



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique

-ENP-

Dépt. de : **Génie mécanique.**

Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état.

Thème :

***Remise en marche du pendule
Charpy et essais expérimentaux de
validation.***

Dirigé par :

➤ *Mr. Y. Belkacemi.*

Mr.B.Guergueb.

Etudié par:

M. MEBARKI Fares.



ملخص:

إعادة تشغيل دفاق شاربي و تجارب عملية للتأكيد

الغرض من هذا المشروع هو إصلاح الآلة الخاصة باللي بالصددمات الموجودة على مستوى مخبر دائرة الهندسة الميكانيكية. قبل الشروع في عملية الانجاز، تم وضع سلسلة استصناع. من اجل التأكد من صحة عمل الآلة، قمنا بإجراء مجموعة من التجارب على مخبرات مختلفة مصنوعة من الفولاذ. كلمات مفتاحيه: اعوجاج بالصددمات، تجارب المرونة، تجارب الصلابة.

Résumé :

Remise en marche du pendule Charpy et essais expérimentaux de validation.

L'objectif de ce projet est la réparation de la machine d'essai de flexion par choc du laboratoire de Génie mécanique.

Avant de passer à la réalisation, une gamme d'usinage a été établie.

Afin de tester le bon fonctionnement de la machine, une série d'essais a été effectuée sur différentes éprouvettes faites en acier XC38 et A60.

Mots clés : essai de résilience ; flexion par choc ; essai de fragilité.

Abstract:

Restarting of the Charpy pendulum and experimental tests of validation.

The objective of this project is the repair of the testing machine of inflection per shock of the mechanical laboratory of Engineering.

Before passing to the realization, a range of machining was established.

In order to test the good performance of the machine, a series of tests was carried out on various test-tubes made out of steel XC38 and A60.

Key words: impact test; inflection by shock; test of brittleness.

Dédicaces

Mes très chers parents qui se sont sacrifiés toute leur vie pour que je réussisse dans mon cursus scolaire et universitaire.

A mes frères et sœurs;

A toute ma famille ;

*A tous mes amis; surtout **Amine Zézi***

A tous mes collègues;

A tous ceux que j'ai connus durant ma formation;

A tous ceux pour qui je compte et qui comptent pour moi

Remerciements

*Je remercie en premier lieu **ALLAH** le tout puissant de m'avoir donné la santé et le pouvoir d'accomplir ce modeste travail.*

Je remercie mes parents pour leur patience, leurs encouragements et leur soutien.

Je remercie mes encadreurs M. B. Guergueb et M. Y. Belkacemi qui ont impulsé et orienté avec tact mes travaux, tout au long du projet, m'inspirant la rigueur nécessaire et un certain professionnalisme. Ils se sont fortement impliqués dans ce travail et je leur en suis reconnaissant.

Je remercie également monsieur Belhadef, responsable du laboratoire de m'avoir permis d'effectuer ce travail dans de bonnes conditions.

*J'adresse mes sincères remerciements à monsieur H. Zahana, chef de l'entreprise USI-PRECIS, qui a participé à la réalisation de mon système et j'ai lui dit **بارك الله فيك، ورحم الله والديك**.*

Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : ESSAIS DE RESILIENCE

I.1 Introduction.....	3
I.2 Bref historique.....	3
I.3 Définition et principe de l'essai de résilience.....	6
I.4 Machines d'essais.....	7
I.5 Les barreaux de résilience employés actuellement.....	12
I.6 Zone critique de la résilience.....	14
I.7 Influence de divers facteur sur les résultats de l'essai de fragilité.....	14
I.7.1 Influence des dimensions de l'éprouvette sur la résilience.....	15
I.7.2 Influence de l'entaille sur la résilience.....	20
I.7.3 Influence de la machine d'essai sur la fragilité.....	24
I.7.4 Influence de la vitesse de choc sur la fragilité.....	24
I.7.5 Influence de la température d'essai sur la résilience.....	26

Chapitre II : CONCEPTION DES PIECE DU PENDULE

II.1 La machine d'essai de flexion par choc.....	30
II.1.1 Présentation de la machine.....	30
II.1.2 Principe de fonctionnement de la machine de flexion par choc.....	30
II.1.3 Composition de la machine.....	31
II.2 Analyse des problèmes.....	31
II.3 La conception avec le Solidworks.....	31
II.3.1 La CAO.....	31
II.3.2 Solidworks.....	32
II.3.3 La partie conception.....	32
II.3.3.1 Les principales étapes de conception.....	33
II.3.3.2 Définition des pièces à réaliser.....	33

II.3.3.3 Le dessin des pièces en 3D.....	33
II.3.3.4 La mise en plan des dessins.....	33

Chapitre III : ANALYSE DE FABRICATION

III.1 Méthodologie.....	34
III.1.1 Principe de la méthode développée.....	34
III.1.1.1 Repérages des surfaces.....	34
III.1.1.2 Tableau des opérations élémentaires.....	35
III.1.1.3 Tableau des groupements évidents d'exécution	35
III.1.1.4 Tableau des contraintes d'antériorité.....	35
III.1.1.5 Tableau des niveaux.....	35
III.1.1.6 Tableau des groupements de hase.....	35
III.1.1.7 Le projet de gamme.....	36
III.1.2 Simulation d'usinage.....	36
III.1.2.1 Calcul des surépaisseurs d'usinage.....	36
III.1.2.1.a Copeau minimum.....	36
III.1.2.1.b Tolérances économiques.....	37
III.1.3 Choix des machines.....	37
III.1.4 Choix des outils de coupe.....	37
III.1.5 Choix des conditions coupe.....	38
III.1.5.1 Les efforts de coupe.....	39
III.1.5.2 Puissance absorbée.....	39
III.1.5.3 Pression spécifique de coupe K_s	39
III.1.5.4 Les facteurs d'influence.....	40
III.1.6 La programmation.....	40
III.1.6.1 Définition.....	40
III.1.6.2 La préparation du travail.....	41
III.2 La gamme d'usinage de l'axe de rotation.....	42

III.2.1 Inventaire des surfaces.....	42
III.2.2 Les sous graph des conditions du B.D.E.....	42
III.2.3 Tableau d'analyse des contraintes d'antériorité	43
III.2.4 Ordre chronologique des OE.....	43
III.2.5 Dictionnaire des précédents.....	43
III.2.6 La gamme d'usinage.....	45
III.2.7 Contra de phase détaillée.....	47
III.3 Programme de l'axe sur MOCN.....	48
<i>Chapitre IV : ETUDE EXPERIMENTALE</i>	
IV.1 Introduction.....	52
IV.2 Machine d'essai utilisée.....	52
IV.3 Les éprouvettes utilisées pour les essais.....	53
IV.4 Résultats des essais.....	54
Conclusion générale.....	57
Bibliographié.	

Liste des figures

Figure I.1 : Machine d'impact de Russell [Russell, 1898].....	4
Figure I.2 : Différents types d'éprouvettes entaillées utilisés par Russell [Russell, 1898]....	4
Figure I.3 : Mouton-pendule de Charpy, puissance 30 kgm [Charpy, 1904].....	5
Figure I.4 : Essai Charpy en coirs de réalisation.....	6
Figure I.5 : Principe du mouton FREMONT.....	7
Figure I.6 : Principe du Mouton Charpy.....	8
Figure I.7 : Gabarit pour mesurer la distance entre appuis.....	10
Figure I.8 : Pendule Izod.....	11
Figure I.9 : Volant porte un couteau fixe.....	12
Figure I.10 : Volant porte un couteau fixe.....	12
Figure I.11 : Différent type de barreau d'éprouve.....	13
Figure I.12 : Zone d'irrregularités.....	14
Figure I.13 : Variation de travail de rupture en fonction de dimension de l'éprouvette.....	16
Figure I.14 : Variation de travail de rupture en fonction de largeur de l'éprouvette.....	17
Figure I.15 : La courbe des résiliences en fonction de la largeur.....	18
Figure I.16 : La résilience d'un acier en fonction du diamètre du fond de l'entaille.....	19
Figure I.17 : La courbe du volume déformé fonction du diamètre du fond de l'entaille...	22
Figure I.18 : La courbe du volume déformé fonction du largeur de l'éprouvette.....	22
Figure I.19 : La courbe du travail de rupture en fonction du rayon du fond de l'entaille.....	22
Figure I.20 : La courbe de la résilience en fonction de la température.....	28
Figure I.21 : Les courbes de la résilience en fonction de la température pour de nombreux aciers.....	29 31
Figure II.1 : Composants de mouton-pendule.....	33
Figure II.2 : Axe de rotation.....	33
Figure II.3 : Bras.....	33
Figure III.1 : Schéma directeur de la méthode développée de traitement de gammes d'usinage.....	34
Figure IV.1 : Le mouton de Charpy.....	52
Figure IV.2 : Appui de l'éprouvette vue d'en haut.....	52
Figure IV.3 : Eprouvette d'essai avec entaille en V.....	53
Figure IV.4 Eprouvette d'essai avec trou de serrure.....	53

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Les valeurs indicatives du copeau minimal cpm.....	37
Tableau III.2 : Les valeurs indicatives des tolérances économiques.....	37
Tableau III.3 : Valeurs indicatives des vitesses de coupe.....	39
Tableau III.4 : Valeurs indicatives de K.....	39
Tableau III.5 : Conditions de coupe.....	39
Tableau III.6 : Pression spécifique de coupe.....	40
Tableau III.7 : Vitesses de coupe.....	41
Tableau IV.1 : Composition chimique de l'acier C35.....	54
Tableau IV.2 : Caractéristiques mécaniques de l'acier C35.....	54
Tableau IV.3 : Composition chimique de l'acier A60.....	54
Tableau IV.4 : Caractéristiques mécaniques de l'acier A60.....	54
Tableau IV.5 : résultat de l'essai.....	55
Tableau IV.6 : résultat de l'essai.....	56

Introduction Générale

Introduction générale

L'utilisation des aciers et des alliages métalliques s'est développée d'une manière considérable durant la seconde moitié du 19^{ème} siècle. Avec cet essor, s'est révélé un nombre considérable d'accidents et des ruptures brutales.

L'existence des défauts dans la matière (inclusions, imperfections, lacunes et dislocations) constitue des zones de contraintes pouvant provoquer la rupture prématurée des pièces.

Les essais mécaniques sont essentiels pour la connaissance du comportement des matériaux. Les essais peuvent être classés en essais statiques ou dynamiques. Parmi ces derniers, nous distinguons les essais par choc.

Les essais par choc pour des pièces entaillées tel qu'ils sont pratiqués jusqu'à nos jours sont dus à Charpy [Pluvinage] [1]. L'essai permet de mesurer la résilience ou capacité à résister au choc. Grâce à cet essai, les matériaux peuvent être classés par famille distinguant les matériaux ayant une faible ou forte résilience.

Des nombreuses études ont été menées pour mettre en évidence l'influence de certains paramètres. Riabov et al. [2] mettent en évidence l'effet des basses températures sur la résilience. La transition ductile-fragile en travaillant sur l'influence de la température sur des entailles en V tronqué ont été menés par Lucon [3] avec un dispositif instrumenté. L'effet de la géométrie est considéré par Benzerga et al. [4].

Les travaux cités ci-dessus montrent que les essais de résilience continuent d'intéresser les chercheurs.

Au sein de notre laboratoire de génie mécanique de l'école nationale polytechnique, il existe plusieurs machines en panne. La réparation de celles-ci est une nécessité pour rendre notre laboratoire opérationnel.

Dans notre travail nous avons diagnostiqué l'état du « Mouton-pendule » en panne depuis plusieurs années. Pour sa remise en marche, nous avons conçu et réalisé différentes pièces. Après sa remise en marche, des essais de résilience ont été menés sur des éprouvettes entaillées.

Dans le but de faciliter au lecteur la compréhension de notre étude, notre travail a été partagé en quatre chapitres, à savoir :

Un premier chapitre qui traite des essais de résilience et qui fait le point sur un certain nombre de facteurs d'influences.

Introduction générale

Le second chapitre présente en s'appuyant sur la description des problèmes posés, les solutions proposées pour la machine à réparer.

Le troisième chapitre, elle est consacrée à l'analyse de fabrication des pièces et leurs gammes d'usinage.

Nous terminerons par une étude expérimentale. Nous y exposons le déroulement de l'expérience. Nous présentons, les résultats des essais sur des éprouvettes entaillées en acier au carbone XC38 et A60 pour valider le dispositif.

Enfin, une conclusion synthétise les différentes étapes du travail.

Chapitre I

L'essai de résilience

I.1 Introduction

L'obtention d'une grandeur caractéristique de la résistance à la propagation d'un défaut, telle que la ténacité, à partir de l'essai Charpy, est à l'origine de la plupart des études consacrées à cet essai. Le passage résilience ténacité nécessite une bonne connaissance des champs mécaniques locaux présents en fond d'entaille. Les expérimentateurs n'ont pas attendu le développement de moyens numériques puissants pour proposer des corrélations empiriques entre la résilience et la ténacité. Quelques-unes de ces corrélations sont présentées, en précisant leur domaine de validité. Les expressions analytiques permettant de décrire l'état de contrainte en avant d'une entaille sont ensuite brièvement exposées.

I.2 Bref historique

L'emploi de la dénomination mouton Charpy ou essai Charpy est aujourd'hui associé à un test mécanique courant et dont, l'usage tant au niveau de la machine d'essai que de l'éprouvette utilisée, est décrit par des normes spécifiques. Ce test met en œuvre un mouton-pendule qui sollicite par choc un barreau entaillé afin de provoquer sa rupture. La grandeur résultante de cet essai est la résilience et correspond à une quantité d'énergie absorbée par centimètre carré de section. L'association du nom de G. Charpy à cet essai mécanique vient probablement des efforts que celui-ci a déployés pour développer ce test tant au niveau industriel, comme test de réception. Qu'au niveau des laboratoires pour obtenir une norme d'évaluation de la résistance des métaux à la rupture par choc.

L'utilisation du principe d'une sollicitation par choc d'un barreau est née de l'incapacité des essais usuels (traction) à révéler la fragilité de certains aciers (aciers doux). La réalisation de ce type d'essai à l'aide d'un mouton-pendule est rapportée pour la première fois par Russel [7], [5], [6]. Sa machine d'essai étant probablement l'ancêtre du mouton-pendule Charpy actuel (**fig. I.1**). Pour un historique plus complet sur l'évolution de l'essai Charpy on pourra se reporter utilement à l'article récent écrit par Siewert, et al [6] à l'occasion de la conférence organisée par l'ASTM en 1999. Dans son exposé, Russel dresse un bilan de 700 essais effectués à l'aide d'une machine d'impact créée en 1896. De nombreux points y sont abordés, tels que l'énergie consommée par la déformation des appuis, l'inertie de l'éprouvette, le frottement. . . Lors de ces essais, Russel ne présente pas l'entaille comme un paramètre déterminant pour révéler la résistance au choc des métaux, il utilise une entaille (ou plusieurs) (**fig. I.2**) lorsque le matériau est très résistant et refuse de rompre sous la sollicitation d'un marteau (notamment le bois et les métaux très ductiles).

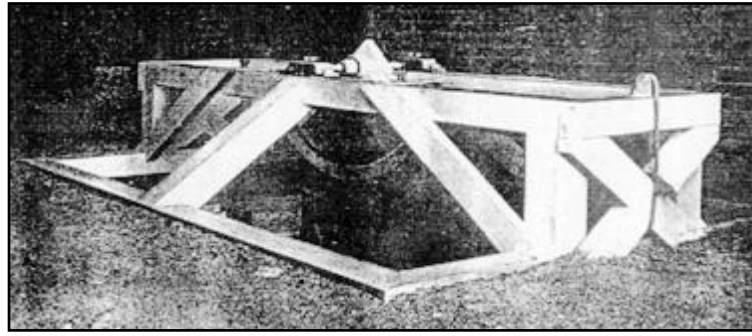


Fig. I.1 : Machine d'impact de Russell [7].

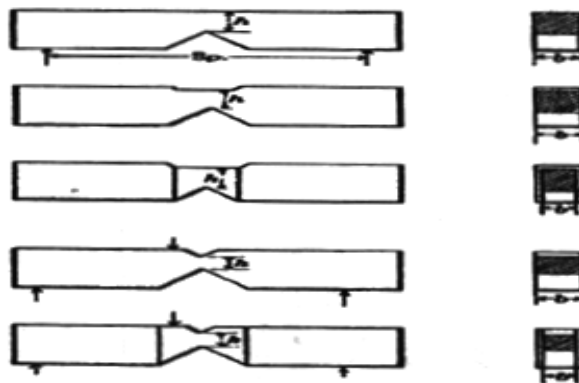


Fig. I.2: Différents types d'éprouvettes entaillées utilisés par Russell [7].

La discussion de ces travaux par la communauté scientifique souligne la nouveauté et l'importance de ce nouveau moyen d'essai mais critique vivement l'utilisation d'une entaille et du terme résilience pour exprimer les résultats de ces expériences. En revanche, G. Charpy, dans sa communication de 1901 [8], en présentant les différents essais mécaniques par choc existants, souligne l'importance de l'utilisation de l'entaille sur les barreaux sollicités par choc. L'utilisation de l'entaille n'est pas alors une innovation, puisque elle a été introduite depuis 1892 sous l'impulsion d'André Le Chatelier. A. Le Chatelier décrit un barreau, entaillé à l'aide d'un trait de scie, sollicité par un mouton tombant verticalement. L'importance de l'entaille dans les résultats de l'essai de recette est soulignée par G. Charpy qui propose alors une méthode reproductible de réalisation de l'entaille. Au-delà de la mise en place d'un essai de recette comparatif, l'obtention d'une valeur numérique pour caractériser le travail absorbé par la rupture conduit G. Charpy à associer le mouton pendule et le barreau entaillé pour obtenir une grandeur permettant de classer les métaux et qu'il présente également sous la dénomination de résilience en ces termes : « Nous appellerons résilience d'un métal la résistance vive à la rupture d'une tranche élémentaire infiniment mince, ou le travail nécessaire pour produire cette rupture exprimé en kilogrammètre par centimètre carré de section ».

C'est ensuite un travail rigoureux d'étude des paramètres pouvant influencer les valeurs de résilience obtenues et de définition d'un mode opératoire qui est effectué par Charpy (forme de l'entaille, vitesse d'impact,...). Il présente alors deux moutons pendule qu'il a réalisés et qui sont issus de ce travail [9], dont l'un est très proche de celui utilisé actuellement (**fig. I.3**). C'est dans cette dernière publication, que Charpy souligne que la résilience est la somme des travaux nécessaires à la flexion et à la rupture de l'éprouvette, précurseur en cela des travaux ultérieurs qui chercheront à obtenir de la résilience une donnée caractérisant uniquement la résistance à la rupture des métaux. Pour palier cet inconvénient, il préconise alors l'emploi d'une entaille aigüe qui permet de diminuer le travail de flexion en localisant plus vite la déformation.

