

4/01
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie Mécanique

CV

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état
en Génie Mécanique

THEME

المعهد الوطني للتكنولوجيا
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

CONCEPTION ET REALISATION D'UNE
CELLULE POUR FATIGUE SOUS
CORROSION ADAPTEE A LA MACHINE
DE FLEXION ROTATIVE

31 PLANCHES

Proposé et dirigé par :

M^r Y. BELKACEMI

M^r E. GUERGUEB

Réalisé par :

M^r KOSSEIR Merouane

Promotion

Septembre 2001

E.N.P. 10 Avenue Hassen Badi, 16200, EL-HARRACH- ALGER

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département de Génie Mécanique



MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état
en Génie Mécanique



THEME

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

**CONCEPTION ET REALISATION D'UNE
CELLULE POUR FATIGUE SOUS
CORROSION ADAPTEE A LA MACHINE
DE FLEXION ROTATIVE**

Proposé et dirigé par :

M^r Y. BELKACEMI

M^r B. GUERGUEB

Réalisé par :

M^r KOSSEIR Merouane

Promotion

Septembre 2001

E.N.P.10 Avenue Hassen Badi, 16200, EL-HARRACH- ALGER

REMERCIEMENTS

JE remercie vivement toutes les personnes qui ont contribués a présenter ce modeste travail :

Mes remerciements vont particulièrement à messieurs :
Mr B.Guergueb et Mr Y.Belkacemi.

Pour leurs soutient constant et les conseils qu'il me prodigué pour l'élaboration de ce modeste travail.

Mes remerciement vont aussi à mes collègues M. TOUBALI et M^{lle} ADAMOU et mes professeurs M^{ers} : Benbraïka, BelhadeF , Halli, Rieche, et Benkoussas , pour l'aide qu'ils m'ont apportés pour réaliser mes expériences.

Sans oublier mes amis Yacine, et abdallâh, et les agents de l'atelier de département de génie mécanique.

ملخص:

يتمثل هذا العمل في تصميم و إنجاز خلية إعياء تحت تأثير التآكل تتكيف مع آلة اللف الدوراني الموجودة في مخبر الهندسة الميكانيكية لمعالجة تجارب في الإعياء تحت تأثير التآكل. تفقد كامل لكل العناصر المكونة للآلة للأخذ القياسات وإصلاح الأعطال و للإنجاز ملف تقني كامل مع وضع الرسومات التعريفية ورسم تجميعي للآلة مع رسومات تعريفية لخلية التآكل.

كلمات مفتاحية : الإعياء و التآكل , تجربة اللف الدوراني , خلية التآكل , رسم تعريفية.

RESUME

Ce travail, consiste à concevoir et réaliser une cellule pour fatigue sous corrosion pour la machine de flexion rotative du laboratoire de génie mécanique, pour manipuler des essais en fatigue sous corrosion. Une vérification complète des organes de la machine pour prendre les mesures et de réparer les anomalies, pour réaliser un manuel pour cette dernière avec des dessins de définition et un dessin d'ensemble, qui illustre tout les détails ; et de réaliser des dessins de définitions de la cellule de corrosion.

Mots clés : fatigue sous corrosion, cellule de corrosion, essai de flexion rotative, dessin de définition, machine d'essai.

ABSTRACT

This work, consist in conceiving and to achieve a cell for fatigue under corrosion for the machine of rotary bending of the mechanical engineering laboratory, to manipulate some tests in fatigue under corrosion. A complete verification of the organs of the machine to take the measures and to repair the anomalies, to achieve a manual for this last with drawings of definition and a general drawing, that illustrates all retail them; and to achieve drawings of definitions of the corrosion cell.

.Key words: corrosion fatigue, cell of corrosion, rotating-bending test, drawing of definition, machine of the test.

SOMMAIRE

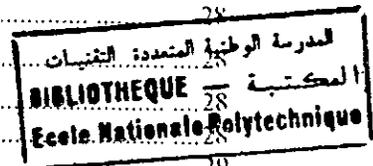
INTRODUCTION GENERALE ET HISTORIQUE :	1
CHAPITRE I : GENERALITES FATIGUE.....	5
I.1-Introduction :	5
I.2-Fatigue et endurance :	6
I.2.1-Définition :	6
I.2.2-Endommagement par fatigue :	6
I.2.3-Limite de fatigue :	6
I.2.4-Endurance :	7
I.2.5-Limite d'endurance :	7
I.3-Définitions et symbolisation des termes utilisés en fatigue :	7
I.4-Mécanisme de la fatigue :	9
I.5-Les cassures par fatigue :	9
I.6-Flexion rotative:	10
I.7-Influence de divers facteurs sur la fatigue :	10
I.7.1-Conditions d'application des efforts :	11
I.7.1.1-La fréquence :	11
I.7.1.2-Les contraintes appliquées :	11
I.7.1.3-Les contraintes internes ou résiduelles :	11
I.7.2-Influence de dimensions et forme des pièces :	11
I.7.2.1-Effet d'échelle :	11
I.7.2.2-Effet d'entaille :	12
I.7.3-Influence de la température :	12
I.7.4-Influence de la corrosion :	12
CHAPITRE II : LES ESSAIS DE FATIGUE	14
II.1-Introduction :	14
II.2-Classification générale des sollicitations dans l'essai de fatigue :	14
II.3-Classification des essais et des machines d'essais de fatigue :	16
II.3.1-Essais de fatigue par flexion rotative :	16
II.3.1.1-Principe des essais de flexion rotative :	16
II.3.1.2-Machine de flexion rotative à moment constant existante dans le laboratoire:	17
II.3.1.3-Mode de sollicitation :	18
II.4-Eprouvettes utilisées dans l'essai de fatigue :	19
II.4.1-Modèles :	19
II.5-Résultats des essais de fatigue :	21
II.5.1-Courbe d'endurance ou de Wöhler :	21
II.5.2-Méthodes de détermination de la limite d'endurance :	22
a) Essais de longue durée :	22
b) Méthodes statistiques :	22
c) Méthodes d'extrapolation :	23
d) Méthodes rapides directes :	23
e) Méthodes rapides indirectes :	25
II.6-Conclusion :	25

CHAPITRE III : LA FATIGUE SOUS CORROSION

III.1-Introduction :	28
III.2-La corrosion :	28
III.2.1-Définition :	28
III.2.2-Notions de base :	29
III.3-Origine de différents types de corrosion :	30
III.4-Phénomène de passivité :	30
III.5-Fatigue et corrosion simultanées :	31
III.5.1-Manifestation des phénomènes :	32
III.5.1.1. Amorçage des fissures :	32
III.5.1.2. Propagation des fissures :	33
III.5.2-L'influence du phénomène fatigue corrosion :	34
III.6-Facteurs d'influence sur la fatigue sous corrosion :	35
III.6.1-Paramètres physico-chimiques :	35
III.6.2-Paramètres mécaniques :	36
III.6.3-Paramètres géométriques :	37
III.7-Conclusion:	37

