectre est dans le domaine des rayons X.

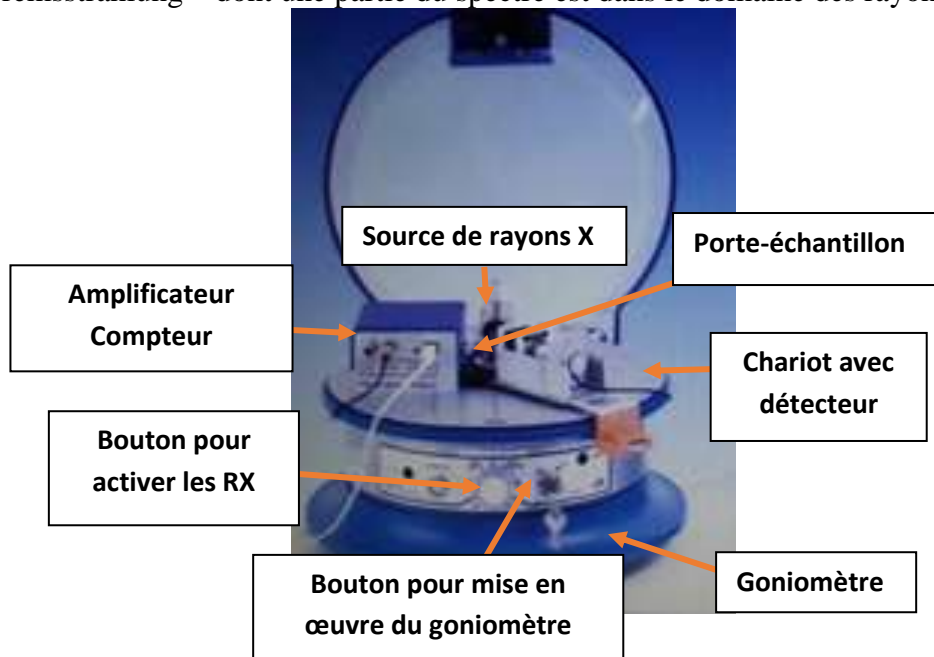


Figure 1 : Tube de rayon X (Faculté des Sciences)

**V.1.2. Présentation du diffractomètre des rayons X (Voir figure 2):**

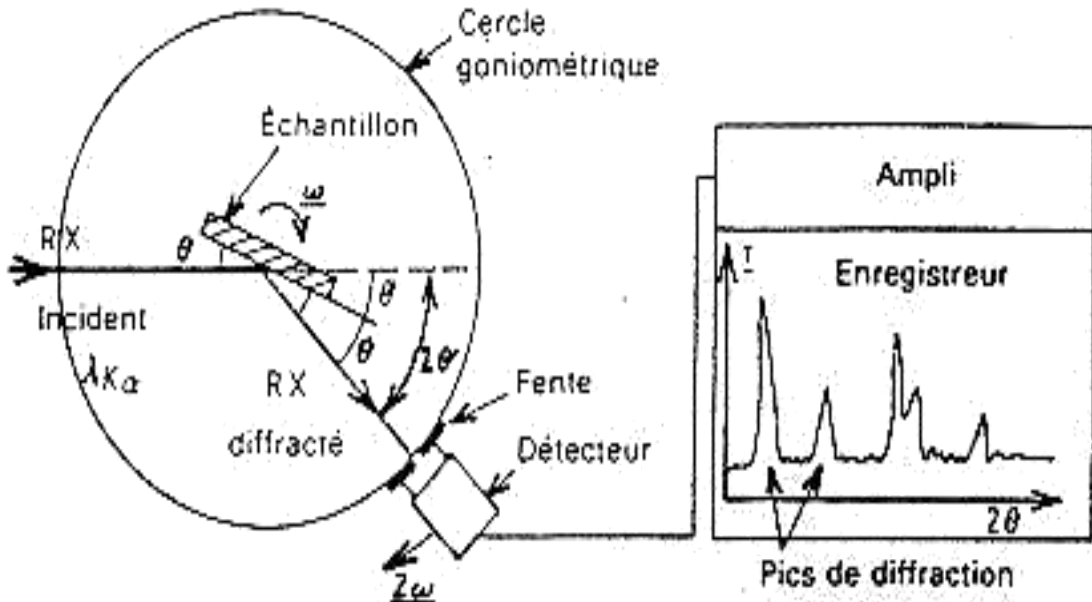


Figure 2 : Schéma d'un diffractomètre à compteur

**V.1.3. Ensemble de goniomètre**

Le goniomètre est un appareil servant à mesurer des angles. Il comporte en général une règle graduée en degrés, un rapporteur, d'un collimateur qui permet de régler l'ouverture de la fente et éventuellement un vernier pour améliorer la précision. En diffractomètre X, le goniomètre sert à déterminer des angles.