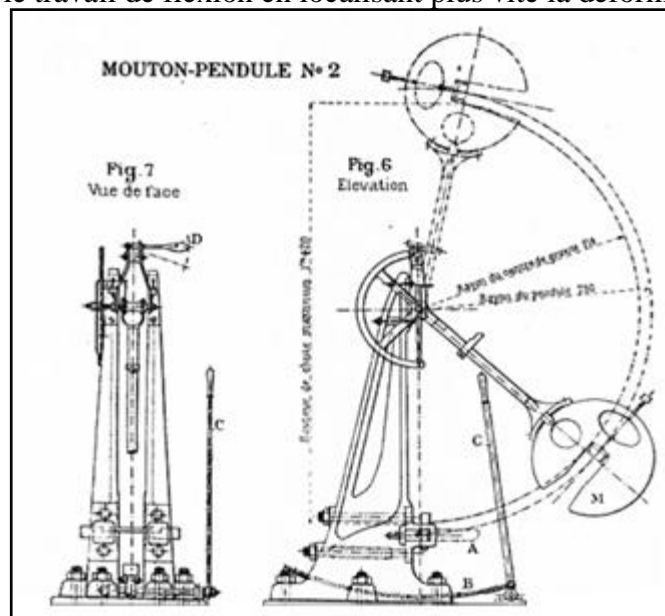


Fig. I.3 : Mouton-pendule de Charpy, puissance 30 kgm [9]

En 1912, le Congrès de New York de l'Association Internationale pour l'Essai des Matériaux désignait le pendule Charpy comme le type des appareils de choc et recommandait son emploi dans tous les laboratoires. Cet essai apparaît également dans le cahier des charges relatif aux fournitures d'aciers en barres rédigé par la Commission permanente de standardisation en 1919. Il s'impose alors aux métallurgistes, comme un outil indispensable pour révéler la fragilité de certains métaux. On peut ainsi lire dans la notice présentant le mouton Charpy fabriqué à la compagnie des forges de Chatillon, Commentry et Neuves Maisons : « C'est que, seule [la méthode utilisant, le mouton Charpy] elle met en évidence la fragilité des métaux, alors que toutes les autres méthodes usuelles, actuellement pratiquées, sont inopérantes à ce point de vue ». Cet essai est toujours, à l'heure actuelle largement utilisé par les métallurgistes.

Durant cette période, un effort important est alors consacré à la comparabilité des essais de résilience obtenus dans les différents laboratoires [6]. Ce travail, qui est encore d'actualité, a donné lieu à l'établissement de plusieurs normes. On retiendra la norme américaine ASTM E23 [ASTM, 1992] et la norme européenne sous la dénomination française NF EN 10045 1 et 10045 2 [10], [11]. On notera ici que la différence entre ces deux normes réside essentiellement dans le rayon du couteau du marteau qui est de 8mm pour la norme E23 et de 2 mm pour la norme NF.

I.3 Définition et principe de l'essai de résilience

Le but de l'essai de flexion par choc Charpy est de mesurer la résistance d'un métal à une sollicitation dynamique. Pour cela, une éprouvette entaillée est posée sur deux appuis et est rompue sous l'action du marteau d'un pendule qui vient la solliciter en son centre sur la face opposée à celle de l'entaille (**fig. I.4**). La grandeur obtenue est une énergie qui est la différence entre les énergies initiale et finale du pendule. Après correction des pertes dues au frottement, on obtient l'énergie nécessaire à la déformation et à la rupture de l'éprouvette, W , dont on déduit la résilience KCV ou KCU , qui est l'énergie à rupture, W , divisée par la section nominale au droit de l'entaille, cette grandeur s'exprime en Joules par cm^2 . La résilience n'est pas une grandeur intrinsèque au matériau et va dépendre, entre autre, de la géométrie de l'entaille. Deux types d'entailles sont normalisés, dites en U et en V. Cependant l'entaille en V est le plus couramment utilisée pour tester les aciers de structure ferritique.

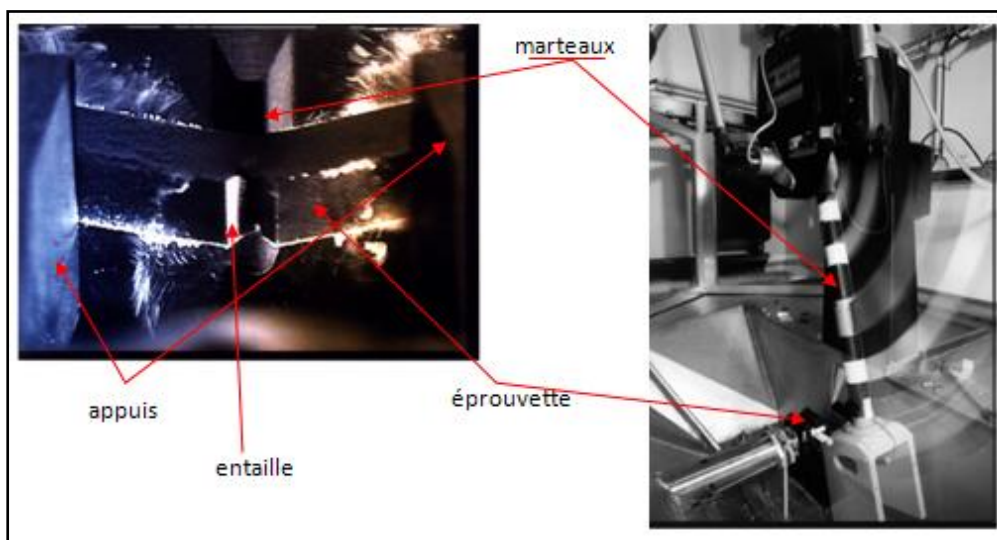


Fig. I.4 : Essai Charpy en cours de réalisation. Le marteau vient frapper l'éprouvette en son centre sur la face opposée à l'entaille.

I.4 Machines d'essais

Ces appareils peuvent être classés en trois groupes :

- A) Les moutons verticaux (*Frémont, Amsler*);
- B) Les moutons pendulaires (*Charpy, Izod, Olsen*);
- C) Les moutons rotatifs (*Guillery*)

➤ Les Moutons verticaux

Le principe du mouton vertical au point de vue de sa construction, ce mouton se compose de deux parties essentielles : une chabotte en fonte, ancrée sur un bloc de béton coulé dans le sol, et deux guides verticaux de la masse tombante, qui sont fixés à la paroi du local d'essai par l'intermédiaire des supports. Les guides peuvent glisser dans leurs supports de façon à permettre un remplacement facile d'une masse tombante par une autre.

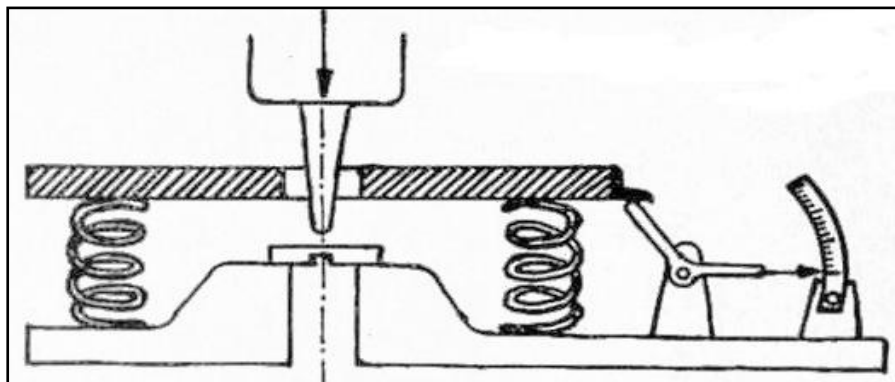


Fig. I.5 Principe du mouton **FREMONT**

Cette masse est soulevée dans les guides à l'aide d'un treuil qui peut être manœuvré soit à la main, soit à l'aide d'un petit moteur électrique. Un index donne à chaque instant la hauteur de la masse tombante.

Pour laisser tomber la masse, on provoque le déclic de son crochet de suspension. Le barreau d'épreuve est placé sur une enclume fixée sur la chabotte. L'énergie restante après la rupture peut être mesurée à l'aide de crushers ou de ressorts étalonnés.

La maison Amsler a établi un mouton où l'énergie résiduelle est enregistrée par un dispositif qui consiste en deux cylindres verticaux mis en communication par un tuyau et contenant chacun un piston intérieur qui joue sans frottements. Les parties supérieures de ces pistons émergent des cylindres. Sur le piston du premier cylindre repose une calotte qui épouse

exactement la forme du poinçon qui se trouve à la partie inférieure de la masse tombante et sur laquelle la masse vient frapper après avoir rompu le barreau. Sur le piston du deuxième cylindre repose une masse, dite « masse témoin », guidée par une tige verticale enfilée dans son évidement central. Le choc est transmis par l'huile au piston du deuxième cylindre, qui projette en haut la masse témoin, entraînant un anneau à frottement doux qui indique la hauteur maximum atteinte. Cette hauteur est évidemment proportionnelle à l'énergie restante, donc on n'a eu qu'à graduer convenablement la tige verticale pour avoir un appareil à lecture directe. On contrôle facilement la graduation en laissant tomber le mouton à vide. L'énergie de chute $W = Ph$ kgm doit alors être celle indiquée par la masse témoin.

Le mouton vertical Amsler permet de mettre en jeu une forte énergie (200 kgm.). Or, comme, pour des raisons que nous verrons par la suite, on tend actuellement à employer de petits barreaux, l'emploi de ce mouton vertical destiné à de grosses éprouvettes ou pièces est assez restreint dans les laboratoires.

➤ Le mouton pendulaire de Charpy

Le mouton pendulaire de Charpy (fig. I.6) est le plus souvent employé à l'heure actuelle. Nous allons en exposer le principe.

Soient d la distance du centre gravité du pendule au centre des pivotements, α l'angle de chute, β l'angle de remontée et P poids du pendule.

En écrivant que le travail absorbé par la rupture du barreau est égal à la différence entre l'énergie de chute et celle de remontée, il vient :

$$W = Pd(1 - \cos \alpha) - Pd(1 - \cos \beta)$$

$$\text{Soit encore : } W = Pd(\cos \beta - \cos \alpha)$$

Dans les essais courants, on ne fait jamais varier α ; il est donc facile de dresser un tableau donnant les énergies absorbées par rupteur du barreau en fonction de l'angle de remontée β . Dans ce calcul, nous n'avons pas tenu compte des

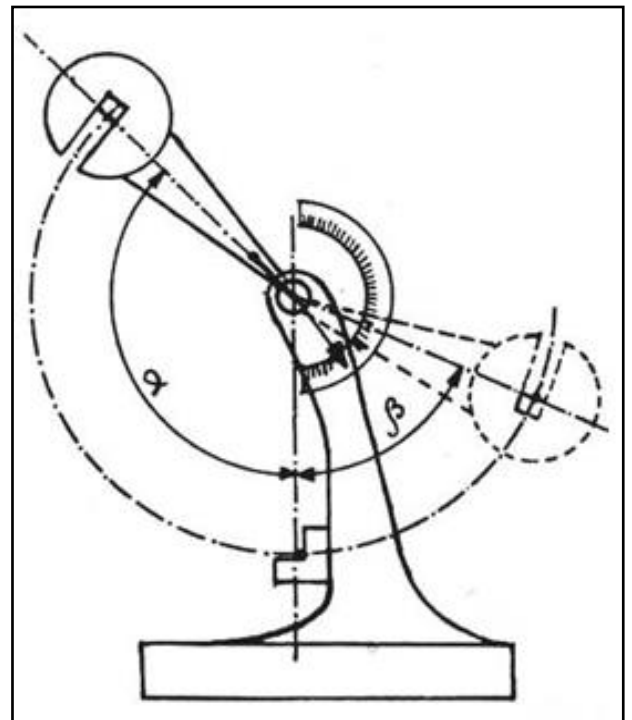
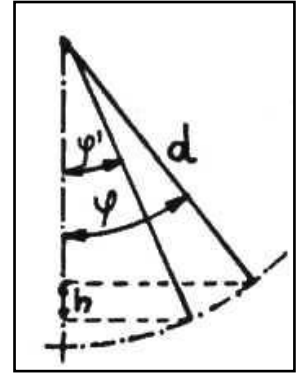


Fig. I.6 Principe du Mouton Charpy.

pertes d'énergie dues aux frottements dans les paliers et à la résistance de l'air, ainsi qu'à la projection des fragments du barreau après la rupture. Il est très facile de les évaluer.

En effet, abandonnons librement le pendule à partir de sa position initiale. En désignant par φ et φ' les angles qui correspondent à $(2n-1)^\circ$ et $(2n+1)^\circ$ oscillation simple (**figure ci-contre**), $h = d(\cos \varphi' - \cos \varphi)$ représente la perte de hauteur due aux frottements mécaniques et à la résistance de l'air pour une double oscillation d'amplitude $2(\varphi+\varphi')$. La perte de hauteur correspondante à une remontée ou descente, soit à une demi oscillation simple d'amplitude $(\varphi+\varphi')/2$ sera donc $h/4$.



Par conséquent, l'énergie perdue par les frottements mécaniques et par la résistance de l'air est $Ph/4$ pour une remontée (ou descente) de l'angle $(\varphi+\varphi')/2$. On porte ensuite en abscisses les diverses valeurs de $(\varphi+\varphi')/2$ et en ordonnées $\frac{Pd}{4}(\cos \varphi' - \cos \varphi)$. Sur la courbe ainsi obtenue, on relève directement l'énergie perdue a_{ch} correspondante à l'angle de chute α , et a_r relative à l'angle de remontée β .

Pour évaluer le travail a_p absorbé par la projection des fragments de barreau, admettons que la vitesse de projection est celle restante V du centre du couteau après rupture. On a alors : $a_p = \frac{p}{2g} V^2$, où p représente le poids du barreau.

Afin d'évaluer V , supposons nulles les pertes dues à la résistance de l'air et aux frottements mécanique. Soient, d'autre part :

l- la longueur du pendule simple synchrone ;

v- la vitesse du point pesant au moment où il passe par la verticale avant de remonter de l'angle β ;

R – le rayon du milieu du couteau.

$$\text{On a alors : } \vartheta = \sqrt{2gl(1 - \cos\beta)} \quad \text{et : } V = \vartheta \times \frac{R}{l} = R \sqrt{\frac{2g}{l}(1 - \cos\beta)}$$

$$\text{Donc finalement : } a_p = \frac{pR^2}{l}(1 - \cos\beta).$$

On trace facilement a_p en fonction de l'angle de remontée β . Donc en négligeant, en raison de construction, l'énergie absorbée par le couteau et par les appuis, on a comme expression exacte du travail absorbé par la rupture d'un barreau:

$$W = Pd (\cos\beta - \cos\alpha) - (a_{ch} + a_r + a_p)$$

Expression où tous les facteurs sont déterminés. La facilité de manœuvre et la précision de mesure constituent les grands avantages du mouton pendulaire. Il est facile à vérifier: il suffit de l'abandonner librement; l'angle de remontée doit être alors égal à celui de chute, compte tenu de la correction due aux frottements.

La construction de cet appareil est très simple. Il est constitué par une tige oscillant autour d'un axe horizontal et portant une masse échancrée formant couteau. Dans la position d'équilibre, le nez du couteau doit juste venir effleurer la face de l'éprouvette opposée à l'entaille et qui subit le choc. Un gabarit permet de vérifier la distance entre appuis, qui est bien déterminée pour chaque type de mouton, et de régler le barreau de façon à ce que l'orifice cylindrique de l'entaille soit exactement inscrit dans la petite fenêtre à (**fig. I.7**).

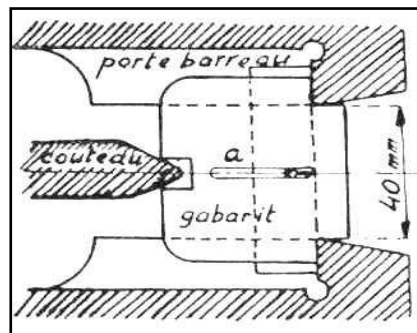


Fig.I.7 Gabarit pour mesurer la distance entre appuis.

A la remontée, une tige coudée solidaire de la masse tombante entraîne une aiguille qui indique l'angle maximum atteint. On construit plusieurs modèles de pendule Charpy, Suivent les dimensions des barreaux d'épreuve.

A titre d'indication, nous donnons les caractéristiques du mouton pendule petit modèle qui est de beaucoup le plus employé actuellement.

En Angleterre, on emploie presque exclusivement le mouton pendulaire *Izod* (**fig. I.8**); en Amérique, à côté des pendules *Charpy* et *Izod*, on utilise encore l'appareil *Olsen*. Ces machines diffèrent, un peu du mouton *Charpy*. L'éprouvette n'est plus posée sur deux appuis, mais encastrée jusqu'à l'entaille dans étau constitué par deux blocs d'acier boulonnés sur la base. Ce dispositif a surtout l'inconvénient de limiter l'angle de plie à 90°.

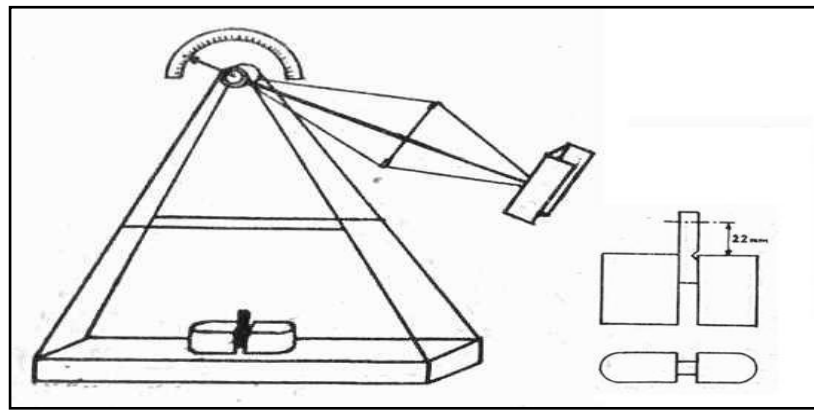


Fig. I.8 : Pendule Izod

Position de l'éprouvette dans l'étau.

➤ Les moutons rotatifs

Dans le mouton rotatif de M. Guillery, l'énergie est emmagasinée dans un volant massif qui porte un couteau à sa périphérie et qui, tournant à la vitesse de 302 t/m., possède l'énergie de 60 kgm.

La vitesse linéaire du couteau est alors celle d'un corps tombant, de 4m de hauteur ; donc le volant peut être assimilé à un mouton ordinaire de 15 kgs tombant de 4 m. Un tachymètre, constitué par une petite turbine, élève l'eau dans un tube gradué proportionnellement au carré de la vitesse, et comme l'énergie emmagasinée dans le volant varie suivant la même loi, on peut graduer directement le tube en kgm.

La différence entre les niveaux avant et après la rupture du barreau indique le travail absorbé par celle-ci.

Le volant est manœuvré à main, à l'aide d'une manivelle. Les moutons rotatifs se divisent en deux classes :

a) Le volant porte un couteau fixe, et l'éprouvette est placée sur un support qu'on fait approcher du couteau au moment de la rupture : c'est le mouton rotatif à plate-forme mobile (**fig. I.9**).