CHAPITRE IV : ESSAIS DE FATIGUE SOUS CORROSION

IV.1-Introduction :	39
IV.2-Essais de Fatigue-corrosion :	39
IV.2.1-Définitions :	39
IV.2.2-Etude expérimentale de la Fatigue-corrosion :	40
IV.3-Dispositifs et différents essais de fatigue sous corrosion :	40
IV.3.1-Dispositifs :	40
IV.3.2-Principaux essais de fatigue-corrosion :	42
IV.3.2.1-Essai en récipient ouvert :	42
IV.3.2.2-Essais dans les liquides en mouvement :	42
IV.3.2.3-Essai en brouillard salin :	42
IV.4-Méthode expérimentales :	42
IV.4.1-Objectifs et but :	42
IV.4.2-Méthodes d'étude au laboratoire :	43
IV.4.3-Mesures associées :	43
IV.4.4-Milieu corrosif :	44
IV.4.5-Cellule de corrosion :	44
IV.5-Conclusion :	45



CHAPITRE V : ETUDE EXPERIMENTALE	49
V.1-Introduction :	49
V.2-La machine d'essai de flexion rotative :	49
V.2.1-Présentation de la machine :	49
V.2.2-Principe de fonctionnement et description de la machine :	49
V.3-Travaux effectués sur la machine :	51
V.3.1-Démontage et vérification de la fonctionnalité de la machine :	51
V.3.2-Solution adoptée :	52
V.3.3-Les outils utilisés :	54
V.4-Procédé du fonctionnement (dessins):	54
V.5-Dessin de l'ensemble et de définition de la machine :	56
V.6-Conception et réalisation de la Cellule de corrosion :	57
V.6.1-Matière :	57
V.6.2-Géométrie :	57
V.6.3-Etanchéité :	60
V.6.4-Fixation et blocage :	61
V.6.5-Nature de milieu corrosif utilisé:	65
V.6.6-Circulation du liquide corrosif :	66
V.7-Préparation et manipulation des essais de fatigue sous corrosion :	66
V.7.1-Eprouvettes d'essais :	66
II.7.1.1-Matière :	66
II.7.1.2-Préparation et usinage :	66
V.7.2-Protocole des essais réalisés :	68
V.7.2.1-Résultats des essais réalisés :	68
V.8-Conclusion :	69

LISTE DES FIGURES

Fig.1.1- Cycle de contrainte.	8
Fig.11.1.A- Sollicitation alternées.	14
Fig.11.1.B- Sollicitation répétées.	15
Fig.11.1.C- Sollicitation ondulées.	15
Fig.11.2- Les différents modes de sollicitation.	17
Fig.11.3- Sollicitation de l'éprouvette	18
Fig.11.4- Eprouvette de flexion rotative à profil cylindrique.	19
Fig.11.5- Eprouvette de flexion rotative type Schenck.	19
Fig.11.6- Eprouvette d'essai en flexion rotative type Caquot.	20
Fig.11.7- Courbe de Wohler.	22
Fig.11.8- Principe de la méthode Prot de charge progressive.	25
Fig.III.1- Diagramme de la fatigue sous corrosion	31
Fig.III.2- Influence du milieu sur la durée avant rupture.	32
Fig.III.3- Influence de différents phénomènes sur la variation de la vitesse de propagation.	33
Fig.III.4- Vitesse de propagation des fissures, dans différents milieux :	
(a) air, (b) eau de mer, (c) eau de mer + H ₂ S[4].	34
Fig.III.5- Courbes de fatigue d'un acier au carbone à 0.56% C recuit ($R_m=64 \text{ kgf/mm}^2$).	34
Fig.III.6- Influence de l'humidité dans l'air et de l'aération et désaération de la solution à 3% NaCl sur le comportement en fatigue de l'acier AISI 4140.	35
Fig.III.7- Effet du pH de la solution corrosif sur la durée de vie en fatigue d'un acier doux en solution aérée 3% NaCl.	36
Fig.IV.1- Bac pour essai de flexion rotative en milieu corrosif.	41
Fig.IV.2- Essai en flexion rotative par un anneau liquide.	41
Fig.V.1- Principaux éléments de la machine.	50
Fig.V.2- Pince n°1.	52
Fig.V.3- Solution adaptée.	53

Fig.V.4-Pince n°2.	53
Fig.V.5-Schémas de la machine.	55
Fig.V.6-Cellule de corrosion.	58
Fig.V.7-Convercle de la cellule.	59
Fig.V.8-Joint à lèvres.	60
Fig.V.9-Système de maintien de la cellule.	62
Fig.V.10-Ensemble de fixation.	63
Fig.V.11-Cellule de corrosion.	64
Fig.V.12-Eprouvette de flexion rotative.	67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1: La composition chimique de l'eau de mer synthétique.	44
Tableau V.1: La composition de l'eau de mer Méditerranée en masse.	65
Tableau V.2 : la composition volumique des ions de la mer méditerranée.	65
Tableau V.3 : Essais de fatigue à l'air libre.	68
Tableau V.4 : Essais de fatigue sous corrosion.	69

Introduction Générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE ET HISTORIQUE

Le terme corrosion évoque, l'image de la rouille propre aux métaux ferreux. En réalité, la corrosion est la cause de l'altération et de la destruction de la plupart des matériaux naturels ou artificiels. Tout se corrode et tout milieu peut être corrosif suivant le matériau considéré. Le verre s'opacifie par l'action bactérienne, le béton se désagrège, les plastiques se décomposent sous l'action des impuretés de l'air et les matériaux s'oxydent dans l'eau.

La corrosion se trouve aussi sur les voitures et sur les ponts ou les sels de dégivrage combinés avec les intempéries détruisent les peintures et attaquent les structures.

Les plates-formes de forage représentent un ensemble des plus sollicités par la corrosion marine, ces structures peuvent se corroder et compromettre la sécurité du personnel. La corrosion, au sens large, peut s'exprimer comme la détérioration d'un matériau par le milieu dans lequel il se trouve. Ce phénomène n'est étudié scientifiquement que depuis 1830. Les progrès de la technique, qui ont amené l'utilisation sans cesse croissante des matériaux, ont entraîné aussi une augmentation grandissante des pertes par corrosion et ont conduit à en chercher les causes et à en trouver les solutions.

La corrosion ne s'étudie pas isolément, car elle fait intervenir plusieurs principes rattachés à la chimie, à l'électrochimie, à la métallurgie et à la physique.