On distingue la configuration  $\theta$ - $2\theta$  (« thêta-deux thêta ») (Voir figure 3) ; (la configuration de Bragg-Brentano) : le tube à rayons X est fixe, l'échantillon bouge d'un angle  $\theta$  et le détecteur de rayons X d'un angle  $2\theta$  ; c'est la configuration la plus courante. En effet, le tube étant le dispositif le plus lourd et le plus encombrant, il est plus simple de le fixer.

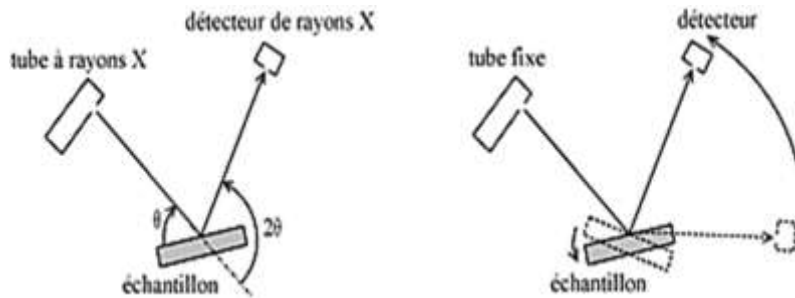


Figure 3 : Configuration  $\theta$ - $2\theta$  (« thêta-deux thêta »)

#### V.1.4. Cristaux Monochromateurs

Leur principe repose sur la sélection sélective d'un faisceau polychromatique par un monocristal. Le cristal monochromateur utilisé en TP est un cristal de KCl diffracté par la raie  $K_{\alpha}$  du cuivre (Voir figure 4).

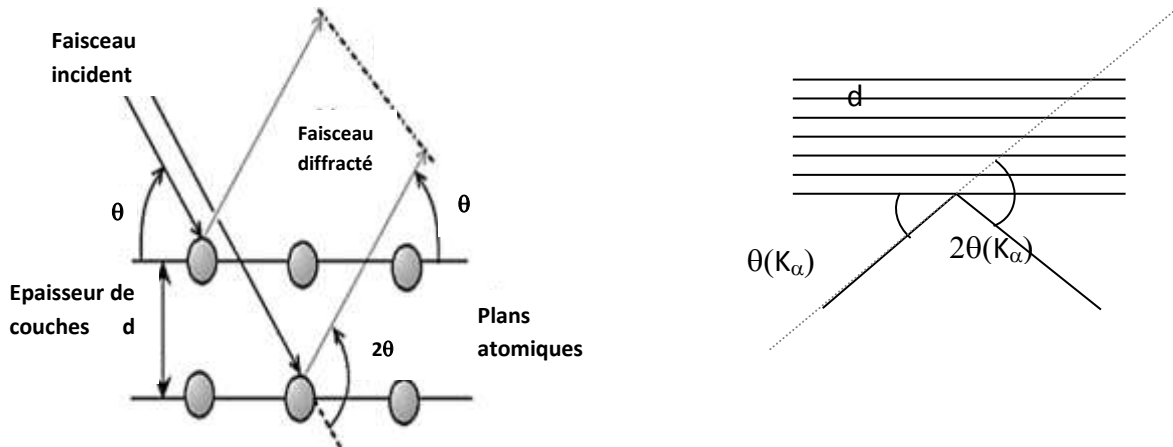


Figure 4 : Principe de fonctionnement d'un cristal monochromateur

Le faisceau incident issu du tube est divergeant et a une certaine largeur spectrale ; seuls les rayons X faisant juste l'angle de Bragg avec le monocristal seront diffractés (perte d'intensité). Pour éviter cet inconvénient, le monochromateur dit de *Johan* utilise une lame cristalline courbée qui offre une focalisation approchée du faisceau sortant. Enfin il existe des monochromateurs dits à focalisation exacte de type *Johanson* (symétrique) ou *Guinier* (asymétrique) où la lame est taillée. Les deux derniers types permettent, dans des conditions optimales, d'isoler les raies  $K_{\alpha}$  et  $K_{\beta}$  du cuivre.