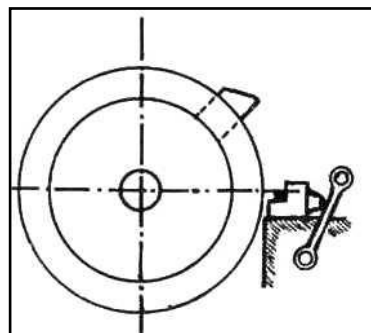


Fig. I.9 Volant porte un couteau fixe.

b) La plate-forme portant l'épreuve est fixe; par contre le couteau est mobile. Pendant la rotation il est enclenché. Pour obtenir cet effet, il suffit d'appuyer sur le bouton A (**fig. I.10**) qui glisse sur la came aa' solidaire du couteau, la fait rentrer et arrêter par le déclic d. On pose alors le barreau E sur les appuis distants de 40 mm comme dans le mouton Charpy petit modèle, et lorsque la vitesse du volant est suffisante, on appuie sur le bouton D. Ce bouton frotte sur une came solidaire du déclic d. qui s'écarte et libère le couteau.

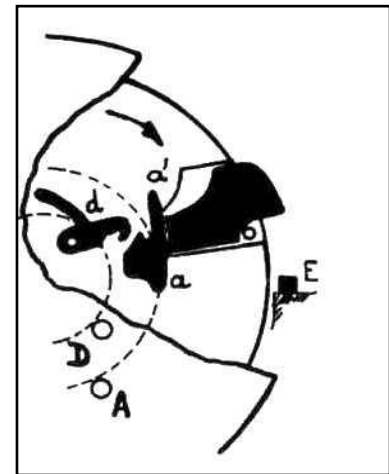


Fig. I.10 Volant porte un couteau fixe.

Le couteau, sous l'action de la force centrifuge, glisse sur sa coulisse et prend la position pour la rupture du barreau. L'appareil est entièrement blindé, une porte est aménagée de façon à permettre de poser le barreau sur l'enclume. Un dispositif de sécurité empêche d'ouvrir cette porte quand le volant est en mouvement et que le couteau n'est pas enclenché.

Ce mouton présente l'avantage d'être peu encombrant, facile à manier et de ne pas projeter des fragments de barreaux après la rupture. Il est toutefois moins à contrôler que le mouton de Charpy.

I.5 Les barreaux de résilience employés actuellement

L'influence des dimensions de l'éprouvette et de la forme de l'entaille sur la résilience est très grande, de sorte que la valeur numérique n'a un sens que si le barreau d'essai est bien défini. Ceci étant encore vrai pour un certain nombre d'autres facteurs, on voit combien serait avantageuse une mise au point de l'essai de résilience qui permettrait la comparaison des résultats.

Malheureusement, à l'heure actuelle, malgré les travaux des Congrès internationaux, la question n'est pas encore résolue, de sorte que les barreaux employés varient non seulement d'un pays à l'autre [12], mais souvent les grandes maisons de constructions adoptent des types de barreaux qui ne sont pas officiellement reconnus (**fig. I.11**).

Toutefois, on tend à abandonner les gros barreaux qui, outre la grande dépense de métal, présentent l'énorme inconvénient de mal se prêter au contrôle des pièces de petites dimensions.

En France, à côté de l'éprouvette de la Commission Permanente de Standardisation, on emploie surtout celle de *Mesnager*, adoptée également par l'Italie.

En Angleterre on se sert presque exclusivement de l'éprouvette *Izod*; en Allemagne, plusieurs types de barreaux sont employés, mais d'après les derniers travaux des Commissions réunies des sidérurgistes et des consommateurs, l'éprouvette normale est de 100x10x10 mm., avec entaille soit ronde de 2 mm sur 3mm de profondeur, soit aigüe à 45°, de même profondeur dans le cas de métaux particulièrement tenaces.

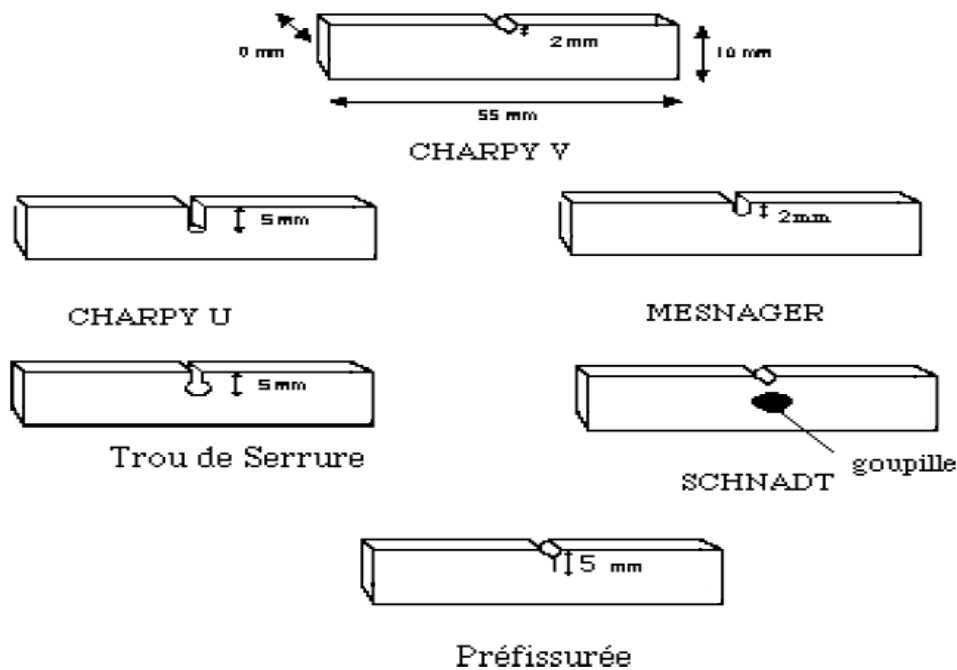


Fig. I.11 Différent type de barreau d'éprouve.

I.6 Zone critique de la résilience

On a remarqué parfois que deux éprouvettes pratiquement identiques du même métal, dans des conditions d'essai identiques, accusaient des valeurs de résilience tout à fait discordantes, de sorte que le métal semblait, sans raison apparente, tantôt fragile, tantôt résilient.

On peut donc admettre que chaque facteur qui influence la valeur de la résilience possède une valeur dangereuse pour laquelle le métal se trouve dans une zone de diminution de la résilience (fig. I.12). Il s'agit donc de déterminer la position et les limites de cette zone, car il est évident que la valeur numérique de la résilience n'a pas de

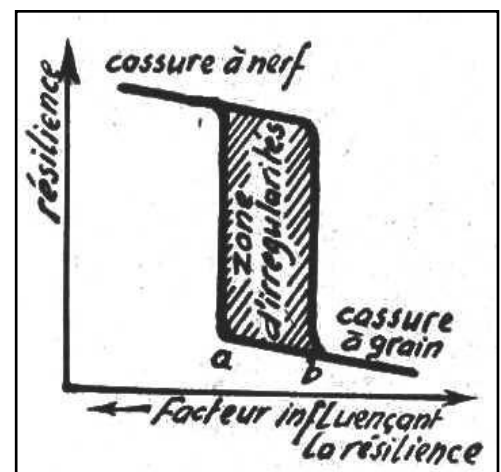


Fig. I.12 Zone d'irrégularités.

sens quand la valeur du facteur influençant l'essai est comprise entre les points **a** et **b** de la **fig. I.12**.

En rapportant la résilience trouvée pour un métal quelconque la courbe normale, nous pourrions reconnaître (la striction de ce métal à l'état recuit étant connue) si et jusqu'à quel point le métal se trouve dans une zone de décroissance de la résilience [13]. Toutefois, à l'heure actuelle, on dispose encore de trop peu de données avec la machine d'essai, le mode d'entaillage et la température d'essai.

I.7 Influence de divers facteur sur les résultats de l'essai de fragilité

Nous allons donc étudier l'influence de divers facteurs sur les résultats de l'essai de fragilité. Nous les grouperons de la façon suivante:

- Influence de l'éprouvette.
 - a) Dimensions de l'éprouvette.
 - b) Profondeur, acuité de l'entaille et mode d'entaillage.
- Influence de la machine d'essai.
 - a) Type de la machine.
 - b) Vitesse d'essai.
- Influence des conditions d'essai.
 - a)Température d'essai.

I.7.1 Influence des dimensions de l'éprouvette sur la résilience

M. Reillon, en 1909, dans une note présentée à l'Association internationale pour les Essais des Matériaux, formula la loi de similitude d'après laquelle le travail de rupture rapporté à l'unité de surface de la section entaillée est le même pour deux éprouvettes de même métal géométriquement semblables. Le Congrès de Copenhague, influencé par cette idée, adopta les deux éprouvettes Charpy : la grosse, de 160 x 30 x 30 mm., avec entaille cylindrique de 4 mm., de diamètre à mi-épaisseur, et la petite, de 53,3 x 10 x 10 mm, avec entaille semblable à la précédente de 4/3mm, de diamètre. Mais les études faites immédiatement après ont montré que la loi de similitude n'était pas vérifiée. On continua néanmoins à chercher les conditions dans lesquelles elle serait applicable. Ainsi, le capitaine Mimey [14] pensa que si les masses des moutons étaient M_1 et M_2 , les hauteurs de chute H_1 et H_2 et les distances d'appui D_1 et D_2 , de sorte qu'on ait :

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{H_1}{H_2} = \frac{D_1}{D_2} = \alpha$$

Les travaux de rupture des éprouvettes semblables, dont α serait le rapport de similitude, seraient entre eux comme les cubes des dimensions correspondantes. Mais les travaux de MM. Charpy et A. Cornu-Thénard n'ont pas confirmé cette hypothèse.

Nous avons vu les formules empiriques que suggéra *M. Unwin* dans la discussion du rapport de 1918 de la British Engineering Standards Association. L'auteur remarque d'ailleurs que la loi de similitude lui semble inapplicable à l'essai de choc, car la distribution des efforts varie pendant l'essai, et qu'un volume restreint seulement participe à la déformation.

En effet, *M. A. Cornu-Thénard* constate que les travaux de rupture, ainsi que ceux de déformation ou de fissilité rapportés à la section entaillée ne vérifient pas, même de loin, la loi de similitude. Ceci concerne aussi bien les métaux traités que recuits; seul l'acier extra-doux à gros grain semblait obéir à cette loi.

La loi de similitude ayant été reconnue inapplicable tant que le travail de rupture était rapporté à la section entaillée, certains auteurs ont cherché à le rapporter d'abord au volume de l'éprouvette, puis au volume déformé. Leurs recherches, qui ne pouvaient aboutir, ont cependant conduit à un bien meilleur connaissance de l'essai.

MM. Th. Stanton et *R. Ratson* [15] remarquent que, quand les dimensions linéaires augmentent, le travail de rupture rapporté à l'unité de volume de l'éprouvette tend vers une valeur limite variable avec la nature du métal et la forme de l'entaille (**fig. I.13**). Les essais portaient sur des aciers à 0,19 % et à 0,49 % de C, ainsi que sur un fer de Yorkshire. D'autre part, les auteurs ont étudié l'influence de la largeur de l'éprouvette sur la résilience, les autres dimensions restant constantes. Or, ils ont trouvé que le travail total de rupture restait sensiblement le même pour les éprouvettes de 15 et de 30 mm, de largeur, bien que la section de rupture soit doublée.

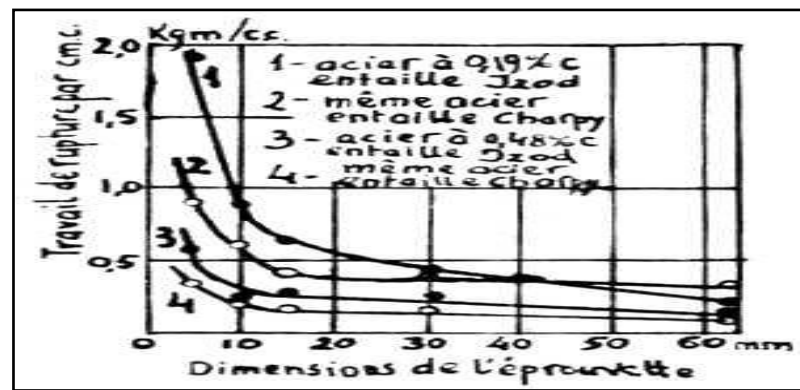


Fig. I.13 Variation de travail de rupture en fonction de dimension de l'éprouvette.

D'autre part, pour les éprouvettes étroites, les résultats étaient très incertains, mais en moyenne la résilience était supérieure à celle trouvée avec les éprouvettes larges. La cassure est en général fibreuse pour les barreaux étroits, mixte pour les carrés et à grain pour les larges.

M. Moser [16] a étudié tout particulièrement l'influence de la largeur de l'éprouvette sur la résilience. L'éprouvette employée était du type Charpy, cassée au mouton pendule Charpy. L'auteur a étudié les aciers suivants : aciers à 0,35 ; 0,43 et 0,7 % de C recuits et à 0,12 % de C et à 4,85 % de Ni régénéré. Les résultats sont résumés graphiquement dans la **fig. I.14**. On voit que, sauf pour l'acier au nickel régénéré, la résilience n'est pas proportionnelle à la largeur et diminue à partir d'une certaine largeur variable avec la nature du métal. Par contre, le travail de rupture rapporté au volume déformé a été trouvé constant et indépendant de la largeur de l'éprouvette. Comme nous l'avons vu, ceci n'est d'ailleurs pas vrai pour tous les métaux, mais a conduit l'auteur à interpréter d'une façon nouvelle l'essai de fragilité.

En étudiant la variation du volume déformé en fonction de la largeur de l'éprouvette (**fig. I.14**), il a constaté que chaque courbe admet d'abord une partie rectiligne passant par l'origine, et comme, chose curieuse, toutes ces parties rectilignes coïncident quelle que soit la nature de l'acier, *M. Moser* a conclu à l'existence d'une caractéristique de volume déformé du métal.

Tant que l'éprouvette reste assez étroite, l'augmentation locale de tensions résultant de la présence de l'entaille se compense par la contraction latérale. Mais à partir d'une certaine largeur, la lenteur de déformation du métal empêche cette compensation et le volume, qui participe à la déformation, diminue. Il importe donc de préciser cette largeur critique : d'où la notion de « vitesse de travail ».

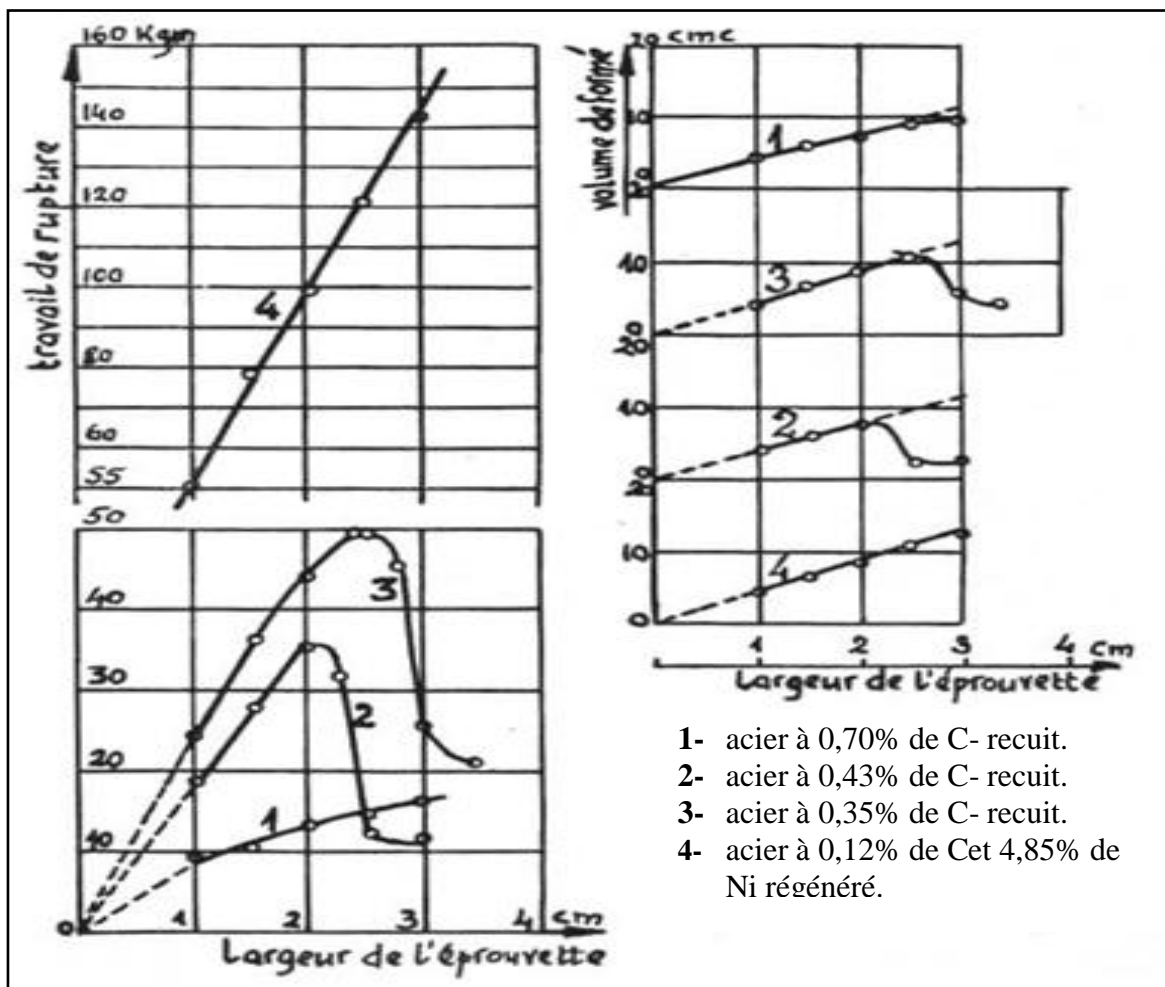


Fig. I.14 Variation de travail de rupture en fonction de largeur de l'éprouvette.

M. Moser [17], en reprenant l'étude de la loi de similitude, est arrivé à, admettre son existence sous les réserves suivantes :

1°- Le diamètre de l'entaille doit rester le même (donc il n'y a plus, à proprement parler, de similitude géométrique);

2°- Le rapport de similitude doit être tel que le métal de l'éprouvette, dans les conditions d'essai considérées, fournisse le maximum de volume déformé.

Ceci résulte bien de sa théorie, car, comme nous l'avons vu, quand le maximum de volume déformé est atteint, ces volumes, et par conséquent la résilience, sont proportionnels à la largeur de l'éprouvette; il faut évidemment garder le même diamètre d'entaille, sans quoi la droite des volumes déformés changerait d'inclinaison.