La corrosion, est développée au rythme de l'industrialisation et elle grève lourdement la dépense d'énergie. Nombreux sont les exemples où la corrosion agit sur le milieu et qui font que celui-ci s'en trouve modifié à jamais.

Les pertes financières annuelles produites par la corrosion s'élevaient à 12 milliards de dollars par an au Canada en 1989, et en Grande-Bretagne elle atteignait 1365 milliards de livres, et 6 milliards de roubles en ex URSS et 19 milliards de marks pour l'Allemagne. Des sources plus récentes indiquent que les pertes financières représentent un pourcentage annuel moyen de 3.5% du produit national brut.[3]

Dans le chapitre **I**, nous présentons quelques notions et généralités sur la fatigue. On parlera des définitions utilisées en fatigue.

Le chapitre **II**, est consacré aux essais de fatigue en général, les machines de flexion rotative utilisées et les méthodes de la détermination de la limite d'endurance.

Le chapitre **III**, est consacré au phénomène de fatigue et corrosion simultanée, et les principales définitions dans ce domaine, et les différents facteurs d'influence sur ce phénomène.

Dans le chapitre **IV** nous parlons sur les différents types et modes d'essai en fatigue corrosion.

Le chapitre **V**, est consacré à l'étude expérimentale, passant par les travaux effectués sur notre machine de flexion rotative, et la méthode suivie pour la conception et la réalisation de la cellule de corrosion, et les essais réalisés.

Une annexe, qui présente les dessins de définitions et un dessin d'ensemble de la machine d'essai.

Nous terminons notre étude par une conclusion générale.

I

Généralité sur la Fatigue

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS FATIGUE

I.1-Introduction :

On sait, depuis longtemps, que certaines pièces de machines, soumises à des efforts variables et répétés un grand nombre de fois, se rompent brusquement et sans déformation permanente annonciatrice de la rupture, tandis que les mêmes pièces soumises à des efforts constants, souvent plus importants, mais appliqués de façon continue, résistent correctement. Ainsi, de fait que les efforts sont variables, leurs action est plus dangereuse.

On a appelé fatigue la cause, de cette défaillance à laquelle n'échappe aucun métal sous l'action des efforts variables.

On s'est préoccupé, dès l'origine même de la construction mécanique, de connaître la manière dont se comportent, du point de vue de leur résistance et de leur durée, les pièces qui ont à supporter de tels efforts. [6]

La rupture n'a pas lieu quel que soit le nombre de sollicitations, si l'écart extrême, entre l'effort maximal et l'effort minimal, est inférieur à une certaine valeur limite. Cette valeur limite a été appelée par Wohler : résistance en service ; par Tresca : charge naturelle de rupture ; par Bauschinger : limite élastique naturelle qui correspond à ce que l'on appelle aujourd'hui la limite d'endurance ou la limite de fatigue. [6]

Le problème de la résistance à la fatigue, se pose à chaque fois que les métaux sont sollicités à des efforts d'intensité périodiquement variable. [2]

1.2-Fatigue et endurance :

1.2.1-Définition :

La fatigue est un endommagement mécanique qui modifié à chaque cycle de sollicitation les propriétés du métal par la création et la migration de dislocations. A partir d'un certain nombre de cycles, les perturbations du réseau atomique conduisent à la formation de défauts très importants, localisés dans plusieurs domaines au voisinage immédiat de la surface, permettant l'apparition de fissures microscopiques.[2]

1.2.2-Endommagement par fatigue :

Dés les premiers cycles appliqués à la pièce, on observe la formation des bandes de glissement. Avec l'augmentation de nombre de cycles, il y aura multiplication de ces bandes et l'apparition des bandes persistantes. Ces bandes sont caractéristiques de la fatigue. Leur rôle est déterminant dans l'endommagement des matériaux. Ces dernières sont le siège de l'apparition de micro-fissures le long des lignes de glissement.[1]

Pour une contrainte moyenne σ_M , la limite d'endurance est la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il est constaté 50% de rupture après un nombre fini N de sollicitations. Cette limite d'endurance en contrainte purement alternées s'écrit $\sigma_D(N)$, au-dessous de laquelle la rupture ne se produit jamais quel que soit le nombre de cycles.

1.2.3-Limite de fatigue :

Quel que soit le type de machine utilisé et la nature de l'essai, la détermination de l'endurance du matériau se fait de la façon suivante :

Après avoir choisi la contrainte maximale à appliquer sur l'éprouvette, on mesure le nombre N de cycles qui provoque la rupture. On trace alors la courbe, appelée *courbe de Wohler* ou courbe d'endurance qui fournit la relation entre la contrainte maximale et N .

Dans certains cas, pour limiter la durée des essais, on cherche une limite de fatigue conventionnelle.

La valeur de σ_{max} pour laquelle le nombre de cycle qui provoque la rupture est au moins égale à une valeur fixée à l'avance.

Actuellement, il n'a pas encore été possible de bâtir une théorie scientifique générale des phénomènes de fatigue. On possède seulement des résultats expérimentaux, obtenus dans des cas particuliers très nombreux, mais encore insuffisants. En particulier, il n'existe pas de formules générales permettant de relier la limite de fatigue σ_D , pour chaque type de sollicitation, aux caractéristiques mécaniques statiques R_e , R_r , $A\%$. [13]

1.2.4-Endurance :

On appelle endurance la capacité de résistance à la fatigue des pièces et des structures. [1].

1.2.5-Limite d'endurance :

La limite d'endurance est défini comme la limite supérieure de l'amplitude de la contrainte périodique qui peut être appliquée pendant un certain nombre de cycles sans amener la rupture. [6]

1.3-Définitions et symbolisation des termes utilisés en fatigue :

Contrainte nominale : la contrainte prise en compte au cours de l'essai de fatigue est une contrainte nominale, elle est calculée par rapport à la section nette de la pièce ou de l'éprouvette considérée, où elle ne fait pas intervenir la concentration de contraintes due à des entailles ou d'autres causes.

Cycle de contrainte : il y a cycle de contrainte quand une contrainte d'amplitude variable dans le temps se répète périodiquement ; Le plus utilisé est le cycle *sinusoïdale*, la contrainte cyclique peut être considérée comme superposition d'une contrainte statique qui est la contrainte moyenne et une contrainte purement alternée comme dynamique. [16]

Contrainte maximale σ_{max} : la plus grande valeur algébrique prise périodiquement par la contrainte.

Contrainte minimale σ_{min} : la plus petite valeur algébrique prise périodiquement par la contrainte.