On définit un plan de diffraction comme le plan formé par le faisceau incident et celui diffracté. Un plan d'atomes diffractera si l'angle  $\theta$  du faisceau incident satisfait la condition de Bragg donnée par l'équation suivante :  $2d\sin\theta = n\lambda$

Où  $d$  est la distance interréticulaire entre les plans diffractant,  $n$  est l'ordre de diffraction (nombre entier) et  $\lambda$  est la longueur d'onde des rayons X incidents.

#### ▪ Formulation de Bragg de la diffraction des rayons X :

W. L. Bragg expliqua la diffraction des rayons X en considérant un cristal comme composé d'une famille particulière de plans réticulaires parallèles semi-réfléchissant caractérisés par leurs indices de Miller et séparés d'une distance  $d(h,k,l)$ . Les rayons incidents et diffractés sont représentés pour les deux plans voisins.

Les conditions d'obtention d'un pic aigu de rayonnement diffracté étaient que:

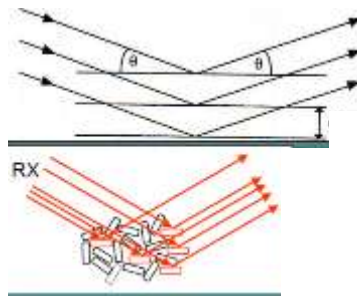




La différence de marche entre deux rayons est égale à  $2d\sin\theta$  où  $\theta$  est l'angle d'incidence mesuré de manière conventionnelle, à partir du plan de réflexion plutôt qu'à partir de la normale à ce plan comme c'est le cas en optique classique.

Pour les rayons qui interfèrent de manière constructive, cette différence de marche doit être un multiple de la longueur d'onde:  $L$ 'entier  $n$  est appelé ordre de la réflexion correspondante.

En d'autres termes les rayons X devaient être réfléchis comme un miroir par les ions ou atomes de chaque plan ; les rayons réfléchis par des plans successifs devaient interférer de manière constructive.





**TP : COMPTE RENDU : DIFFRACTION DES RAYONS X PAR UN CRISTAL**

**I. PROCEDURE EXPERIMENTALE**

1. Mettre le cristal KCl dans le porte-échantillon ; refermer le couvercle
2. Mettre en marche le détecteur d'impulsions et l'appareil à rayons X (avec la minuterie au maximum).
3. Déplacer le détecteur par un angle  $2\theta$ . (le cristal tourne d'un angle de  $\theta$  : *angle d'incidence des rayons X sur le cristal*).
4. Etudier les variations des impulsions des rayons X en fonction de  $2\theta$

**I.1. EXPLOITATION DES RESULTATS**

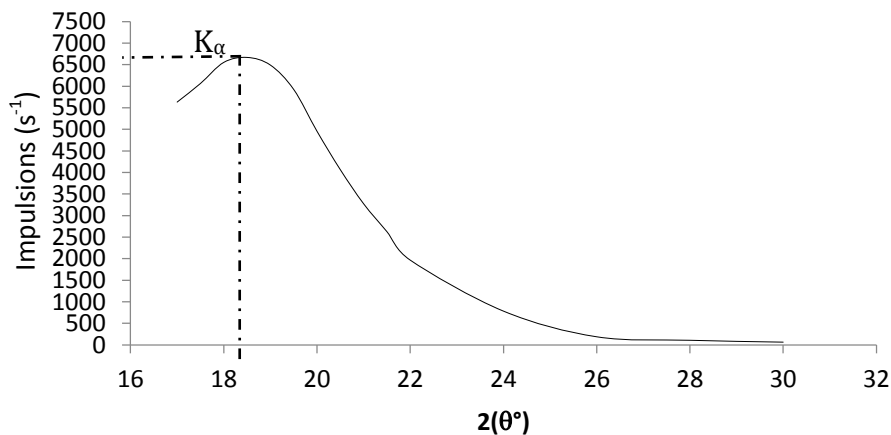
Remplir le tableau de mesures : (Angle  $2\theta$  en fonction du nombre d'impulsions). Pour la variation de  $2\theta$  on commence à partir de  $16^\circ$  jusqu'à  $22^\circ$  avec un pas de  $\frac{1}{2}^\circ$  et entre  $22^\circ$  et  $40^\circ$ , on varie le pas de  $2^\circ$ , entre  $40^\circ$  et  $46^\circ$  on varie le pas de  $\frac{1}{2}^\circ$ . (L'intensité des rayons X représente l'impulsion qui est le nombre de coups/secondes)

$2\theta(^\circ)$	Nombre d'impulsions
16	4275,76
16,5	5092,10
17	5631,26
17,5	6063,00
18	6552,06
18,5	6667,10
19	6489,86
19,5	5925,30
20	4954,90
20,5	4064,20
21	3272,80
21,5	2625,53
22	1965,70
24	782,86
26	187,53
28	106,33
30	63,10
32	44,46
34	35,20
36	32,43
38	32,43
40	19,10
40,5	20,90
41	20,23
41,5	21,56
42	20,86
42,5	21,33