Moser a vérifié cette hypothèse dans le cas particulier d'un acier à 0,3 % de C. Il a découpé des éprouvettes de section carrée, et dont les dimensions variaient de 2 en 2mm, depuis 10 x 10 jusqu'à 30 x 30 mm. L'entaille était cylindrique avec un diamètre du fond de 4 mm. La vitesse

de choc et la distance des appuis restaient les mêmes. La relation entre les travaux de rupture et la section utile a été trouvée pratiquement linéaire.

Toutefois, ces essais, si intéressants et instructifs qu'ils soient, ne rendent pas compte de la généralité des phénomènes. En effet, quand on fait varier la largeur de l'éprouvette, tous les autres facteurs de l'essai restant les mêmes, on constate le plus souvent l'existence d'une zone d'irrégularité.

M. Stribeck [18] a tout particulièrement étudié la question (fig. I.15). Si on représente la courbe des résiliences en fonction de la largeur de l'éprouvette, on voit qu'elle se compose de deux branches, et que la branche supérieure est liée à celle inférieure non pas par une ligne, mais par une zone, comme l'a montré encore *Baumann* en 1912. L'auteur en déduit que la largeur de l'éprouvette étant fixée par l'épaisseur de la tôle à essayer, il importe de donner à l'éprouvette une hauteur convenable, de façon à ne pas tomber dans la zone d'irrégularités.

Les travaux de *M. Mailander* [19] ont confirmé l'existence de la zone. L'auteur a encore étudié l'influence qu'exercent sur la zone les différents facteurs. Il trouve que la zone correspond une largeur d'éprouvette d'autant plus grande que la température d'essai est plus élevée et la vitesse d'essai plus petite. En dehors de la zone, les travaux de rupture seraient sensiblement proportionnels à la largeur; toutefois, le coefficient de proportionnalité n'est pas le même avant et après la zone.

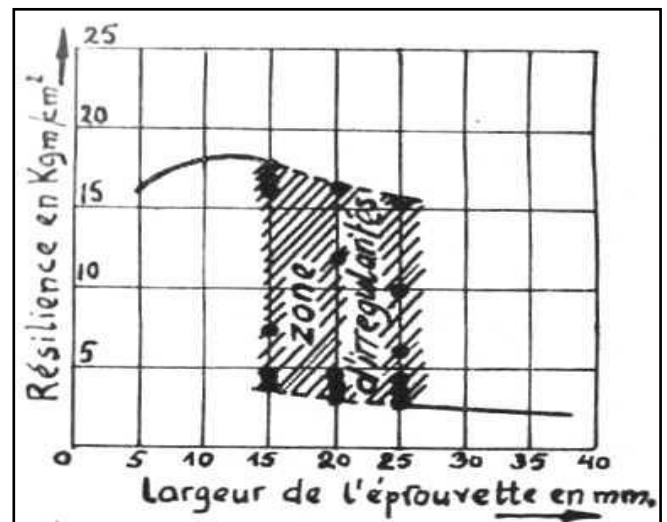


Fig. I.15 La courbe des résiliences en fonction de la largeur

La zone correspond à des éprouvettes plus larges pour l'acier traité que pour l'acier recuit de même avec l'entaille ronde, la zone se manifeste sur des barreaux plus larges qu'avec l'entaille aiguë. En fin, plus l'éprouvette est large, plus la température à laquelle subsiste la fragilité trouvée à froid est élevée.

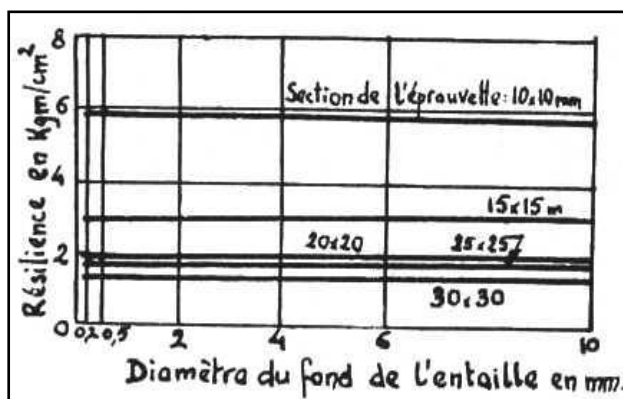
M. Bondolfi [20] a remarqué que l'énergie absorbée par la rupture d'un barreau *Mesnager* augmente considérablement quand on perce perpendiculairement à l'entaille des trous qui

diminuent la section de l'entaille. Un autre fait paradoxal, c'est la diminution de l'énergie totale absorbée à partir d'une certaine section quand on fait croître cette section.

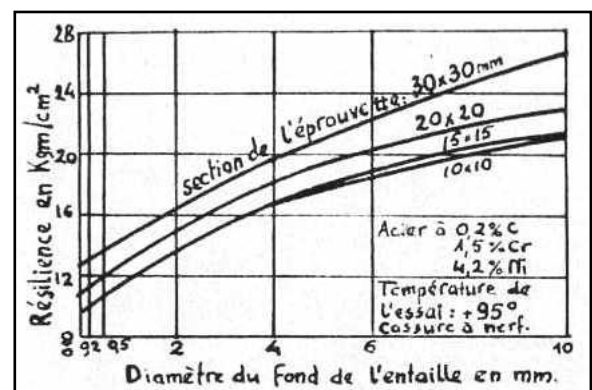
Malgré leur apparence paradoxale, ces résultats confirment également l'existence de la zone. Nous reviendrons plus loin sur l'explication détaillée de ces essais.

Il s'agissait donc de vérifier la théorie de *Moser* en faisant une distinction entre les cassures à grain et à nerf.

M. Mailänder [21] a entrepris des essais dans ce sens. Afin d'obtenir les deux genres de cassures, *Mailänder* a effectué des essais respectivement aux températures de -70° et $+95^{\circ}$. Les éprouvettes rompues à $+20^{\circ}$ accusaient une cassure mixte. Or, il a trouvé que pour les cassures à grain (aciers fragiles), les courbes représentant la résilience en fonction du diamètre de l'entaille sont des droites sensiblement parallèles quand on fait varier les dimensions de l'éprouvette (**fig. I.16**). La résilience d'un acier fragile est donc indépendante du diamètre du fond de l'entaille et elle diminue quand la grandeur de l'éprouvette augmente.



Température de l'essai : -70° ; cassures à grain.



Température de l'essai : -70° ; cassures à nerf.

Fig. I.16 La résilience d'un acier en fonction du diamètre du fond de l'entaille

Pour des cassures à nerf, la résilience augmente avec la grandeur de l'éprouvette (**fig. I.16**), et cela d'autant plus que le métal est plus tenace et quand l'entaille varie proportionnellement aux dimensions. Si on maintient constant le rayon du fond de l'entaille, la profondeur seule étant proportionnelle aux dimensions, le travail de rupture augmente peu avec les dimensions, et si l'entaille reste toujours la même, le travail de rupture rapporté à la section entaillée est pratiquement constant.

Donc, dans le cas des cassures à grain, les règles de *Moser* sont en défaut. En effet, *Moser* opérait sur des métaux trop bons pour que les résultats trouvés puissent être applicables aux cassures cristallines. La distinction faite par *Mailänder* est donc très importante, d'autant plus

que ce sont les phénomènes concernant la cassure à grain qu'on cherche à mettre en évidence afin de pouvoir déterminer les conditions dans lesquelles une rupture fragile peut avoir lieu. Tous ces essais concernaient de grandes éprouvettes.

D'après *MM. Sauerwald et Vieland [16]*, qui ont effectué des essais sur des éprouvettes en alliages divers, il faut faire une distinction entre les grandes et petites éprouvettes. Pour ces dernières, le travail absorbé varie le plus souvent proportionnellement à la largeur, de même que le volume déformé, mais ici encore une séparation entre les deux modes de cassures s'imposerait; toutefois elle n'a pas été faite par les auteurs.

I.7.2 Influence de l'entaille sur la résilience

M. Barba [22] a particulièrement étudié l'influence de la profondeur de l'entaille sur la résilience. Il estime qu'une profondeur minimum est nécessaire pour localiser la déformation et la détermine en admettant que, quand la section entaillée se rompt par flexion, la section normale arrive à sa limite d'élasticité. On en déduit que la hauteur minimum au droit de l'entaille doit être $h' = 0,7 h$, h représentant la hauteur du barreau. Une entaille peu profonde donne un travail de rupture trop grand pour les métaux résilients et, d'autre part, crée des irrégularités dans les travaux de rupture, comme l'a remarqué *M. H. Le Chatelier [22]*.

M. Schule a confirmé la condition de *M. Barba*. Il considère en effet que la concentration des tensions dues à l'entaille est maximum pour $h' = 0,7 h$, de sorte qu'il n'y a pas d'intérêt à augmenter la profondeur de l'entaille au delà de $0,3h$. Le rayon de courbure au fond de l'entaille a une très grande influence sur la résilience. *M. Barba [2]* estime que l'acuité de l'entaille détermine la longueur de la fibre extrême soumise à la tension, et par conséquent est un facteur beaucoup plus important que la profondeur. Plus le rayon du fond de l'entaille est petit, plus les métaux se révèlent, fragiles, toutes choses égales d'ailleurs.

M. A. Cornu-Thénard, en étudiant l'influence du diamètre de l'entaille sur la fragilité des barreaux $53,3 \times 10 \times 10$ mm, entaillés mi-épaisseur, a conclu qu'on peut choisir indifféremment pour les essais courants un diamètre au fond de l'entaille compris entre 1,3mm et 4 mm, on ne ferait que déplacer le zéro de l'échelle, le classement des métaux les uns par rapport aux autres ne se trouverait pas modifié. Toutefois, l'influence du diamètre de l'entaille est nette sur les résultats numériques. Quand il varie de 1,3 mm., à 4mm., la résilience augmente de 30 % environ pour les métaux recuits, de 20 % environ pour les métaux traités, mais elle reste sensiblement constante pour un acier à 3 % de Si, très fragile. Seul l'acier extra-doux cristallisé à gros grains

présente une anomalie. Il se révèle très fragile pour $d = 1,3$ mm, car $\rho = 0,83 \pm 0,19 \text{ kg/cm}^3$, et résilient pour $d = 4$ mm., ρ étant $5,94 \pm 0,40 \text{ kg/cm}^3$. Ce cas particulier, qui n'est certainement pas isolé, conduit à éliminer un trop grand rayon du fond de l'entaille.

L'auteur a encore comparé les effets des entailles différentes sur des barreaux identiques du même métal. Il trouve que les entailles Charpy et Izod donnent des résultats plus réguliers et révèlent mieux la fragilité que les entailles Frémont et Mesnager.

L'introduction en 1920 du barreau normal U. F. a rendu nécessaires des essais comparatifs de façon à pouvoir trouver une relation entre les chiffres de résilience obtenus, d'une part, avec le barreau normal et, d'autre part, celui de Mesnager, qui était le plus souvent employé auparavant.

D'après *M. L. Guillet* [23], l'éprouvette U. F. casse plus souvent que celle de Mesnager et donne des chiffres inférieurs aux chiffres Mesnager et un peu supérieurs aux chiffres Charpy, surtout pour des métaux résilients. Pour des aciers fragiles, les chiffres sont sensiblement les mêmes. Le classement réciproque des métaux n'est pas changé.

D'après *M. Legrand* [23], les éprouvettes U. F. casseraient moins souvent que les éprouvettes Mesnager (résultats non confirmés). Le chiffre U. F. serait, en général plus faible que celui Mesnager, sans que le classement des métaux soit changé.

MM. Stanton et Batson ont trouvé pour un barreau de $53,3 \times 10 \times 10$ mm, en acier à 0,65% de C une variation linéaire entre le travail de rupture et le rayon du fond de l'entaille. Le travail absorbé atteindrait une valeur minimum différente de zéro pour une entaille aussi aigüe que possible.

MM. Graeves et Moore [24], en opérant sur de petites éprouvettes en acier au Ni et au Ni-Cr, ont trouvé que l'éprouvette Charpy révèle mieux la fragilité que celle de Mesnager, moins bien toutefois qu'une éprouvette à entaille aigüe. Un arrondi au fond de l'entaille réduirait considérablement la possibilité de distinction entre métaux fragiles et résilients, Plus l'entaille est aigüe, plus l'essai est net. Un accroissement du rayon du fond de l'entaille amène une augmentation de l'énergie absorbée.

D'après Moser [16], la courbe du volume déformé, et par suite du travail absorbé en fonction du diamètre du fond de l'entaille, affecterait l'allure de la courbe de magnétisme passant

par l'origine et tendant asymptotiquement vers la résilience du barreau non entaillé. Donc le travail absorbé serait nul pour une entaille parfaitement aigüe (fig. I.17). Cette assertion n'est pas absolument exacte, comme nous le montrerons plus loin.

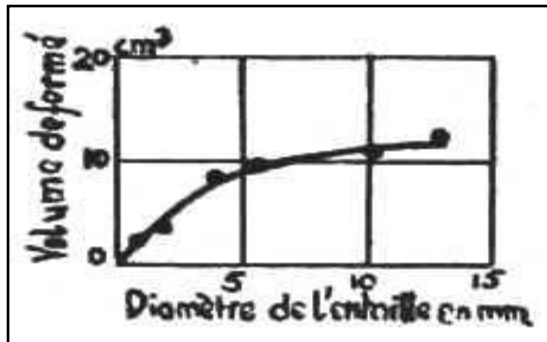


Fig. I.17 La courbe du volume déformé fonction du diamètre du fond de l'entaille

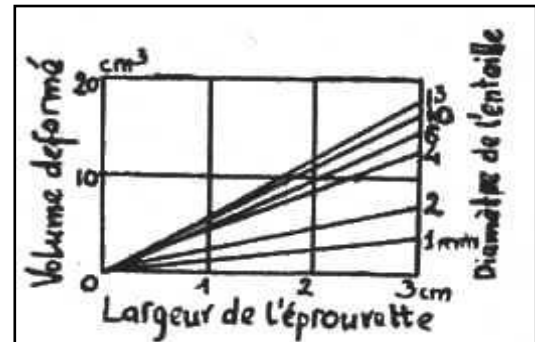


Fig. I.18 La courbe du volume déformé fonction du largeur de l'éprouvette

D'autre part, l'entaille concentre la déformation sur un volume déterminé qui augmente avec le rayon du fond de l'entaille. La figure I.18 représente les variations du volume déformé maximum en fonction de la largeur de l'éprouvette quand le diamètre de l'entaille varie.

M. Stribeck considère que l'entaille cylindrique n'est pas propre pour mettre en évidence la fragilité. L'entaille aiguë devrait, être adoptée, un acier réellement résilient exigeant un fort travail de rupture aussi bien avec l'entaille aiguë qu'avec l'entaille cylindrique. D'après l'examen des nombreuses cassures, l'auteur constate que le métal, au voisinage de la cassure, ne subit pas ou presque pas de déformation, et sa résilience, quand l'entaille est aiguë, est toujours faible, tandis qu'elle est parfois bonne avec l'entaille cylindrique.

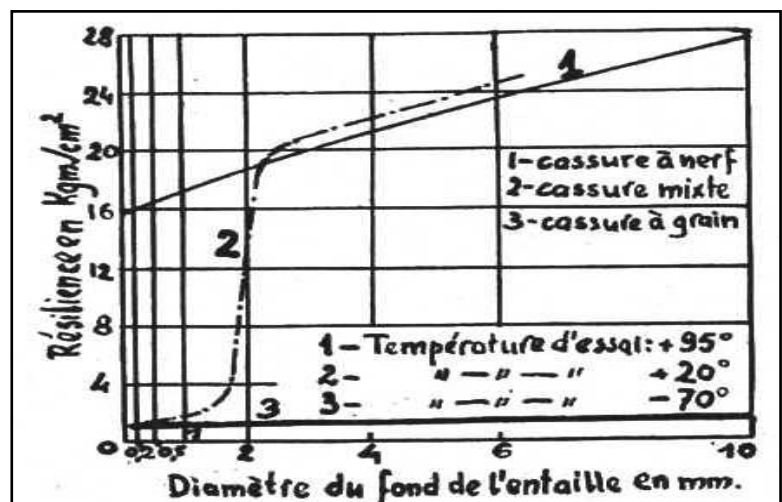


Fig. I.19 La courbe du travail de rupture en fonction du rayon du fond de l'entaille

M. Mailander [21] a, montré que la courbe du travail de rupture en fonction du rayon du fond de l'entaille est variable suivant le genre de cassure (figs. I.16 et I.19). Comme nous l'avons vu, pratiquement le rayon du fond de l'entaille n'a pas d'influence dans le cas des cassures à grain; le travail absorbé augmente avec le rayon quand la cassure est à nerf, mais la variation est surtout sensible dans le cas de la cassure mixte. On passe en effet, dans ce dernier

cas, d'un genre de cassure à l'autre quand le rayon de l'entaille varie de 0,5 à 1mm. Donc, pour un diamètre de l'entaille inférieur à 2 mm, le volume déformé ne correspond plus au volume déformé maximum, relatif à l'éprouvette essayée.

Dans tous les essais qui précèdent, l'éprouvette était entaillée du côté de la tension. Mais on cherchait depuis longtemps si un entaillage auxiliaire du côté de la compression ou même sur tout le pourtour de l'éprouvette, comme l'a fait encore *M Auscher*, ne mettrait pas mieux en évidence la fragilité.

MM. Saniter et Baker [25] suggèrent une éprouvette entaillée sur trois faces, sauf celle de la compression. Ils l'ont comparée à une éprouvette entaillée de la même façon du côté de la tension seulement, la même section utile étant conservée. Or, pour l'acier brut de laminage donnant 32 kg/mm^2 à la rupture à la traction avec une striction de 76,1. %, l'éprouvette de dimensions $10 \times 10 \times 60 \text{ mm}$, entaillée du côté de la tension a donné une résilience de $7,33 \text{ kgm/cm}^2$, tandis que celle de dimensions $10 \times 14 \times 60$, entaillée sur trois faces, n'a accusé que $2,17 \text{ kgm/cm}^2$. D'autres aciers trempés, et trempés et revenus, ont donné de bons chiffres dans les deux cas, toutefois la résilience était moindre pour l'éprouvette entaillée sur les trois faces. Les aciers fragiles ont donné sensiblement le même chiffre dans les deux cas. Donc ce nouveau mode d'entaillage se prêterait mieux pour révéler la fragilité. Toutefois les nouvelles éprouvettes, pas plus que les anciennes, n'ont vérifié la loi de similitude.

M. Kunze a repris l'étude de l'influence du mode d'entaillage sur la résilience. Il estime que les éprouvettes devraient être entaillées également du côté de la compression pour ne pas amener de rupture prématurée sous l'action de l'inégalité de tensions dans la zone de traction et dans celle de compression. Les essais comparatifs effectués par l'auteur, qui a tracé des courbes de la résilience pour un acier doux en fonction de la température de revenu pour trois modes d'entaillage, ont montré qu'on constate des irrégularités en employant les éprouvettes entaillées seulement du côté de la tension. L'éprouvette à entaille double du côté de la compression et de la tension donne des résultats plus réguliers, mais les meilleurs résultats ont été obtenus avec de petites éprouvettes rondes de 4,8 mm, de diamètre à entaille circulaire. Toutefois la question ne semble pas être encore suffisamment étudiée à l'heure actuelle.