Contrainte moyenne σ_m : la moyenne algébrique des contraintes maximale et minimale.

$$\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min}) / 2.$$

Amplitude de contrainte σ_a : la contrainte alternée égale à la moitié de la différence algébrique entre (σ_{max}) et (σ_{min}).

$$\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) / 2.$$

Rapport de contrainte : c'est le rapport algébrique de la contrainte dans un cycle.

$$R\sigma = [\sigma_{min} / \sigma_{max}].$$

Rapport d'endurance : c'est le rapport de la limite d'endurance à la charge de rupture en traction.

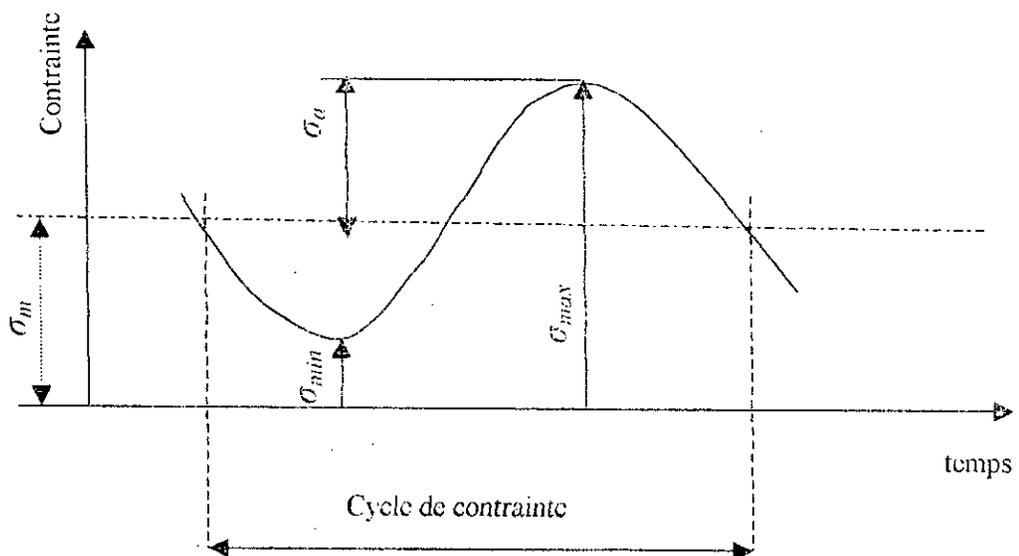


Fig.I.1- Cycle de contrainte.

1.4-Mécanisme de la fatigue :

a) Période de germination ou période d'amorçage :

La fatigue des métaux commence par un dépassement très localisé de la limite élastique, au voisinage des défauts, les concentrations des contraintes créent des micro déformations plastiques cycliques.

L'amorçage des micro fissures de fatigue est difficile à mettre en évidence et à étudier, suivant le matériau et le niveau de sollicitation, divers mécanismes peuvent intervenir :

- .. Montée des dislocations s'accompagnant de formation de lacunes ;
- .. Formation de bandes de glissement persistantes et décohésions localisées souvent à la surface de l'échantillon.

b) Période de propagation :

Cette période peut elle-même être scindée en deux phases distinctes :

- .. Période de propagation interne des micro fissures précitées, qui suivent les bandes de glissement dans lesquelles elles sont nées, en restant approximativement parallèle au plan de la scission maximale, leur vitesse de propagation est alors très faible et leur longueur n'intéresse au plus que quelques grains.
- .. Le champ de contrainte évoluant lorsque l'on pénètre à l'intérieur de la pièce, une des micro fissures va quitter le plan de scission maximale pour suivre le plan perpendiculaire de la contrainte de tension maximale.

c) Rupture brutale :

Le développement des fissures diminue la section soumise aux sollicitations, ce qui provoque la rupture du métal.

1.5-Les cassures par fatigue :

Dans les cassures de fatigue par flexion, on reconnaît aisément deux zones distincts : la cassure par fatigue proprement dite et la cassure dite « résiduelle ». la première est mate, avec un aspect velouté ; la seconde a une structure grossière et un aspect brillant.

Lorsque l'éprouvette est pourvue d'une entaille circulaire, la vitesse de propagation de la fissure le long du contour de la section droite est encore accrue. Si la charge est forte au-dessus de la limite d'endurance, la cassure résiduelle occupe le centre de la section ; si la charge est, au contraire, peu supérieure à la limite d'endurance, les défauts superficiels fortuits favorisent l'amorçage de la fissure en un point, de préférence aux autres, et la progression se poursuit en manifestant une symétrie par rapport au diamètre qui passe par le point d'amorçage. La cassure résiduelle occupe une position excentrée, si le métal est très tenace, cette cassure touche une portion du contour de section ; si le métal est cassant, la cassure résiduelle, bien qu'excentrée, n'arrive pas au contact du contour.

S'il s'agit d'une sollicitation par flexion les fissures de fatigue cheminent, en général, normalement aux isostatiques.

1.6-Flexion rotative:

En raison même du mode de sollicitation, la fissure, amorcée en un point du contour de la section droite, tend à se propager le long de ce contour, où le maximum de la sollicitation est plus élevé qu'au voisinage du centre. Cependant, si la charge excède de beaucoup la limite d'endurance, la rupture intervient précocement, alors que la fissure a encore peu progressé dans la pièce. Si, au contraire, la charge dépasse de peu la limite d'endurance, la fissure peut accentuer sa propagation et la cassure résiduelle occupe une aire plus petite. [3]

1.7-Influence de divers facteurs sur la fatigue :

Nombreux sont les facteurs dont l'influence a été étudiée du point de vue de la fatigue. Indépendamment du métal, on peut citer :

A. Les conditions d'application des efforts :

- La fréquence des contraintes cycliques ;
- Succession de périodes de contrainte et de périodes de repos ;
- Surcharge et variations momentanées des efforts ;
- Les contraintes internes et les sollicitations externes.

B. La dimension et la forme des pièces, l'état et la nature de leur surface ;

C. La température ;

D. Les actions chimiques :

- La corrosion ;
- L'oxydation par frottement.

I.7.1-Conditions d'application des efforts :**I.7.1.1-La fréquence :**

Dans les phénomènes de fatigue, la variation périodique de la contrainte produit une variation périodique de la déformation qui est, suivant le cas, un allongement, un raccourcissement, une flèche ou un angle de torsion.

I.7.1.2-Les contraintes appliquées :

La limite d'endurance d'un métal n'est pas une constante. Elle peut être augmentée ou diminuée sensiblement selon la manière dont les contraintes sont appliquées aux pièces en service.

I.7.1.3-Les contraintes internes ou résiduelles :

Les contraintes internes se superposent aux contraintes appliquées pour donner la contrainte réelle s'exerçant en un point de la pièce et en particulier de sa surface. Elle ont donc une influence sur l'endurance.[6]

I.7.2-Influence de dimensions et forme des pièces :**I.7.2.1-Effet d'échelle :**

L'effet d'échelle doit être pris en considération pour permettre de comparer non seulement l'endurance des pièces de machines et celle des éprouvettes, qui sont généralement de petites dimensions, mais aussi l'endurance des éprouvettes de sections différentes et de même forme.