43	23,70
43,5	22,36
44	21,33
44,5	22,60
46	37,46

## I.2. Tracer la courbe Intensité (RX) = f(2θ)



Nous remarquons qu'avec un petit angle, nous avons obtenu un très grand nombre d'impulsions. Le  $16^{\circ},5$  correspond à l'impulsion maximum. La raie  $K_{\beta}$  est difficile à obtenir donc on cherche la distance réticulaire pour la longueur d'onde  $K_{\alpha}$

## I.3. Calcul de la distance réticulaire du cristal :

La raie  $K_{\alpha}$  apparaît à  $2\theta = 18^{\circ}30'$ . D'où  $\theta = 9^{\circ}15'$

A l'aide de la relation de Bragg :  $2d\sin\theta = n\lambda$

Avec  $n$  le 1<sup>er</sup> ordre ( $n=1$  ; couche K) et  $\lambda_{K_{\alpha}} = 0,154 \text{ \AA}$  d'où  $2d = \frac{n\lambda}{\sin\theta} = \frac{0,154 \times 10^{-9}}{\sin(9^{\circ}15')} = 9,5805 \text{ \AA}$

La distance interréticulaire est donc  $d = 9,5805/2 = 4,7902 \text{ Angström}$

Les cônes de diffraction peuvent être interceptés à l'aide d'un détecteur balayant l'angle  $2\theta$  dans le plan vertical. On a obtenu un diagramme de diffraction donnant l'intensité diffractée en fonction de l'angle  $2\theta$ . L'intensité augmente à un pic puis commence à faiblir (nombre de coups lents).

En réglant soigneusement les seuils du compteur, on peut donc ne compter que les photons de longueur d'onde  $[\lambda_{K_{\alpha}} (Cu)]$ .

Pour un angle d'incidence vérifiant la loi de Bragg pour la composante du rayonnement de longueur d'onde  $\lambda_{K_{\alpha}}$ , nous avons pu déterminer la distance inter-réticulaire des plans parallèles à la surface du cristal analyseur. Puisque le montage maintient une géométrie de réflexion entre faisceaux incident et mesuré par rapport à la surface du cristal analyseur, on ne mesure que la diffraction par ces plans.



## II. CONCLUSION GENERALE

La diffractométrie de rayons X est une technique d'analyse basée sur l'interaction des rayons X avec le nuage électronique des atomes du matériau. Elle permet d'étudier des matériaux cristallisés et d'obtenir de nombreuses informations sur l'organisation de la matière comme :

- La structure cristalline des matériaux,
- La mesure des paramètres de maille et la mesure des épaisseurs les couches,
- La mesure des contraintes et de la taille des cristallites,
- L'équidistance  $d$  des plans atomiques à partir de la loi de Bragg.



## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] BADEL P., Cours de résistance des matériaux, Cycle Préparatoire Médecin-Ingénieur, Ecole des Mines Saint Etienne, 2012.
- [2] BASSET J.P., CARTRAUD P., JACQUOT C., LEROY A., PESEUX B., VAUSSY P., Introduction à la Résistance des Matériaux, École Centrale de Nantes, 2007.
- [3] CHAUSSIN C., HILLY G., Métallurgie : Alliages métalliques, Tome 1, Ed. Dunod, 1976.
- [4] E. HUGONNAUD E., TROTIGNON J.P., POMPIDOU M., FACY G., DIETRICH R., Précis de Construction Mécanique : Méthodes, Fabrication et Normalisation. Tome 2, Ed. Nathan, 1991.
- [5] KURZ W., MERCIER J.P., ZAMBELLI G., Introduction à la science des matériaux, Presses Polytechniques Romandes, 1999.
- [6] ACHOUR A., Résistance des Matériaux, Travaux Pratiques, Université de Tlemcen, Faculté de Technologie, Département de Génie Civil, 1994.
- [7] AULNOYE L.P., Mécanique appliquée, Résistance des matériaux, Cisaillement, cours construction mécanique, IUT Génie Civil, 2012.
- [8] Manuel d'utilisation de l'appareil Jominy Controlab,
- [9] Manuel d'utilisation du Duromètre Ernst NR 3.
- [10] Manuel d'utilisation du four de traitement thermique Controlab L4/10.
- [11] [www.Wikipédia.org](http://www.Wikipédia.org)