I.7.3 Influence de la machine d'essai sur la fragilité

La valeur de la résilience n'est pas la même quand on casse des éprouvettes identiques avec des moutons différents. C'est pourquoi il est bon de ne comparer que des résultats trouvés avec des machines d'essai identiques. Ainsi *M. Guillet* remarque que le mouton rotatif fournit des chiffres supérieurs à ceux du mouton pendule. *M. Guillet* explique la différence par l'inégalité des vitesses d'impact des deux machines; pourtant une variation de vitesse de 5,00m. (Mouton Charpy) à 8,62m. (Mouton Guillery) ne devrait pas, à moins d'un cas spécial, influencer sensiblement les résultats de l'essai.

Le poids du marteau frappant, l'acuité du couteau, la distance entre appuis, ainsi que leur forme, etc., ont une influence sur la résilience. Cette influence varie d'ailleurs suivant la nature du métal. Ainsi tous ces facteurs doivent être rigoureusement identiques si on veut pouvoir comparer les résultats, car on ne connaît pas les lois de la variation de la résilience en fonction de ces facteurs.

I.7.4 Influence de la vitesse de choc sur la fragilité

La vitesse a été d'abord considérée comme le facteur le plus important pour mettre en évidence la fragilité. Nous avons vu, en effet, que *Considère* [22] a décelé la fragilité à partir d'une vitesse dangereuse. Toutefois les travaux ultérieurs de *frémont* [22] et de *Charpy* [22] ont montré que souvent le travail reste du même ordre de grandeur dans un essai statique et dans un essai de choc. Depuis, la question a été particulièrement étudiée par M.A.Cornu-Thenard (loc. cit) pour les aciers traités, la résilience baisse de 5 à 20%, suivant l'acier, quand la vitesse d'impact varie de 9m/s à 60mm/h., pour les aciers recuits, l'influence de la vitesse change de sens : le travail absorbé dans l'essai statique est supérieur au travail de choc. Toutefois, le classement réciproque des métaux resta la même avec les deux modes d'essai, et comme l'essai statique présente l'avantage d'enregistrement facile du diagramme des efforts en fonction des flèches, on pourrait songer à substituer l'essai statique à l'essai au choc pour révéler la fragilité. Mais des essais pareils effectués sur l'acier extra-doux cristallisé à gros grain ont montré que cet acier est très sensible à la variation de la vitesse d'essai. En effet, la résilience est devenue deux fois plus grande quand la vitesse passe de 8,82m/s à 2,70m/s et quatre fois plus grande quand l'essai est fait par flexion lente. L'existence de cette exception -et il peut y en avoir d'autres- suffit donc, d'après l'auteur, pour imposer l'emploi de l'essai au choc pour déceler la fragilité, et même on doit employer la vitesse maximum dont le mouton est capable.

MM. sir R. Hadfield et Sidney Main [26] ont cherché l'effet de très grandes vitesses sur la fragilité. Le choc était produit par une balle de fusil ; on obtenait ainsi des vitesses pouvant aller jusqu'à 900m/s., le barreau employé était du type Frémont. Des éprouvettes identiques ont été ensuite essayées au mouton Frémont et les résultats concordaient en général, quoique les vitesses de choc fussent beaucoup plus grandes avec la balle de fusil. Les éprouvettes entaillées en acier doux surchauffé se sont révélées fragiles, mais à la vitesse de 560m/s, même les barreaux non entaillés de ce métal se rompaient en accusant la cassure fragile. D'autre part, le même acier doux convenablement traité a accusé une bonne résilience, même aux très grandes vitesses.

MM. Stanton et Batson ont effectué des essais sur des barreaux de 10 x 10 x 53,3 mm., avec entaille Izod. La vitesse de choc variait de 2,97 m/s jusqu'à 14 m/s. Ils constatent que l'influence de la vitesse est essentiellement variable suivant la nature du métal. Quand la vitesse augmente, les travaux absorbés, ou bien augmentent comme pour certains aciers au Ni Cr, ou bien diminuent comme pour certains aciers doux. Pour l'acier à 0,19 % C, les auteurs ont remarqué des irrégularités : à la vitesse de 14 m/s, la résilience était tantôt égale celle qui correspond aux faibles vitesses, tantôt elle diminuait considérablement.

Les auteurs estiment que le facteur de l'échelle des vitesses doit être déterminé si on veut pouvoir interpréter les résultats de l'essai, mais, d'autre part, une entaille suffisamment profonde rend faible dans beaucoup de cas l'influence de la vitesse.

Toutefois, comme ils ont pu constater que parfois le travail absorbé reste constant quand la vitesse varie, mais que les déformations produites sont différentes, ils estiment que, dans ce cas, la résistance du métal varie avec la vitesse de déformation.

Or, *M. Moser* [16], en faisant diminuer la vitesse de choc de l'éprouvette à 0,43 % C, est arrivé à faire participer à la déformation le volume maximum. Les courbes de la **fig. I.14**, n° 2, relatives à ce métal sont devenues des droites. Nous avons vu comment l'auteur a été conduit à définir la «vitesse de travail » propre du métal. L'allure des courbes des travaux absorbés et des volumes déformés en fonction de la largeur de l'éprouvette (**fig. I.14**) dépend du rapport de la vitesse de choc à la vitesse de travail propre. Mais il faut signaler que pour l'acier à 0,7 % de C, la diminution de la vitesse de choc n'a donné aucun résultat. Cet acier n'étant pas ductile, *Moser* en a conclu que la variation de la vitesse d'impact, dans les limites que permettent les appareils d'essai, n'influence pas la résilience des aciers non ductiles.

Donc pour les corps qui se déforment rapidement (grande «vitesse de travail »), le maximum de volume déformé peut être atteint même quand la vitesse de choc est très grande; par contre, le temps disponible ne sera pas suffisant dans le cas de corps à faible «vitesse de travail ». Nous avons vu comment *Moser* a calculé cette grandeur et quelles sont les conclusions pratiques qu'on a pu en déduire (p. ex. choix d'un métal à grande «vitesse de travail» quand on a à craindre des chocs brusques).

M. Stribeck croit à une zone de dispersion due à la vitesse d'impacts étant donné qu'une variation de vitesse déterminée n'agit pas toujours dans le même sens.

M. Petrenko a trouvé que, à l'exception de certains aciers, les travaux de rupture dans l'essai statique sont en général inférieurs aux travaux absorbés dans l'essai de choc.

M. Doherty trouve les mêmes résultats et les explique en admettant qu'une partie de l'énergie du pendule est dissipée sous forme de vibrations dans le cas d'un essai de choc.

M. Yamada [27] a constaté que pour l'acier à 0,1 % de C, trempé et revenu, l'effort maximum et le travail absorbé croissent rapidement avec la vitesse d'essai, tandis que pour les aciers à 0,3 % de C, recuits ou trempés et revenus, l'effet de la vitesse ne se fait presque pas sentir. L'auteur énonce qu'étant donné qu'il faut un certain temps pour déformer l'éprouvette, un effort plus grand est nécessaire pour produire cette déformation plus rapidement. Donc l'éprouvette peut supporter un effort plus grand lors d'une déformation rapide que lors d'une déformation lente. Mais quand la déformation progresse, l'écrouissage croît davantage quand la déformation est lente que quand elle est rapide. Ces deux effets de durée et d'écrouissage superposés décideraient de l'influence de la vitesse sur le chiffre de la résilience.

I.7.5 Influence de la température d'essai sur la résilience

L'influence de la température d'essai a été remarquée dès la découverte de l'essai de fragilité. Ainsi *M. Considere* et surtout *M.A. Le Chatelier* [22] ont constaté la disparition de fragilité de l'acier doux vers 100°. Vers des températures plus élevées, la fragilité réapparaît.

MM. L. Guillet et *L. Revillon* [28] ont mis au point une méthode de mesure précise de la température d'essai. L'éprouvette, préalablement chauffée, était placée sur l'enclume. On mesurait la température à l'aide d'un couple thermoélectrique qui était introduit dans une ouverture spéciale. Quand la déviation du galvanomètre atteignait son maximum qui indiquait la température de l'éprouvette, on laissait tomber le mouton.

D'après cette méthode, *MM. Guillet et Bernard (Comptes rendus de l'Académie des Sciences, OLVI, 1899)* ont étudié la résilience du cuivre aux températures élevées. Ils ont constaté que la fragilité augmentait linéairement au fur et à mesure que la température d'essai allait en croissant.

M. P. Chevenard [29], en étudiant les ferro-nickels résilients à très basses températures, a trouvé que la fragilité à froid est propre au fer, qu'il soit à l'état γ ou α ; par contre, le nickel et les ferro-nickels, à une teneur en Ni supérieure à 40 %, conservaient leur grande résilience, même à -190° . L'auteur a employé l'éprouvette Frémont cassée au mouton vertical Frémont.

Les essais étaient effectués aux températures de $+20^\circ$, -79° et -190° . En sortant l'éprouvette du mélange de neige carbonique et d'acétone (-79°), on prenait soin de conserver la couche pâteuse du mélange autour de l'éprouvette. La température se maintenait ainsi jusqu'au moment du choc. Mais l'éprouvette immergée dans l'azote liquide contenu dans un vase de Dewar, à peine sortie du bain se réchauffait sensiblement. On opérait très rapidement, de sorte que depuis la sortie de l'éprouvette de son bain jusqu'au moment du choc il ne s'écoulait que 5 secondes. Les mesures effectuées l'aide de couples thermoélectriques ont permis d'évaluer à environ 3 % le gain de température pendant ce temps.

MM. Guillet et Cournot [30] ont particulièrement étudié la fragilité aux basses températures. Les auteurs employaient l'éprouvette Mesnager cassée au mouton Guillery. Les températures d'essais ont été $+20^\circ$ (ambiante), -20° (mélange de glace et de chlorure de calcium.), -80° (neige carbonique) et -190° (air liquide). Les **figures I.22, a, b, c, et d** résument les résultats. Il est facile de remarquer la grande fragilité du fer et des aciers aux basses températures. Les auteurs attribuent la chute de la résilience dès qu'on passe au-dessous de 0° à l'influence prépondérante de la ferrite. Par contre, le cuivre, l'aluminium, le nickel et les ferro-nickels riches en Ni conservent leur résilience même aux très basses températures.

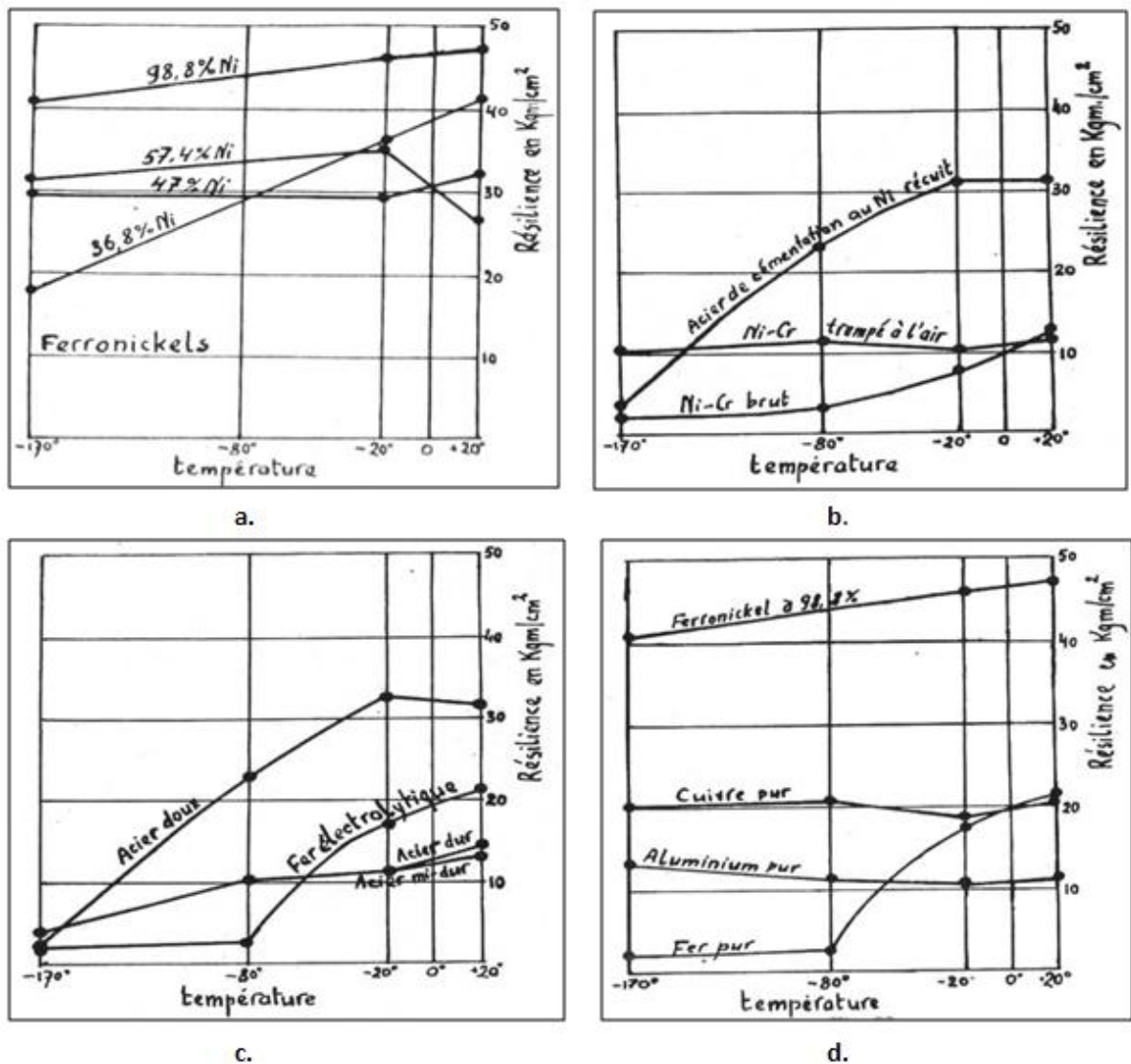
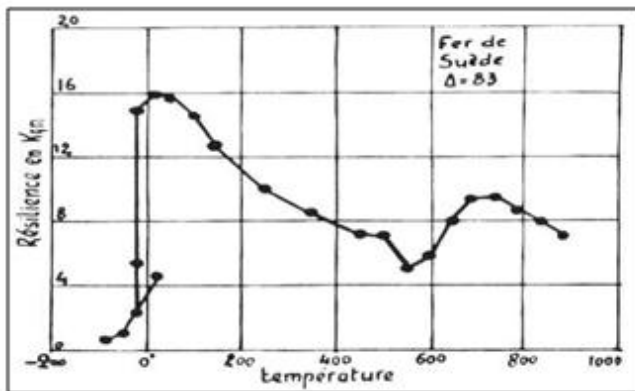


Fig. I.21 La courbe de la résilience en fonction de la température

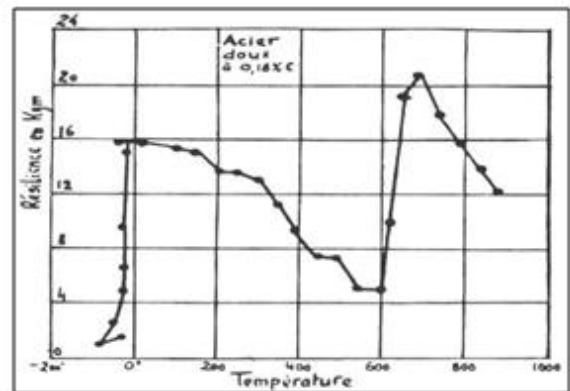
MM. Graeves et Jones [31] ont étudié la fragilité du fer et de l'acier dans l'intervalle de -80° jusqu'à $+1000^{\circ}$. Le barreau employé était de $10 \times 10 \times 60$ mm., avec entaille Izod, cassé au mouton Charpy de 30 kgm. Les températures d'essais ont été obtenues à l'aide des bains suivants : -80° : éther et CO_2 solide en excès; -80° à -20° : éther et CO_2 solide; -20° à 0° : glace et sel; 0° : glace fondante; de la température ambiante à 100° : eau; 120° à 250° : bain d'huile; 250° à 650° : bain de nitrates fondus; 650° à 1000° : moufle électrique. On retirait rapidement les éprouvettes du bain et les posait sur l'enclume; toutefois pour les températures supérieures à 700° , on tenait compte du refroidissement.

Les auteurs ont, tracé les courbes de la résilience en fonction de la température pour de nombreux aciers traités de diverses façons. Les courbes présentaient en générale deux maxima

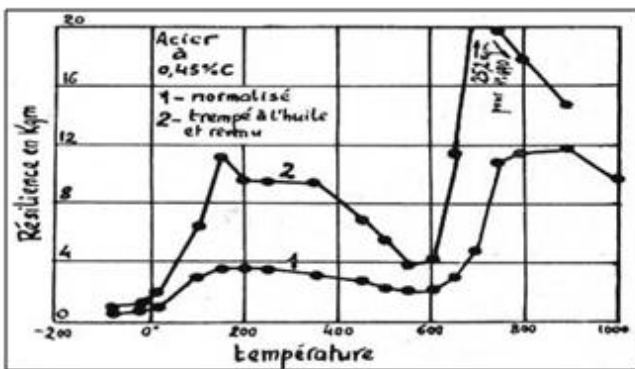
(figs. I.25, a, b, c, d et e), dont le premier se produit vers 200-250° pour les aciers spéciaux et les aciers au carbone traités et vers 100-150° pour les aciers au carbone non traités.



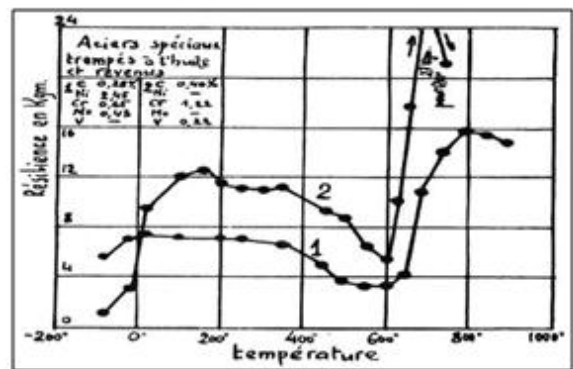
a.



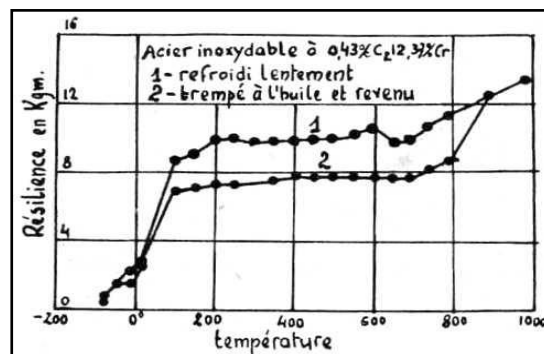
b.



c.



d.



e.