En flexion rotative ou plane la diminution observée de la limite d'endurance avec l'augmentation de longueur de l'éprouvette est étroitement liée à la nature statistique de l'effet d'échelle.

1.7.2.2-Effet d'entaille :

Lorsqu'on fait une entaille circulaire sur une éprouvette, leur effet s'explique par l'augmentation de la contrainte au fond de l'entaille. La présence d'une entaille transversale modifie en effet la répartition des contraintes à son niveau.

D'une façon générale, un changement de section entraîné par la présence d'une entaille, d'un filetage, d'un trou, conduit à modifier la distribution uniforme des contraintes et à faire apparaître localement des pointes de contrainte.

Cette concentration de contrainte locale est mesurée à l'aide du coefficient de concentration de contrainte définis par : $K_t \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$ (I.1)

L'effet d'entaille en fatigue se mesure par le rapport :

$$K_f = \frac{\text{limite d'endurance sur éprouvettes lisses}}{\text{limite d'endurance sur éprouvettes entaillées}} \quad (I.2)$$

1.7.3-Influence de la température :

Cette influence a été étudiée principalement pour les aciers, les alliages réfractaires et les alliages légers, en vue de leur applications à haute et à basse température.

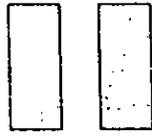
Dans les essais de fatigue, l'influence de la température ambiante est plus souvent négligée ; elle est cependant appréciable pour les aciers et il est recommandé de noter la température moyenne des essais.

1.7.4-Influence de la corrosion :

Haigh a fait des essais comparatifs de résistance à la fatigue sur éprouvettes préalablement attaquées ou non par la corrosion ou corrodées au cours même de l'essai de fatigue ; Il résulte de ces expériences que la diminution de résistance à la fatigue par corrosion avant l'essai est en général faible, tandis que l'influence de la corrosion exercée durant l'essai de fatigue est considérable.

L'influence de la corrosion peut donc être envisagée de deux points de vue, selon que :

- Les efforts de fatigue s'exercent sur les pièces préalablement corrodées ;
- La fatigue et la corrosion agissent simultanément. [12]



Essais de fatigue

CHAPITRE II : LES ESSAIS DE FATIGUE

II.1-Introduction :

Les recherches poursuivies en fatigue ont montré l'insuffisance des essais ordinaires des métaux par traction, flexion, dureté ; pour les qualifier avec exactitude en vue des applications courantes où les efforts sont le plus souvent variables.

Il est donc indispensable de faire sur des éprouvettes et sur les pièces elles-mêmes des essais dans des conditions aussi voisines que possible des conditions d'utilisation. De tels essais sont appelés des essais d'endurance ou de fatigue.[6]

Nous ne décrivons pas en détail les multiples dispositifs et méthodes d'essai qui existent, nous indiquerons simplement quels sont les principaux types de machines, puis nous exposons les modes d'essai.

II.2-Classification générale des sollicitations dans l'essai de fatigue :

a) Essais sous amplitude constante :

En général, les sollicitations de fatigue résultent d'efforts combinés et on peut distinguer trois types :

Sollicitations alternées : les efforts changent de sens alternativement ; un cas particulier est celui où leurs valeurs extrêmes sont égales et de signe contraire : $-\sigma$ et $+\sigma$; la valeur moyenne étant nulle. (Fig.II.1.A)

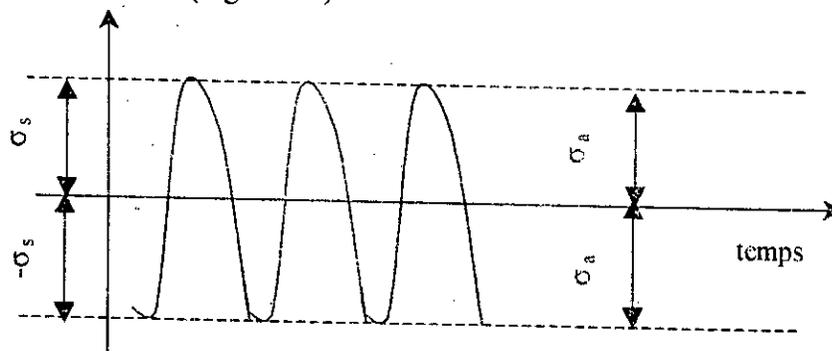


Fig.II.1.A-Sollicitation alternées.

Sollicitations répétées : les efforts sont toujours de même sens et varient de zéro à une valeur soit positive, soit négative. Les valeurs extrêmes sont 0 et $+\sigma$; et 0 et $-\sigma$; la valeur moyenne étant $+\sigma/2$, soit $-\sigma/2$. (fig.II.1.B)

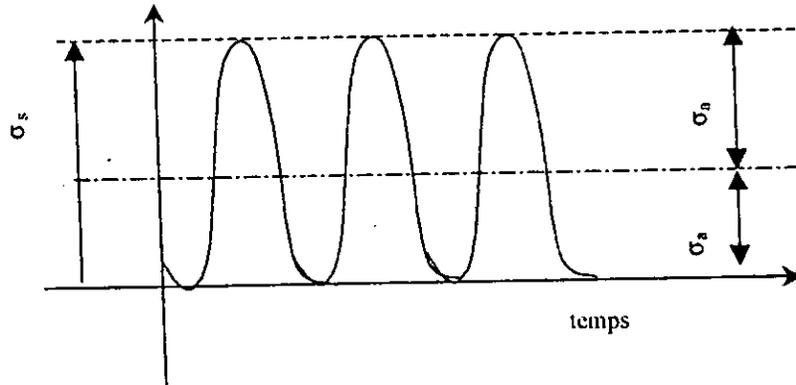


Fig.II.1.B- Sollicitation

Sollicitations ondulées : les variations des efforts a lieu de part et d'autre d'une certaine valeur moyenne non nulle, soit positive ou négative ; la valeur moyenne minimale d'aureure différente de zéro ; la valeur moyenne est égale à : $(\sigma_{\min} + \sigma_{\max})/2$. (fig.II.1.C)

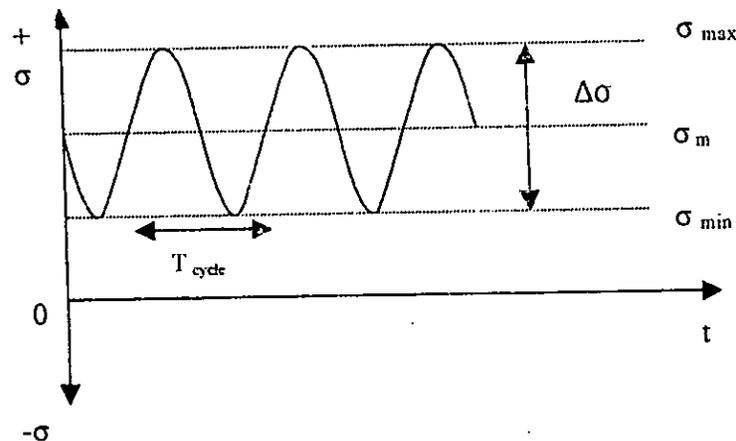


Fig.II.1.C - Sollicitation ondulées.

D'une façon générale, tout effort périodique peut être considéré comme la résultante d'un effort constant ou statique σ_m et d'un effort alternatif d'amplitude σ_a .

Si $\sigma_m < \sigma_a$, les efforts sont alternés.

Si $\sigma_m = \sigma_a$, les efforts sont répétés.

Si $\sigma_m > \sigma_a$, les efforts sont ondulés.

b) Essais sous amplitude variable :

Pour se rapprocher des conditions de la pratique, on a cherché à effectuer des essais sous amplitudes variables.

Dans la pratique, lorsque des pièces supportent des cycles d'amplitude variable, les fortes sollicitations sont, en général, très rares tandis que les sollicitations moyennes prédominent.[6]

II.3-Classification des essais et des machines d'essais de fatigue :

On peut établir une classification d'après la nature des efforts agissants, quel que soit le mode de sollicitation en fonction du temps. On a quatre catégories principales d'essai :

- Essais sous efforts axiaux (tension, compression) ;
- Essais de flexion plane ou rotative ;
- Essais de torsion ;
- Essais sous efforts combinés (flexion et torsion).

A ces différentes catégories d'essais correspondent les divers types de machines : pulsateurs, machine de flexion plane, machine de flexion rotative, machine de flexion par chocs, de torsion, machine à efforts combinés. Ces machines permettent d'effectuer des essais sous amplitude constante ou, à l'aide d'un système de programmation, des essais sous amplitudes variable.

II.3.1-Essais de fatigue par flexion rotative :

II.3.1.1-Principe des essais de flexion rotative :

Dans les essais de fatigue en flexion rotative, toutes les fibres consécutives, sauf la fibre neutre, sont successivement tendues puis comprimées. Ce mode de sollicitation s'obtient généralement par la rotation de l'éprouvette soumise à un effort de flexion de direction fixe.

L'éprouvette est montée en porte-à-faux ou sur deux appuis. Si l'effort est appliqué en un point, le moment de flexion varie linéairement le long de l'éprouvette(fig.II.2.a/b). Si

L'effort est appliqué en deux points, le moment de flexion peut être constant le long de la partie utile de l'éprouvette (fig.II.2.c/d).

L'effort est donné par le moyen d'une chape montée sur un roulement à billes. On obtient un axe d'application de l'effort perpendiculaire à l'axe de l'éprouvette, en utilisant un roulement à billes orientable.

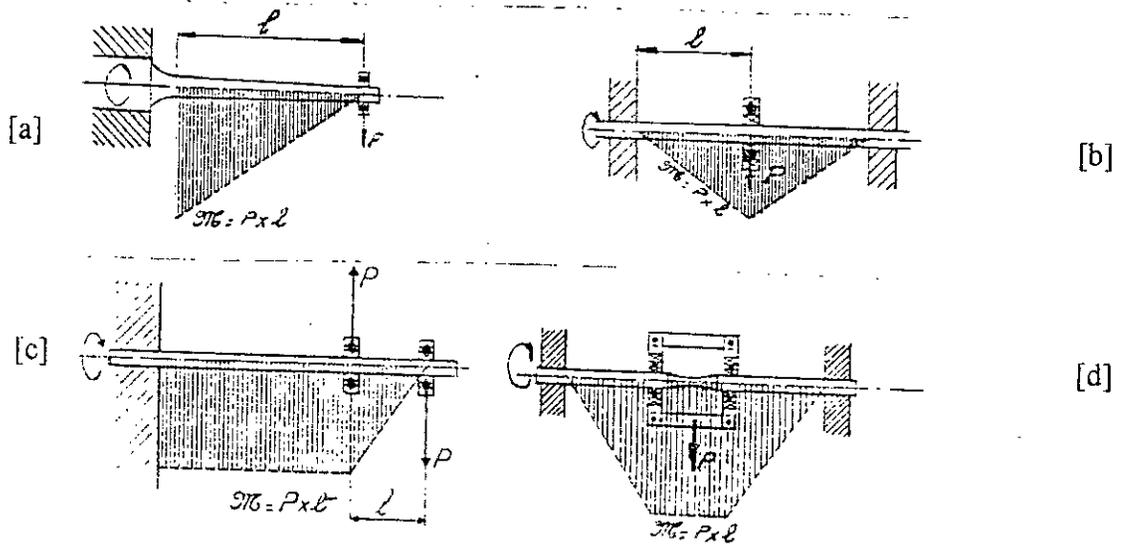


Fig.II.2-Les différents modes de sollicitation.

Pour les fibres externes qui sont les plus sollicitées, l'amplitude de la variation de l'effort est maximale ; qui se calcule dans chaque cas par la formule de Navier (II.1).

$$\sigma = M / (I / v) \tag{II.1}$$

Cette formule suppose une variation linéaire des contraintes du centre à la périphérie de l'éprouvette.

Les éprouvettes cylindriques sont essayées sur des machines à moment constant. Dans ce cas, la rupture de l'éprouvette peut se produire indifféremment sur toute la partie utile.

II.3.1.2-Machine de flexion rotative à moment constant existante dans le laboratoire:

L'éprouvette est appuyée à ses extrémités et l'effort est appliqué en deux points (fig.II.3). La charge est donnée par un système de balance au moyen d'un poids curseur.

II.3.1.3-Mode de sollicitation :

La sollicitation sur la machine de flexion rotative, est modélisée par une flexion à quatre points d'une poutre, (fig.II.3). De cette manière, l'éprouvette est soumise à moment fléchissant constant sur la partie utile de l'éprouvette.

Les contraintes agissant sur chaque fibre varient ainsi en fonction du temps, suivant une fonction sinusoïdale et sont purement alternées ($\sigma_m=0$ et $R=-1$). Chaque tour correspond à un cycle ou une période d'effort.