Fig. I.21 Les courbes de la résilience en fonction de la température pour de nombreux aciers.

Vers 500-650°, on observe un minimum de résilience (sauf pour acier inoxydable à 12,37% de Cr et 0,43% de C) suivi d'un second maximum au-dessus de 650°. En ce qui concerne la résilience aux basses températures, les plus résilients seraient les aciers spéciaux à faible teneur en carbone.

Chapitre II

CONCEPTION DES PIÈCE DU PENDULE

I.1 La machine d'essai de flexion par choc

II.1.1 Présentation de la machine

La mouton pendule est destinée à faire les essais de résilience. L'essai consiste à rompre, par choc, une éprouvette de taille 55x10x10 présentant des entailles en U ou V.

Le mouton est de type **Trayvou N° NC 2114** ;

- Capacité 300 J ;
- Poids du marteaux $P = 22,7\text{kg}$;
- Rayon de centre de gravité $R_{\text{CDG}} = 693\text{mm}$;
- Rayon de pendule $R = 750\text{ mm}$;
- Essais à température ambiante.

II.1.2 Principe de fonctionnement de la machine de flexion par choc

Le pendule est soulevé à une hauteur désirée. Le pendule peut être maintenu dans cette position grâce à un doigt d'accrochage. Il est libéré en actionnant celui-ci. Le pendule, sous l'action de son propre poids, vient frapper l'éprouvette disposée sur ses appuis. Après rupture de l'éprouvette, le pendule remonte à une hauteur qui est mesurée par un quadrant gradué. L'énergie de rupture peut être calculée en faisant le bilan énergétique (énergie de rupture U).

La machine d'essai doit être construite et mise en place de manière à être rigide et stable. Elle doit accomplir les conditions suivantes :

1. Le plan d'oscillation du mouton doit être vertical.
2. La machine doit être construite de telle sorte que la perte d'énergie résultant d'éventuelle translation rotation ou vibration dans le bâti durant l'essai soit négligeable.
3. Le centre de percussion du mouton doit être voisin du milieu de la ligne de contact entre le couteau du mouton et l'éprouvette.
4. La précision de la graduation de l'échelle de la machine doit permettre de déterminer l'énergie maximale disponible.

La graduation de la machine est faite en angles de remontée et en énergie absorbée la plus petite division de l'échelle représente 2 joules.

5. La pointe de l'index doit avoir la même largeur que les traits de graduation et permettre une lecture exempte de parallaxe.

II.1.3 Composition de la machine

- 1- Corps.
- 2- Pendule.
- 3- Logement de l'éprouvette.
- 4- Bras.
- 5- Croché de bras.
- 6- Manivelle
- 7- Echelle.
- 8- Bras de freinage.
- 9- Système de protection.



Fig. II.1 Composants de mouton-pendule

Le mouton-pendule Charpy est composé d'un pendule (2) formé par une masse qui peut osciller à l'extrémité d'un levier mobile (4), alors que l'autre extrémité porte un crochet de bras (5) qui accroche le pendule sur le levier mobile et qui peut régler l'angle de montée avec la manivelle (6). La masse porte le couteau de choc. Le système de freinage est composé d'un bras (8) et d'une courroie pour freiner le pendule après le choc de l'éprouvette placée dans un logement (3) disposé sur le socle de l'appareil. Après le choc, on mesure l'angle de remontée du pendule sur une échelle (7).

II.2 Analyse des problèmes

Le pendule Charpy a été trouvé en panne à cause du manque ou défectuosité de certains composants essentiels qui sont: le bras qui fait monter le pendule (cassé, à réparer), l'axe de rotation du pendule (manquant, à concevoir et à réaliser), le système de freinage (manquant, à réaliser).

II.3 La conception avec le Solidworks

II.3.1 La CAO

Définition de la CAO

La CAO est un outil que l'ingénieur exploite, grâce à l'ordinateur, pour résoudre des problèmes technologiques en permettant de travailler en trois dimensions.

Les avantages et les inconvénients de la CAO

➤ **Les avantages :** les principaux avantages cités par les utilisateurs sont :

- Un processus de conception plus efficace ;
- Meilleure précision ;
- Réduction du temps de conception.

➤ **Les inconvénients** : il y a également quelques inconvénients comme :

- Coût du matériel ;
- Coût des formations.

II.3.2 Solidworks

Définitions :

Solidworks est un logiciel de conception mécanique de modélisation volumique paramétrée basée sur de fonctions associatives, ou il est possible d'esquisser des idées et d'essayer différentes conceptions pour créer des modèles 3D.

Les différentes utilisations de Solidworks :

Ce logiciel est utilisé par des concepteurs, des ingénieurs, des étudiants et d'autres professionnels pour produire des pièces, des assemblages et des mises en plan complexes. De plus il peut être utilisé dans plusieurs domaines, nous citons par exemple :

- ❖ Produit mécanique ;
- ❖ Produit de design industriel ;
- ❖ Ouvrage de génie civil.

L'utilité de Solidworks dans notre travail :

Le logiciel Solidworks nous a permis de réaliser les étapes suivantes :

- Des maquettes virtuelles des pièces en 3D.
- Un rendu réaliste des pièces et des assemblages.
- Une animation du mécanisme.
- Des mises en plan des pièces et des assemblages.

II.3.3 La partie conception

Cette partie est considérée comme la partie principale dans le cadre de notre étude, car elle représente le processus de conception et de réalisation des pièces de notre système.

II.3.3.1 Les principales étapes de conception

Les étapes de conception prises sont les suivantes:

- a) La prise de connaissance de la machine
- b) Prendre les cotes des pièces principales.
- c) Dessin de chaque pièce de machine en 3D.

d) Les dessins de définition de chaque pièce : surtout pour les pièces à usiner, afin d'établir les gammes d'usinage.

II.3.3.2 Définition des pièces à réaliser

Après avoir constaté les problèmes existents dans la machine, on a trouvé qu'il faut :

- fabriquer l'axe de rotation du marteau;
- réparer le bras qui fait monter le marteau ;
- réparer le système de freinage de marteau ainsi l'échelle du pendule

Après avoir sélectionné ces différentes pièces, l'étape suivante consiste à faire le dessin de définition de chacune d'elle. Pour cela, on doit d'abord déterminer les valeurs suivantes :

- Les côtes tolérances ;
 - Les tolérances géométriques ;
- Les états de surface.

II.3.3.3 Le dessin des pièces en 3D

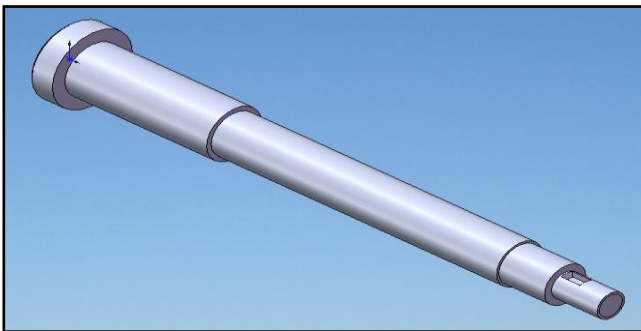


Fig. II.2 Axe de rotation.

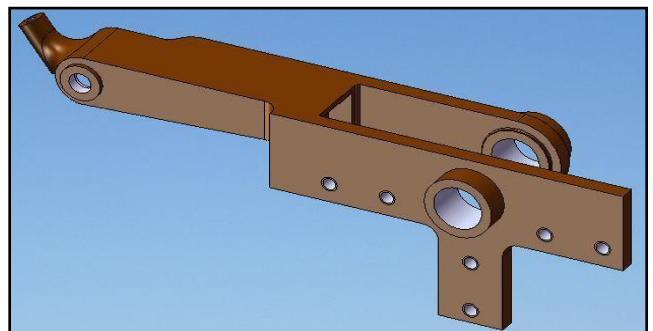


Fig. II.3 Bras.

II.3.3.4 La mise en plan des dessins

Pour donner les caractéristiques générales des pièces, on présente les dessins de définition de la manière suivante :

- Préparation de la feuille et du cartouche (modifier le fond du plan).
- Choisir les vues les mieux représentatives des pièces.

Chapitre III

Analyse de fabrication

III.1 Méthodologie



Figure III.1 : Schéma directeur de la méthode développée de traitement de gammes d'usinage.

III.1.1 Principe de la méthode développée [32]

III.1.1.1 Repérages des surfaces.

Le repérage des surfaces (brutes et usinées) se fait après l'étude de dessin de définition. Le repérage des surfaces usinées se fait par des chiffres par des lettres majuscules suivies d'un indice.

Le graphe de repérage met en évidence la cotation fonctionnelle entre les surfaces suivant les axes (OX, OY, OZ). Ainsi, il détermine les transfères de cotes lorsque deux surface ne possèdent pas de cotes de liaison et que l'une d'entre elles sert de référentiel.

- **Les contraintes dimensionnelles**

Ce sont des côtes de liaisons entre les surfaces exigées par le dessin de définition avec des intervalles de tolérances bien précis.

- **Les contraintes géométriques:** il existe deux types

De position : on cite le parallélisme, la perpendicularité, la co-axialité, l'inclinaison ...etc.

De forme : la rectitude, la planéité, la circularité, la cylindricité....etc.

Dans le cas d'existence de contraintes géométrique sur le dessin de définition, elles doivent être citées, soit sur le même graphe des contraintes dimensionnelles ou en leur en créant un spécial.

- **Les contraintes technologiques**

Ces contraintes dépendent des moyens utilisés pour la fabrication. Elles consistent à protéger le matériel de l'atelier et respecte les exigences du bureau d'étude et augmenter la qualité du produit.

- **Les contraintes économiques**

Le coût de fabrication, la durée de l'usinage et l'usure des outils nous conditionnent à faire un choix précis sur la fabrication de façon à ce que le cout de revient à l'unité, soit minimisé le plus que possible.

III.1.1.2 Tableau des opérations élémentaires

Le tableau des opérations élémentaires regroupe les résultats de l'analyse de la réalisation des surfaces élémentaires : ébauche, demi-finition et finition. Il existe aussi la super finition qui permet d'obtenir des surfaces avec une très grande précision.

Le choix du nombre d'opérations élémentaires

Le choix du nombre d'opération est déterminé à partir de l'intervalle de tolérances, la qualité et d'état de surface.

III.1.1.3 Tableau des groupements évidents

Dans ce tableau sont regroupées les surfaces qui peuvent être réalisées par le même outil ou plusieurs outils associés. Les surfaces groupées sont désignées par une lettre majuscule.

III.1.1.4 Tableau des contraintes d'antériorité

Ce tableau s'établit à partir des opérations élémentaires et du dessin de définition, dans la colonne « opération », nous classons l'ordre des surfaces (brutes, usinées et groupées) avec leurs symbolisations et nous cherchons les contraintes d'antériorité de chaque opération élémentaire d'ordre géométrique technique technologique et économique.

III.1.1.5 Tableau des niveaux

Sur ce tableau qui est une matrice carrée (figure des entrées et des sorties). On poste toutes les opérations élémentaires de toutes les surfaces avec les brutes sur les premiers lignes et colonnes. L'exploitation de ce tableau se fait suivant le tableau des contraintes d'antériorités. Il arrive par fois que deux opérations élémentaires soient en contraintes d'antériorités réciproques. Il y a donc impossibilité de poursuivre l'étude, donc il faut faire un choix judicieux et supprimer ou négliger celle qui n'est pas impérative.

III.1.1.6 Tableau de groupements en phase

Une fois les niveaux déterminés, on passe aux groupements en phase qui consistent à placer les niveaux horizontalement. Sur les lignes de chaque niveau ; on place les opérations élémentaires de ce niveau, notons qu'un niveau ne constitue pas une phase. En fonction des conditions économiques et du parc machine on peut grouper les opérations élémentaires en phases d'usinage.

III.1.1.7 Le projet de gamme

A partir du tableau des groupements en phases, on procède à la rédaction du processus d'usinage envisagé. On désigne toutes les opérations dans des phases ou sous phases.

III.1.2 Simulation d'usinage [32]

La simulation d'usinage permet le calcul des cotes brutes (afin d'usiner une pièce correcte en mettant en œuvre une quantité minimale de matière brute), des cotes de fabrication, et vérifier la validité du processus d'usinage.

Pour la simulation d'usinage il y a deux conditions à respecter :

Condition du bureau des études BDE : les cotes conditions.

Condition du bureau des méthodes BDM : le copeau minimum, la tolérance économique d'usinage.

III.1.2.1 Calcul des surépaisseurs d'usinage

La réalisation d'un usinage par enlèvement de métal nécessite, suivant les procédés mis en œuvre, une surépaisseur comprise entre deux limites.

Valeur minimale : elle est fonction de forme de l'arrête tranchante.

- Valeur maximale : elle est fonction :
- De la puissance de la machine ;
 - De l'état de surface et de l'IT demandés ;
 - De la technique utilisée.

III.1.2.1.a Coupeau minimum [32]

Le coupeau minimum « cpm » est une condition du BM ou même titre que toute condition. Il est important lors de l'usinage de garantir à l'outil le « cpm » afin d'éviter l'écaillage de la surface. Nous donnons quelques valeurs de coupeau minimum déterminées uniquement par l'expérimentation.

Tableau III.1 : Les valeurs indicatives du coupeau minimal cpm

Opérations	Coupeau minimum
Ecroutage	1.5 à 4
Ebauche après écroutage	0.5
Ebauche directe	1
Demi-finition	0.5
Finition	0.2

III.1.2.1.b Tolérances économiques

Les côtes de fabrications sont assorties d'une tolérance. Pour chaque procédé de fabrication, suivant l'opération effectuée (ébauche, demi-finition, finition), il existe une satisfaisant, compte tenu de la précision de la machine et du prix de revient.

Tableau III.2 : Les valeurs indicatives des tolérances économiques.

Mode d'usinage	Ebauche	½ Finition	Finition
Sciage	2	-	-
Tournage- fraisage	0.4	0.2	0.5
Rabotage	0.4	0.2	0.1
Perçage	0.3	0.1	0.1
Alésage (outil d'enveloppe)	0.3	0.15	0.03
Alésage (outil de forme)	0.2	0.1	0.03
Rectification	0.2	0.05	0.01
Brochage	0.1	0.03	0.01

III.1.3 Choix des machines.

Dans une gamme, les machines doivent être choisies afin que les deux conditions suivantes soient satisfaites :

- Les tolérances de forme, de position, de dimension, d'état de surface doivent être respectées.
- Le prix de revient de l'usinage doit être minimisé. Ceci est surtout valable dans les productions de série pour lesquelles l'économie d'argent réalisée sur une pièce est multipliée par le nombre de pièces de la série.

Pour chaque machine à employer, on doit connaître :

- Le mode d'utilisation de l'outil ;
- Les équipements standards ;
- Les équipements spéciaux ;
- Les valeurs de déformations de l'ensemble « machine-outil-pièce » et la précision possible.

III.1.4 Choix des outils de coupe.

Il existe actuellement une grande variété d'outils aptes à réaliser un usinage. Chaque type d'outil a son domaine d'emploi particulier. Le choix des outils de coupe dépend de :

- La précision à réaliser ;
- La productivité ;
- La forme (suivant l'opération à exécuter) ;
- Le sens (le déplacement de l'outil à droite ou à gauche, vers le haut ou vers le bas)
- Le montage : à l'endroit dans le cas général ou à l'envers.

III.1.5 Choix des conditions coupe.

Le choix des conditions de coupe (V , f , a , r_e , etc..) pour un matériau déterminé dépend du type d'opération à réaliser. Les principaux paramètres à considérer sont :

- La durée de vie T de l'arrête de coupe (temps effectué de coupe avec la même arrête).
- Les efforts de coupe (limite de puissance de la machine).
- En ébauche, le débit de copeaux maximal au cout minimal est recherché.
- En finition, on recherche la qualité dimensionnelle, micro géométrique et macro géométrique de la surface.

Le principal paramètre à prendre en compte étant la rugosité de la surface usinée.

Tableau III.3 : Valeurs indicatives des vitesses de coupe

Tableau des valeurs indicatives des conditions de coupe en tournage															
Désignation		Chariotage				Tronçonnage				Filetage					
Matière	Résistance (daN/mm ²) ou dureté HB	Outil A.R.S		Outil carbure		Outil A.R.S		Outil carbure		Outil A.R.S	Outil carbure				
		V90 de Coupe d'avance f=a/10		V45 de coupe d'avance f=a/8		V90 m/m n	Avance par tour pour larg. de coupe		Avance par tour pour larg. De coupe		V90 m/mn	V45 m/mn			
		a: 3 à 5	a: 0.5 à 1	a: 3 à 5	a: 0.5 à 1		3	6	12	3	6	12			
35NCD16	76-95	22-25	29-33	105-115	135-150	16-18	0.04	0.05	0.04	58-65	0.1	0.15	0.08	13-16	65-95
25 CD 16	95-115	18-20	23-26	100-110	120-130	14-18	0.04	0.05	0.04	54-60	0.1	0.15	0.08	13-16	65-95

Valeurs indicatives de K : (Pour la duré de vie des outils)

Tableau III.4 : Valeurs indicatives de K

		Tournage	Fraisage
Aciers	ARS	-8.3	-5
	Carbure	-5	-3.1

Rectification cylindrique extérieure (conditions de coupe) [33] :

Tableau III.5 : Conditions de coupe

Matière	Dureté	Vitesse		Engagement		Largeur de passe f en mm/t	Type de meule
		meule (m/s)	pièce (m/min)	Ebauche	Finition		
Acier alliés	<45HRC	30 –35	20 – 32	≤ 0.05	≤ 0.01	E/2 à E/6	A60L5VG
	≥ 4HRC	30 - 35	20 - 32	≤ 0.05	≤0.005	E/4 à E/8	38A60L5VG

III.1.5.1 Les efforts de coupe.

L'enlèvement de matière avec des outils coupant provoque sur l'outil un effort F qui se décompose en :

Un effort principal de coupe F_c ; tel que $F_c = K_s . a . f$

Un effort d'avance F_a ; $F_a \approx F_c(0.15 - 0.1 \cos K_r)$

Un effort de pénétration F_p ; $F_p = 0.3 F_c$

a_p : engagement en mm.

f : avance en mm par tour.

K_s : pression spécifique de coupe en N/mm²

K_r : angle de direction d'arête de coupe.

III.1.5.2 Puissance absorbée

Dans le sens du MC : $M_c[w] = F_c[N] \times V_c[m/s]$

dans le sens de Ma : $M_a[w] = F_a [N] \times V_f [m/s]$

V_c : vitesse de coupe. Avec : $N\pi D = 1000 \cdot V_c$ (en tournage)

V_f : vitesse d'avance. Avec : $V_f = f_z \cdot N$ (en tournage)

N : le taux de rotation de la pièce en tournage.

III.1.5.3 Pression spécifique de coupe K_s .

A chaque matériau et type d'usinage donné correspond une valeur expérimentale de la pression spécifique de coupe qui a pour expression :

$$K_s = \frac{F_c(N)}{S(mm^2)}$$

où S est l'aire de la section de coupe.