Pour les fibres externes qui sont les plus sollicitées, l'amplitude de l'effort est maximale, c'est cette amplitude qui intervient dans le calcul de la contrainte. La fréquence des révolutions étant constante (46Hz) pendant toute la durée de l'essai, la contrainte de la fibre externe est donnée par la formule de Navier :

Avec

M : Moment fléchissant par rapport à la section considérée ;

P : la charge appliquée ;

L : la longueur du bras du levier ;

I : Moment d'inertie de la section par rapport à l'axe neutre ;

v : distance de la fibre externe à la fibre neutre.

$$(I/v) = (\pi*d^3)/32 \quad (II.2)$$

$$\sigma = (P*L) / (\pi*(d^3/32)) \quad (II.3)$$

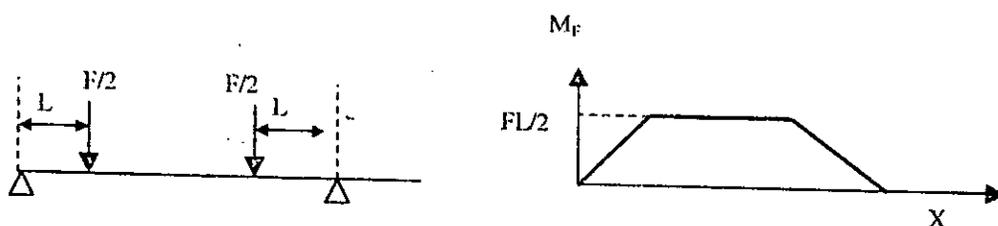


Fig.II.3-Sollicitation de l'éprouvette

II.4-Eprouvettes utilisées dans l'essai de fatigue :

II.4.1-Modèles :

Les éprouvettes utilisées pour les essais de fatigue sont très diverses tant du point de vue forme que de dimensions. On distingue deux types principaux : les éprouvettes de révolution à section circulaire et les éprouvettes prismatiques à section rectangulaire.

↳ Eprouvettes de révolutions à section circulaire :

Peuvent être cylindriques ou conique ; un exemple utilisé dans les essais d'une éprouvette cylindrique est donné par la figure(fig.II.4) .

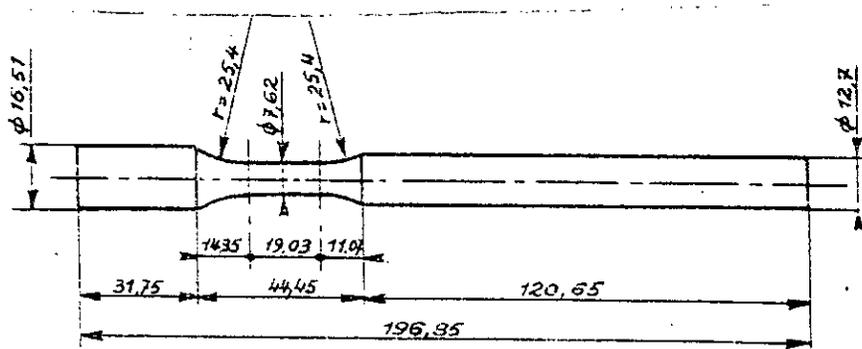


Fig.II.4-Eprouvette de flexion rotative à profil cylindrique.

Elle peuvent posséder d'une forme toroïdale à grand rayon de gorge et permettant de localiser la section de rupture, comme le montre l'exemple de la figure(fig.II.5) et qui se monte sur les machines de flexion rotative américaine, tandis qu'on emploie très couramment les éprouvettes Schenck (fig.II.6) sur les machines de ce constructeur.

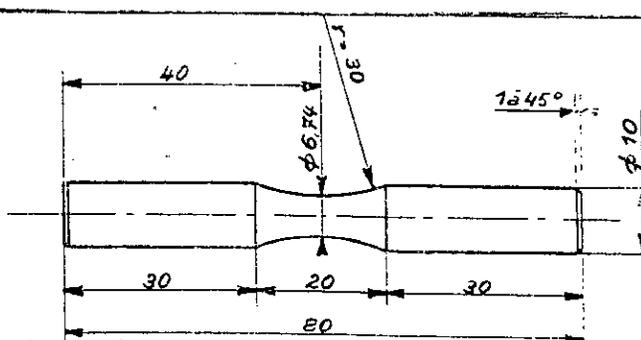


Fig.II.5- Eprouvette de flexion rotative type Schenck.

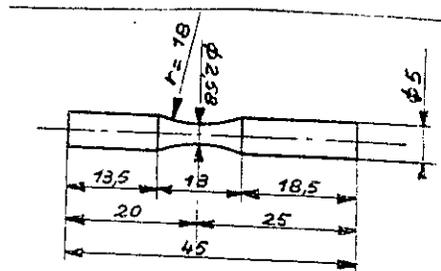


Fig.II.6-Eprouvette d'essai en flexion rotative type Caquot.

Pour faciliter les comparaisons de résultats, (ISO) propose l'emploi d'éprouvettes ayant des diamètres de 5- 6- 7.5- 9.5 et 12.5 mm avec une tolérance de ± 0.05 mm.

Si on compare des éprouvettes cylindrique ou des éprouvettes coniques, répondant à peu près à la condition d'égale résistance, avec des éprouvettes toroïdales dont la section minimale est voisine de la section des premières, la position de la cassure dépend des hétérogénéité présentes, alors que, dans les éprouvettes toroïdales, la cassure est imposée par la section minimale.

Dans ces conditions, on utilisera de préférence des éprouvettes cylindrique ou conique quand on voudra étudier l'influence de certains facteurs métallurgiques.

Les éprouvettes utilisées dans ces essais, sont toujours de révolution. Elles peuvent être coniques, cylindriques ou toroïdales.

Dans notre cas, on utilise des éprouvettes cylindriques, soumises à un effort de flexion de direction fixe, dont le moment de flexion est constant tout au long de la partie utile de l'éprouvette.

II.5-Résultats des essais de fatigue :

II.5.1-Courbe d'endurance ou de Wöhler :

Les résultats d'essais d'endurance exécutés sur des éprouvettes se traduisent par une courbe, dite de *Wöhler*, qui représente en fonction de l'amplitude σ_a , pour une contrainte moyenne σ_m donnée fixe, le nombre d'alternances nécessaire pour amener la rupture.

Si, pour tracer la courbe de Wöhler, on porte en abscisse non pas les nombres d'alternance, mais les logarithmes correspondants ; la partie asymptotique se transforme en une horizontale. Il est inutile de prolonger les essais au-delà du nombre limité pour déterminer l'endurance.

Le tracé de la courbe est assez facile à préciser dans le domaine des contraintes supérieures à la limite de fatigue où toutes les éprouvettes sont rompues pour un nombre de cycles relativement faible « zone de fatigue ».