La valeur de la pression spécifique de coupe K_s est en fonction des différents facteurs d'influence : $k_s = C k_1 k_2$

Où C [N/mm²] dépend des matériaux. K_1 et K_2 étant en fonction des angles de coupe.

Tableau III.6 : Pression spécifique de coupe

Expression de K_s (pression spécifique de coupe)	
Procédés d'usinage	Formules de calcul de K_s
Tournage	$K_s = C \cdot (f \cdot \sin K_r)^n \cdot (1 + m \cdot \theta)$
Fraisage	$K_s = C \cdot \left(\sin K \frac{360fL}{\pi\phi D} \right)^2 (1 + m \cdot \theta)$
Perçage	$K_s = C \cdot \left(\frac{f}{2} \sin K \right)^n (1 + m \cdot \theta)$
Brochage	$K_s = C \cdot h^n$

III.1.5.4 Les facteurs d'influence

1. *Influence de la matière usinée [33]* : la valeur de C dépend des caractéristiques mécaniques et structurales des matériaux usinés.

Tableau III.7 : Vitesses de coupe

Matière à usiner		Valeurs indicatives de C		
		R[N/mm ²]]	C [N/mm ²]	Nuances NF
Aciers alliés ≤5%	Au	600 -750	1650 2300 2900	18 CD 4
	Cr+Mo	750 -950		35 CD 4
	Au	950 -		40 NCD
	Ni+Cr	1150		7

2. Influence des angles de coupe [33] :

Angle de direction d'arête K_r : la pression spécifique de coupe diminue, lorsque l'épaisseur de la section de coupe augmente. On a :

$$K_1 = h^n \quad \text{avec } h = f \cdot \sin K_r$$

Angle de pente γ_0 : la pression spécifique diminue lorsque la pente γ_0 augmente. On a :

$$K_2 = 1 + (m \cdot \theta) \quad \theta = \gamma_0 - \gamma_e \quad \text{pour les aciers : } n = -2 \text{ et } m = 0.008$$

III.1.6 La programmation

On dispose d'un tour numérique dans notre département. Il est préférable de faire la réalisation de nos pièces sur un tour à commande numérique vu son avantage par rapport au tour ordinaire.

III.1.6.1 Définition.

Programmer consiste à transposer la gamme d'usinage en langage compris par la machine.

Le langage alphanumérique précise le code. En programmation manuelle, le langage utilise est décomposé comme suit :

- Le format qui caractérise les mots utilisés,
- Les adresses, ce sont les lettres débutant un mot d'un langage machine. Celle-ci précise la fonction générale à commander (G, X, Y, Z, F, S, T, M).
- Les mots sont un ensemble de caractères comportant une adresse suivie de chiffres constituant une information (X25.236).
- Les blocs sont des groupes de mots correspondant aux instructions relatives à une séquence d'usinage (N150 GOI X200. Y 125.235 F250).
- Les fonctions sont tous les mots d'un langage machine autres que ceux définissant les cotes, et nécessaires pour assurer le fonctionnement d'une machine-outil. On trouve :
 - les fonctions préparatoires G
 - les fonctions vitesse d'avance F
 - les fonctions vitesse de broche S
 - les fonctions outil T

• les fonctions auxiliaires M (mise en route de l'arrosage, de la broche, blocage ou déblocage de plateau ...). Attention, certaines fonctions auxiliaires sont à prévoir dans le cahier des charges ou le plus tard à préciser au moment de la commande !

III.1.6.2 La préparation du travail.

On ne peut pas et ne doit pas établir le programme MOCN directement (le temps de mise au point serait trop long), il faut impérativement préparer le travail. Cette préparation consiste à avoir un dossier méthode comprenant :

1 - une gamme de fabrication sur laquelle il y a le descriptif du cycle de fabrication de la pièce ;

2 - une fiche suiveuse qui découle de la gamme et permet d'avoir le numéro d'opération élémentaire et de savoir à tout moment l'état d'avancement de la pièce ;

3 - une fiche de position pièce-machine pour identifier la position exacte de la pièce sur la machine,

4 - des fiches d'opération pour retrouver tous les détails de l'opération (c'est un document très important pour l'opérateur, car il retrouve l'ordre d'exécution de son programme).

5 - des fiches outils pour identifier parfaitement l'outil coupant et son attachement et savoir les correcteurs qui sont rattachés à l'outil.

6 - il faut de plus préparer la géométrie de la pièce (arrivée rapide d'outil, prévoir la surépaisseur de la pièce, le nombre de passes à effectuer..).

7 - Définir les origines. Dès la mise sous tension de la machine, avant chaque travail, le système doit connaître diverses positions :

❖ *L'origine absolue* : de la mesure sur chaque axe, c'est le point du référentiel mesure défini par un taquet et l'impulsion zéro du capteur de mesure. L'origine machine et l'origine mesure sont confondus par les paramètres machine des cotes X, Y, Z.

❖ *L'origine programme* : C'est l'origine du trièdre de référence à partir de laquelle le programmeur établit le programme de la pièce.

❖ *L'origine pièce ou prise d'origine* : C'est le point sur lequel on peut se mettre en position référentielle, soit directement soit par l'intermédiaire de cales étalon, centreur, comparateur ou palpeur.

Lorsque l'origine programme et l'origine pièce ne sont pas confondues, l'opérateur inclut à l'aide du clavier, un décalage, pris en compte systématiquement pour définir l'écart entre les deux origines.

8 - Identifier la MOCN.

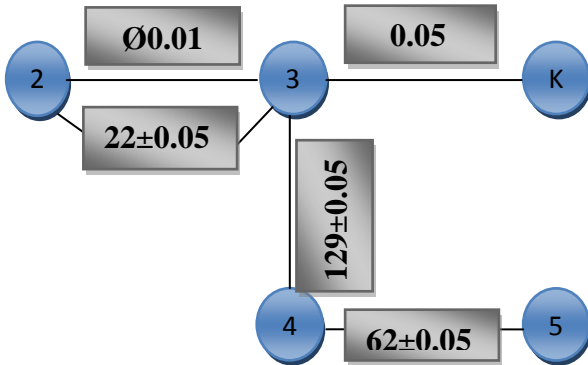
III.2 La gamme d'usinage de l'axe de rotation

III.2.1 Inventaire des surfaces.

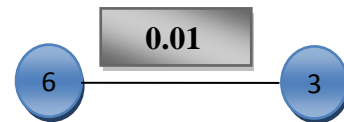
A partir de dessin de définition de l'axe en marque les surface a usiné ;
On désigne par les chiffres 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 sont les surface à usiné.

III.2.2 Les sous graph des conditions du B.D.E.

Suivante OX :



Suivante OZ :



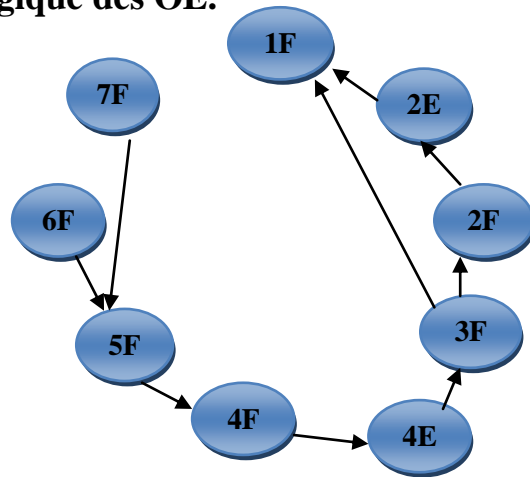
Surface	Q(i)	Ra(i)	R(i)	OE
1	9	7	1	1F
2	10	3.2	1	2E-2F
3	12	7	1	3F
4	12	3.2	1	3E-4F
5	13	7	1	5F
6	14	7	1	6F
7	11	7	1	7F

III.2.3 Tableau d'analyse des contraintes d'antériorité ;

OE	Cont. de cotation.	Cont. de spécification.	Cont. Technologique.	Cont. Economique.
1F	-	-	-	-
2E	-	-	1F	-
2F	-	-	2E	-
3F	2F	1F	2F	-
3E	3F	-	3F	-
4F	-	-	4E	-
5F	4F	-	4F	-
6F	-	5F	5F	-
7F	-	-	-	1F

III.2.4 Ordre chronologique des OE.

- 2E → 1F
- 2F → 2E
- 3F → 2F; 1F
- 4E → 3F
- 4F → 4E
- 5F → 4F
- 6F → 5F
- 7F → 5F






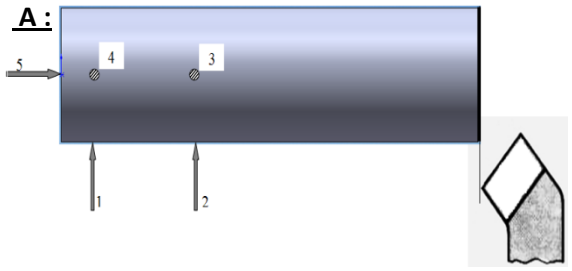
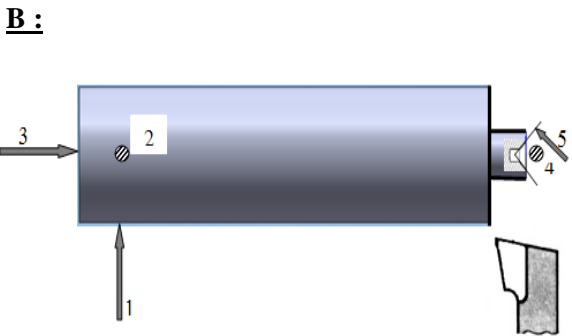
III.2.5 Dictionnaire des précédents.


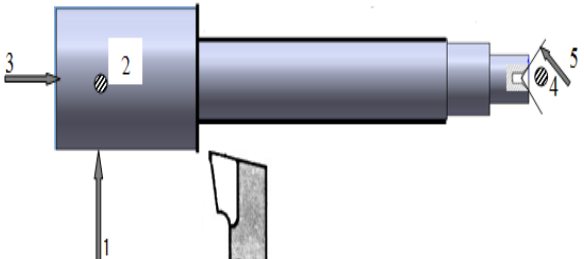
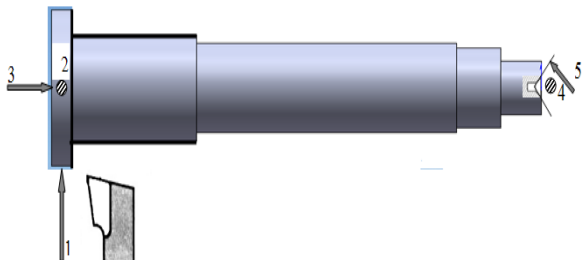

OE	Précédent
1F	-
2E	1F
2F	2E
3F	1F ; 2F
4E	3F
4F	4E
5F	4F
6F	5F
7F	1F

➤ Niveau d'exécution :


	1F	2E	2F	3F	4E	4F	5F	6F	7F	V0	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	
1F																		
2E											0							
2F											1	0						
3F											1	1	0					
4E											1	1	1	0				
4F											1	1	1	1	0			
5F											1	1	1	1	1	0		
6F											1	1	1	1	1	1	0	
7F											0							
											Niveau d'exécution							
0	N1	2	3	4	5	6	7											
F	7F ; 2E	F	F	E	F	F	F											

III.2.6 La gamme d'usinage

 ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			Nom : MEBARKI Prénom : Fares	
Ensemble : Organe : Elément : axe de rotation		Nombre : Matière : XC48 Etiré		FEUILLE D'ANALYSE D'USINAGE 
N° phase et s-phase	Désignation des opérations pour chaque phase et s-phase	Machine utilisée	Appareillages outils-coupants vérificateurs	Croquis de la pièce à divers stades d'usinage
10	<u>Contrôle du brut :</u> Cotes et spécifications suivant le plan: -Diamètre Ø35g6 -Longueur $L_{max} = 245mm$	Atelier contrôle	Appareillages	
20	<u>Tournage :</u> A: <i>Montage en air :</i> -Dressage en finition de la surface 1. $L = 243mm$. - Centrage de 1.	Tour conventionnelle	- Outil à dresser. - outil à centrer. - Pied à coulisse.	A: 
	B: <i>Montage mixte :</i> - chariotage en finition de la surface 5 au Ø12, sur une longueur de 20mm.	Tour conventionnelle	-Outil à chariots. -Pied à coulisse.	B: 

	<p>C: <i>Montage mixte :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - ébauche de la surface 4 au Ø18.5, sur une longueur égale à 22mm. -Finition de la surface 4 au Ø18h6 	<p>Tour conventionnel</p>		<p>C:</p> 
	<p>D: <i>Montage mixte :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - chariotage en finition de la surface 3 au Ø20p6, sur une longueur de 129mm. 	<p>Tour conventionnel</p>		<p>D:</p> 
	<p>E: <i>Montage mixte :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> -ébauche de la surface 2 au Ø24.5, sur une longueur égale à 60mm. -Finition de la surface 2 au Ø24h6 	<p>Tour conventionnel</p>		<p>E:</p> 
<p>30</p>	<p>Fraisage :</p> <p><i>Montage en plateau diviseur</i></p> <p>Faire la rainure 6 pour vis sans tête à téton.</p>	<p>Fraiseuse</p>	<p>Une fraise 2T</p>	
<p>40</p>	<p>Contrôle final :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Dimensions. -Spécification géométriques. -états de surface. 		<p>Poste de control</p>	

III.2.7 Contrat de phase détaillée

 ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE				Nom : MEBARKI Prénom : Fares										
Elément : axe de rotation Matière : XC48 Nombre :		Phase : tournage Numéro : 30 Machine-outil: Tour Conventionnel		CONTRAT DE PHASE DETAILLEE 										
s/p h	Description des s-phase opérations et éléments de travail	Outillages Montages d'usinage	Outils-coupa nts			Vérificate urs	El' de coupe			El' de passe			Temps en (s)	
					V	a	n	P	A	L	T _t	T _m	T _z	
1	Prendre pièce	Montage		Touche de réglage								10		
2	Poser pièce et mettre en position											30		
3	Serrer pièce											60		
4	Embrayer Mc					0,1/2					4			
5	Embrayer Ma										4			
6	Finition de la surface 1.	Dresser Charioté												
7	Ebauche de la surface 2													
8	Finition de la surface 2.	-				0,05								
9	Finition de la surface 3.	-				0,05								
10	Ebauche de la surface 4	-				5	350	0.5	90	220	226			
11	Finition de la surface 4.	-			150	0,05	350	1		120	226			
12	Finition de la surface 5.	-			150	5	350	1		220	226			
13	Finition de la surface 6.	Fraise 2T			150	0,05	350	1		120	226			
14	Contrôler pièce				160	5	350	2		220	226			
15	Démonter pièce	Pied à coulisse		Pied à coulisse et rugosimètre	150	0,05	350	1		120	226			
16	Poser pièce				150	5	350	1		220	226	40		
17	Nettoyer montage	rugosimètre			150	0,05	350	1		120	226	10	30	
					160	5	350	2		220	226	50		
						5						15.3+		
					0,05						300			
					5									
					0,05									
					5									

Mêmes croquis de la gamme.

III.1 Programme de l'axe sur MOCN ;**➤ Programme de la phase 20 (sur le tour).**

% 2906

N010 G71 G90 L_f

N020 G58 X0 Z243 L_f

N030 T1 D12 L_f (outil de dressage)

N040 G96 S150 M03 L_f

N050 G95 F0.2 L_f

N060 G00 X0 Z0 L_f

N070 G01 X0Z-1 L_f

N080 G01 X17 Z -1 L_f

N090 G01 X17 Z -20 L_f

N100 G01 X17 Z -1L_f

N110 G01X15 Z-1L_f

N120 G01X15 Z-20 L_f

N130 G01X15 Z-1L_f

N140 G01X10 Z-1 L_f

N150 G01X10 Z-20 L_f

N160 G01X10 Z-1L_f

N170 G01X8 Z-1 L_f

N180 G01 X8 Z-20 L_f

N190 G01X8 Z-1 L_f

N200 G01 X7.5 Z-1 L_f

N210 G01 X7.5 Z-20 L_f

N220 G01 X7.5 Z-1 L_f

N230 G01 X6 Z -1 L_f

N240 G01 X6 Z -20 L_f

N245 G00 X 20 Z 10 L_f

N246 T2 D14 L_f (outil de chariotage)

N247 G00 X17 Z -19 L_f

N250 G01 X17 Z -20 L_f

N260 G01 X17 Z -42 L_f

N270 G01 X17 Z -20 L_f

N280 G01 X15 Z -20 L_f

N290 G01 X15 Z -42 L_f

N300 G01 X15 Z -20 L_f

N310 G01 X10 Z -20 L_f

N320 G01 X10 Z -42 L_f

N330 G01 X10 Z -20 L_f

N340 G01 X9.5 Z -20 L_f

N350 G01 X9.5 Z -42 L_f

N360 G01 X9.5 Z -20 L_f

N370 G01 X9 Z -20 L_f

N380 G01 X9 Z -42 L_f

N390 G01 X17 Z -42 L_f

N400 G01 X17 Z -129 L_f

N410 G01 X17 Z -42 L_f

N420 G01 X15 Z -42 L_f

N430 G01 X15 Z -129 L_f

N440 G01 X15 Z -42 L_f

N450 G01 X11 Z 42 L_f

N460 G01 X11 Z -129 L_f

N470 G01 X11 Z -42 L_f

N480 G01 X10.5 Z -42 L_f

N490 G01 X10.5 Z -129 L_f

N500 G01 X10.5 Z -42 L_f

N510 G01 X10 Z -42 L_f

N520 G01 X10 Z -129 L_f

N530 G01 X17 Z -129 L_f

N540 G01 X17 Z -233 L_f

N550 G01 X17 Z -129 L_f

N560 G01 X15 Z -129 L_f

N570 G01 X15 Z -233 L_f

N580 G01 X15 Z -129 L_f

N590 G01X13 Z -129 L_f

N600 G01 X13 Z -233 L_f

N610 G01 X13 Z -129 L_f

N620 G01 X12.5 Z-129 L_f

N630 G01 X12.5 Z-233 L_f

N640 G01 X12.5 Z-129 L_f

N650 G01 X12 Z -129 L_f

N660 G01 X12 Z -233 L_f

N670 G01 X18 Z -233 L_f

N680 G01 X18 Z -243 L_f

N690 G01 X18 Z -233 L_f

N700 G01 X17.5 Z-233 L_f

N710 G01 X17.5 Z-243 L_f

N720 G01 X0 Z -243 L_f

N730 M02 L_f

➤ **Programme de la phase 30 (sur la Fraise).**

% 0629

N010 G71 G90 L_f

N020 G54 G58 X16 Z 228 L_f

N030 M06 T5 (fraise 2T Ø4) D15 L_f

N040 M03 G96 S80 L_f

N050 G95 F0.2 L_f

N060 G00 X-16 Z0 L_f

N070 G01 X -19 Z0 L_f

N080 G00 X-14 Z0 L_f

N090 G00 X-16 Z -8 L_f

N100 G00 X-16 Z-8 L_f

N110 G01 X-19 Z-8 L_f

N120 G00 X0 Z0 L_f

N130 M02 L_f

Chapitre IV

ETUDE EXPERIMENTALE

IV.1 Introduction

Afin de compléter et valider notre travail sur le pendule réparé, des essais ont été menés sur des éprouvettes de taille 55x10x10 présentant des entailles en U. Nous pouvons juger, à partir des résultats obtenus, de la fiabilité de la machine ainsi réparée..

IV.2 Machine d'essai utilisée.

Pour la partie expérimentale, le mouton-pendule **TRAYVOU de 300J**, en panne depuis longtemps et entreposée au laboratoire de métallurgie du département de génie mécanique, a été utilisé.

➤ Description de la machine

Un marteau de masse m est fixé à l'extrémité d'un pendule (**figs. IV.1 et IV.2**). Ce pendule peut tourner dans le plan vertical autour d'un axe horizontal. L'éprouvette repose sur un support et se trouve au point le plus bas sur la trajectoire du marteau. Pour effectuer un essai, on écarte le bras jusqu'à ce que le marteau atteigne sa position initiale P et on le lâche. Quand le pendule vient frapper l'éprouvette, il a une énergie cinétique qui est égale à l'énergie potentielle acquise à sa position de départ mgh_0 , h étant la hauteur du marteau par rapport à sa position d'équilibre. Après la rupture, le marteau remonte. Dans son point culminant (hauteur h_1), l'énergie cinétique résiduelle s'est de nouveau transformée en énergie potentielle mgh_1 .

L'énergie W dépensée pour rompre l'éprouvette vaut alors $W = mg(h_0 - h_1)$

Comme l'énergie cinétique emportée par les débris après la rupture est négligeable, c'est l'énergie de rupture que l'on indique comme résultat de l'essai de résilience. De plus il faut absolument mentionner le type d'échantillon aux normes que l'on a utilisé pour sa détermination.

L'énergie de rupture est finalement indiquée en J (Joule), précédée par les lettres K_V ou K_U .

Pour obtenir la résilience K on divisera encore cette valeur par la section de l'échantillon à l'endroit de la fissure. L'unité habituelle pour exprimer la résilience K est le J/cm^2 tandis que l'énergie de rupture K_V est indiquée en J.

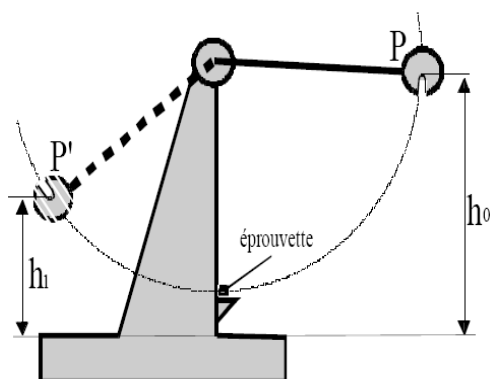


Fig. IV.1 Le mouton de Charpy.

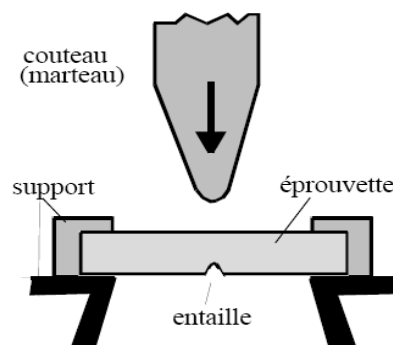


Fig. IV.2 Appui de l'éprouvette vue d'en haut.

➤ Vérification de la machine.

Pour assurer le bon fonctionnement de la machine, on fait un test à vide (sans éprouvette). Le pendule est incliné de 60° . La valeur de l'angle final à la remontée du pendule est de 59° . Les pertes par frottement peuvent être estimées à 1.67%. Cette valeur est acceptable dans la pratique. De plus, le pendule reste dans son propre plan pendant son mouvement. Donc la machine est en bon état de fonctionnement.

IV.3 Les éprouvettes utilisées pour les essais.

✓ Type d'éprouvette.

Il existe de nombreuses géométries d'éprouvettes parallélépipédiques entaillées sollicitées en flexion (éprouvettes Battelle, Pellini, Charpy avec entaille en U, en V, en trou de serrure...). C'est l'éprouvette Charpy avec entaille en V qui est la plus employée (**fig. IV.3**). Elle nécessite en effet peu de matière. Elle est facile à usiner et ne nécessite pas de charges trop élevées. Son entaille procure un confinement qui assure une détermination des courbes de transition de ductilité suffisamment sévère.

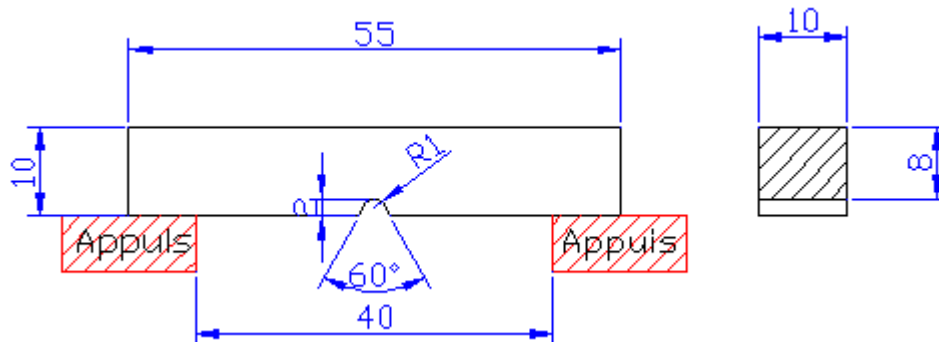


Fig. IV.3 Eprouvette d'essai avec entaille en V.

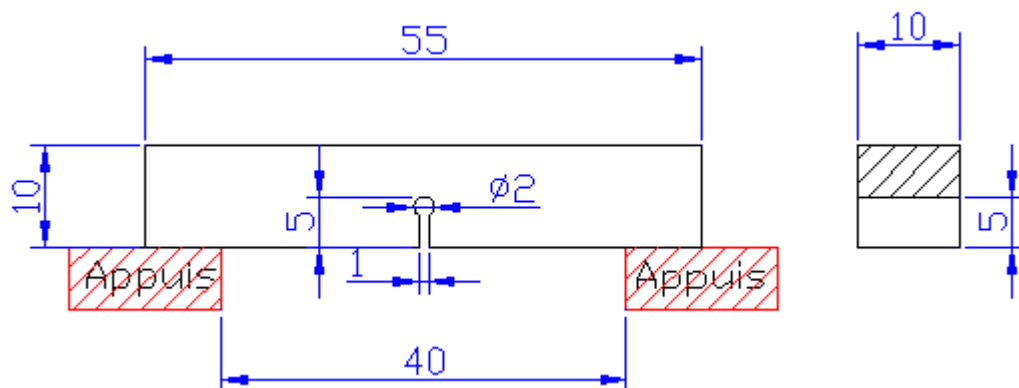


Fig. IV.4 Eprouvette d'essai avec trou de serrure.

✓ **Matériaux** : Les essais sont effectués sur deux aciers différents :

- **Le premier est un acier étiré XC38 (C35).**

Composition chimique :

Tableau IV.1 : Composition chimique de l'acier C35.

C%	Si%	Mn%	Ni%	Cr%	P%	S%	Mo%	Cu%	Fe%
0.36	0.27	0.66	0.02	0.21	0.015	0.02	0.02	0.22	balance

Caractéristiques mécaniques :

Tableau IV.2 : Caractéristiques mécaniques de l'acier C35.

Résistance à la rupture R_r (MPa)	Limite élastique R_e (MPa)	Allongement A% A la rupture	La dureté H_v
717	478	36.5	170 -195

- **Le deuxième est l'A60**

L'acier A60 est un acier faiblement allié. Il rentre dans la catégorie des aciers de construction d'usage général, dont la composition chimique et les propriétés mécaniques sont résumés dans les tables ci-dessous.

Composition chimique

Tableau IV.3 : Composition chimique de l'acier A60.

% C	%P	%S	%N	% Mn
max 0.25	max 0.045	max 0.045	0.009	0.5

Propriété mécanique

Tableau IV.4 : Caractéristiques mécaniques de l'acier A60.

Re (MPa)	Rm (MPa)	A%
305/335	590/770	6/16

Toutes les éprouvettes sont de section carrée de $10 \times 10 \text{ mm}^2$ et présentent des longueurs entre appuis de 55mm. Elles présentent au milieu une entaille en U de profondeur 5mm.

Le plan de symétrie de l'entaille est perpendiculaire à l'axe longitudinal de l'éprouvette.

Les entailles sont usinées à l'aide d'une scie à métaux

IV.4 Résultats des essais

➤ Calcul et expression des résultats

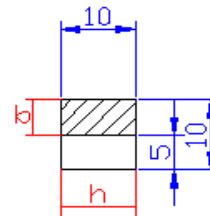
L'énergie absorbée par l'éprouvette (W) est égale à la différence des énergies potentielles du pendule entre le départ (W_0) et l'arrivée (W_1). Soit ℓ le rayon de pendule.

$$\text{On a donc: } W_0 = P.h_0 \quad W_1 = P.h_1 \quad \rightarrow \quad W = P.(h_0 - h_1)$$

$$\text{Avec: } h_0 = \ell - \ell \cos \theta_0 = \ell(1 - \cos \theta_0) \quad \text{et} \quad h_1 = \ell - \ell \cos \theta_1 = \ell(1 - \cos \theta_1)$$

Pour connaître la résistance au choc Charpy (ou résilience), dans le cas d'une éprouvette entaillée, on utilise l'équation :

$$K = \frac{W}{h.b}$$



avec W : l'énergie absorbée par l'éprouvette en Joules ;

h : l'épaisseur de l'éprouvette en millimètres ;

b : la largeur restante ou ligament de l'éprouvette exprimé en millimètres.

➤ Résultats des essais

On a fait des essais sur deux types d'éprouvette de même taille avec entaille différent

- L'une entaille avec trous de serrure de rayon de 2mm, de matière XC38 ;
- Et l'autre entaille en V avec un angle de 60° et un rayon de 2mm, de matière A60.

• Résultats des essais pour l'acier XC38

$$\ell = 693 \text{ mm} ; P = 22,7 \text{ kg et } b \times h = 5 \times 10 = 50 \text{ mm}^2$$

Tableau IV.5 : résultat de l'essai.

	θ_0	θ_1	h_0	h_1	W	K
Eprouvette	60	43	346,50	186,17	36.4	7,3

N°1						
Eprouvette	60	45	346,50	202,98		6,5
N°2						
Eprouvette	60	44	346,50	194,50	32.58	6,9
N°3						
Eprouvette	60	42	346,50	178,00	34.51	7,6
N°4						
Eprouvette	60	40	346,50	162,13	38.25	8,4
N°5						
					41.86	

- **Résultats des essais pour l'acier A60**

$l = 693 \text{ mm}$; $P = 22,7 \text{ kg}$ et $b \times h = 8 \times 10 = 80 \text{ mm}^2$

Tableau IV.6 : résultat de l'essai.

	θ_0	θ_1	h_0	h_1	W	K
Eprouvette N°1	60	56	346,50	305,48	9.31	1,2
Eprouvette N°2	60	57	346,50	315,56	7.03	0,88
Eprouvette N°3	60	55	346,50	295,51	11.58	1,4
Eprouvette N°4	60	55	346,50	295,51	11.58	1,4
Eprouvette N°5	60	56	346,50	305,48	9.31	1,2
Eprouvette N°6	60	55,5	346,50	300,48	10.45	1,3
Eprouvette N°7	60	55	346,50	295,51	11.58	1,4
Eprouvette N°8	60	56	346,50	305,48	9.31	1,2
Eprouvette N°9	60	55	346,50	295,51	11.58	1,4
Eprouvette N°10	60	54	346,50	285,66	13.81	1,7

Eprouvette N°11	60	55	346,50	295,51	11.58	1,4
Eprouvette N°12	60	56	346,50	305,48	9.31	1,2
Eprouvette N°13	60	55	346,50	295,51	11.58	1,4

L'énergie K_v peut être utilisée en première approximation pour le calcul de la ténacité K_{1c} [1].

Nous pouvons utiliser la formule suivante :

$$K_{1c}^2 = 0,65 E \cdot K_v$$

Où E est le module de Young

Une première estimation de la ténacité donne

$$K_{1c} = 42 \text{ MPa } \sqrt{m}$$

La relation suivante donne aussi la ténacité sous la forme

$$K_{1c}^2 = 0,222 R_e K_v^{1.5}$$

Où R_e est la limite élastique de l'acier A60.

Nous obtenons :

$$K_{1c} = 54 \text{ MPa } \sqrt{m}$$

Les relations ci-dessus sont des relations empiriques. Les résultats obtenus doivent être confortés par des essais complémentaires. Les essais de résilience peuvent être un moyen très économique pour déduire la valeur de la ténacité.

Conclusión Générale

Conclusion Générale

Concevoir et réaliser des organes de machine fiables sont en permanence les grands soucis de l'ingénieur.

La mise en marche de la machine d'essai de flexion par choc va apporter un grand soutien pédagogique dans la formation des étudiants en génie mécanique

La machine de flexion par choc du département génie mécanique, exploitée durant de très longues années, a été diagnostiquée dans le but de la remettre en état de marche. Après le diagnostic réalisé, nous avons décidé qu'il était nécessaire de concevoir et de réaliser les pièces manquants.

Pour la conception de ces pièces, nous avons utilisé Solidworks comme outil d'aide à la conception. Les pièces ainsi conçues sont facilement exploitables en réalisation.

Les différents éléments que nous proposons sont conçus dans les soucis d'avoir des pièces facilement réalisables ou disponibles sur le marché.

Au vu du comportement de la machine, nous pensons que les essais effectués sur la machine sont fiables.

En recommandation, pour les futurs utilisateurs de cette machine, nous préconisons de faire des tests d'étalonnage complémentaire avant d'entamer des essais.

Bibliographié

- [1] **G. Pluvinage (2003)** « Un siècle d'essai Charpy: De la résistance vive à la rupture à la mécanique de rupture d'entaille ». Mécanique & Industrie, 4 pp. 197-212.
- [2] **M. V. Riabov et al. (2002)** « Effect of Low Temperatures on Charpy Impact Toughness of Austempered Ductile Irons». ASM International, JMEPEG 11: pp. 496–503.
- [3] **E. Lucon (2008)** « Influence of striking edge radius (2 vs. 8mm) on instrumented Charpy data and absorbed energies». Int. Journal of Fracture, DOI 10.1007/s10704-008-9283-6.
- [4] **A.A. Benzerga et al. (2002)** «Size Effects in the Charpy V-Notch Test». Int. Journal of Fracture, 116: pp. 275–296.
- [5] **Manahan Sr., (1996)**- Advances in notched bar impact testing. A100 year old test gets a face lift. ASTM Standardizations news, pages 23-29.
- [6] **Siewert et al, (2000)** – The history and importance of impact testing. In Sievert, T, and Manahan, M., editors, pendulum Impact Testing: Acentury of Progress, pages 3-16. ASTM STP 1380.
- [7] **Russel, (1898)**- Experiments with a new machine for testing materials by impact. Transactions of American society of civil Engineers, 39(826): 237-250.
- [8] **Charpy, G.(1901)**- Note sur l'essai des métaux à la flexion par choc de barreaux entaillés. Mémoires et comptes rendu de la société des ingénieurs civils de France, 848-877.
- [9] **Charpy, G. (1904)**- Sur l'essai des métaux par flexion de barreaux entaillés. Mémoires et comptes rendu de la société des ingénieurs civils de France, 468-482.
- [10] **AFNOR, (1990)**-Essai de flexion par choc sur éprouvette Charpy. Partie 1 : méthode d'essai. Association française de normalisation, la Défense, France.
- [11] **AFNOR, (1902)**- Essai de flexion par choc sur éprouvette Charpy. Partie 2 : Vérification de la machine d'essai. Association française de normalisation, la Défense, France.
- [12] **FISCHER** –« « Stahl Und Eissen » »541-547(1928),et extrait de la revue de métallurgie ,295(1929)
- [13] **KUNZE**-« « Meteillung dtsch. Mat. Prufungsanstalt » », 44-58,27-35(1930),et de extrait de la revue de métallurgie ,1 et 41 (1932)
- [14] **MIMEY**-revue d'artillerie juillet 1911
- [15] **STANTON et BASTON** -« « proceeding of the institution of civil engineers » » (1920),et extrait de la revue de métallurgie ,460 (1921)
- [16] **MOSER** -« « Stahl Und Eissen » » 90-975(1922), et extrait de la revue de métallurgie 635 (1922)

- [17] **MOSER** -« « Kruppsche Monatshefte » » 48 (1924), et extrait de la revue de métallurgie 82 (1925), et « « Stahl Und Eissen » », 1879 (1925) et extrait de la revue de métallurgie, 399 (1926)
- [18] **STRIBECK** « « Stahl Und Eissen » »,405-408 (1922) et extrait de la revue de métallurgie, 638 (1922)
- [19] **MAILANDER** -« « Kruppsche Monatshefte » » 16-21 (1924), et extrait de la revue de métallurgie 55 (1925).
- [20] **BONDOLFI**-« « La Metallurgia Italiana » », octobre (1925), et extrait de la revue de métallurgie, 348 (1926)
- [21] **MAILANDER**-« « Stahl Und Eissen » » 1752-1757 (1926), et extrait de la revue de métallurgie 300 (1927).
- [22] Société D'encouragement Pour L'industrie Nationale : « « contribution à l'étude de la fragilité dans les fers et les aciers » » (1904)
- [23] **GUILLET** – revue de métallurgie 212-224 (1921)
- [24] **GRAEVES ET MOORE**-« « proceeding of the institution of civil engineers » » (1920), et extrait de la revue de métallurgie ,463 (1921)
- [25] **SANITER ET BAKER** «congrès de métallurgie liège » » juin (1922), et extrait de la revue de métallurgie ,633 (1922)
- [26] **HADFIELD et MAIN** -« « Minutes of proceeding of the institution of civil engineers » » (1920), et extrait de la revue de métallurgie ,458 (1921) .
- [27] **YAMADA** -« «Science Repots of the Tohoku university » »1179-1211 (1928), et extrait de la revue de métallurgie ,147 (1930)
- [28] **GUILLET – REVILLON**-revue de métallurgie 94 (1909)
- [29] **CHEVNARD** –revue de métallurgie ,209-214 (1922)
- [30] **GUILLET – COURNOT**-revue de métallurgie 251-221 (1922)
- [31] **GRAVES ET JONES** -« « iron and steel institute» » septembre- (1925), et extrait de la revue de métallurgie ,1 (1927)
- [32] **A.SABER** « Analyse de fabrication ».
- [33] **R. Dietrich, D. Garsaud, S. Gentillon, M. Nicolas** Précis de méthodes d'usinage ; « méthodologie, production et normalisation »,5^oédition.