Par contre dans le domaine des contraintes voisines de la limite de fatigue, où on observe à la fois des ruptures et des non-ruptures pour un grand nombre de cycles « zone d'endurance » ; la détermination est plus délicate.

Dans le cas général, on peut distinguer sur la courbe de Wöhler trois parties :

- L'asymptote horizontale correspondant à la limite d'endurance ;
- Une partie ascendante donnant la durée de vie en fonction de la contrainte ou endurance limitée ;
- La zone des contraintes élevées où apparaît une déformation plastique, c'est le domaine de la fatigue oligocyclique.

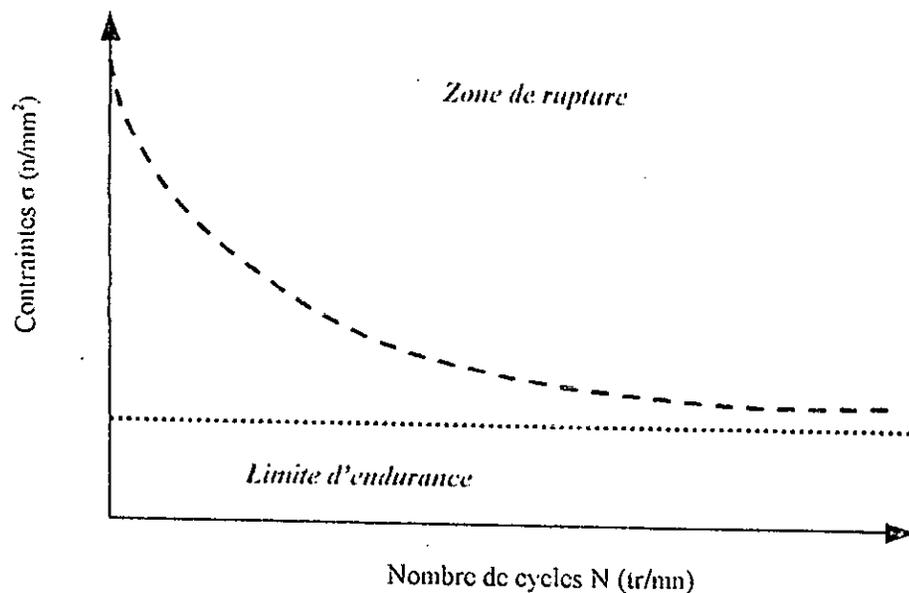


Fig. II.7 : Courbe de Wohler.

II.5.2-Méthodes de détermination de la limite d'endurance :

a) Essais de longue durée :

On essaie une série d'éprouvettes identiques, du même métal, sous des charges d'amplitude décroissante, et l'on détermine pour chacune d'elle le nombre correspondant de cycles, pour lesquels la rupture a lieu ou n'a pas lieu. Chaque éprouvette n'est soumise qu'à une seule charge pendant toute la durée de l'essai.

En pratique, si plus de 30 éprouvettes sont nécessaires pour une détermination rigoureuse, on estime qu'une douzaine d'éprouvettes essayées à des niveaux différents de telle sorte qu'il y en ait trois ou quatre non rompues, peut suffire à tracer la courbe de Wohler et à situer la limite d'endurance.[6]

b) Méthodes statistiques :

Le tracé de la courbe de Wohler et de limite d'endurance montre que les points figuratifs sont plus ou moins dispersés par rapport à la courbe présumée.

Pour réduire cette dispersion des résultats, il y a intérêt à déterminer avec précision les conditions de préparation et d'essai des éprouvettes conduisant à la plus faible dispersion et la maintenir constante pendant toute la durée des essais.

Ces essais qui nécessitent un grand nombre d'éprouvettes ont été peu pratiqués jusqu'à ces dernières années. Mais, ces méthodes se sont rapidement imposées par la rigueur de leur expérimentation et la précision de leurs résultats.

Parmi ces méthodes, il y a :

– *Méthode des probits* : cette méthode rigoureuse mais longue nécessite l'essai d'au moins 80 éprouvettes réparties par tirage au sort entre 4 ou 5 niveaux de contrainte.

Les niveaux de contrainte doivent être choisis de façon à encadrer la limite d'endurance présumée et l'espacement des niveaux doit être fixé pour qu'il restent dans la zone d'endurance.

– *Méthode d'essai en escalier* : qui nécessite au moins 15 éprouvettes. On choisit une série de niveaux de contrainte régulièrement espacés, on essaie successivement les éprouvettes pendant un nombre de cycles donné de la façon suivante. Si la première éprouvette essayée à un niveau voisin de la limite d'endurance supposée se rompt, l'éprouvette suivante est essayée au niveau immédiatement inférieur. Ce processus est ensuite poursuivi jusqu'à épuisement de toutes les éprouvettes.

– *Méthode d'approximation successive* : c'est celle qui demande moins d'éprouvettes puisqu'elle est applicable quel que soit le nombre dont on dispose, mais son emploi est assez délicat. Pratiquement, il faut au moins 9 éprouvettes.

c) *Méthodes d'extrapolation* :

En admettant que la courbe de Wohler est très droite sur un diagramme à échelle doublement logarithmique, diverses méthodes consistent à extrapoler cette droite soit jusqu'à un nombre de cycles déterminé, soit jusqu'à un niveau de contrainte donné.

d) Méthodes rapides directes :

Diverses méthodes pour déterminer rapidement la limite d'endurance soit à partir d'un petit nombre d'essais de fatigue (méthodes directes), soit en suivant la variation de certaines propriétés physiques au cours de la fatigue (méthodes indirectes).

-Méthodes de charge progressive (prot) :

Au lieu d'opérer à charge constante, on soumet chaque éprouvette à une charge progressivement croissante jusqu'à la rupture. Le principe de la méthode repose sur l'hypothèse que la courbe d'endurance de Wohler, avec échelle linéaire, peut être assimilée dans sa branche horizontale, à une hyperbole équilatère C (fig II.7). Rapportée à l'axe des contraintes et à l'axe des temps l'équation de cette hyperbole est :

$$(\sigma - \sigma_D) * t = k \quad (II.5)$$

σ désignant la contrainte, σ_D la limite d'endurance, t le nombre de cycles avant rupture ou, ce qui revient au même à une constante près, et k une constante.

On fait croître linéairement la contrainte σ en fonction du temps :

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha t \quad (II.6)$$

lorsque la contrainte initiale σ_0 est inférieure à la limite d'endurance, Prot admet qu'il ne se passe rien tant que σ n'a pas atteint σ_D . Prenant alors $\sigma_D - \sigma = 0$, il en déduit que la surface du triangle est constante et que l'équation de l'hyperbole équilatère s'écrit :

$$\sigma_R = \sigma_D + k \alpha^{1/2} \quad (II.7)$$

où σ_R est la contrainte de rupture.

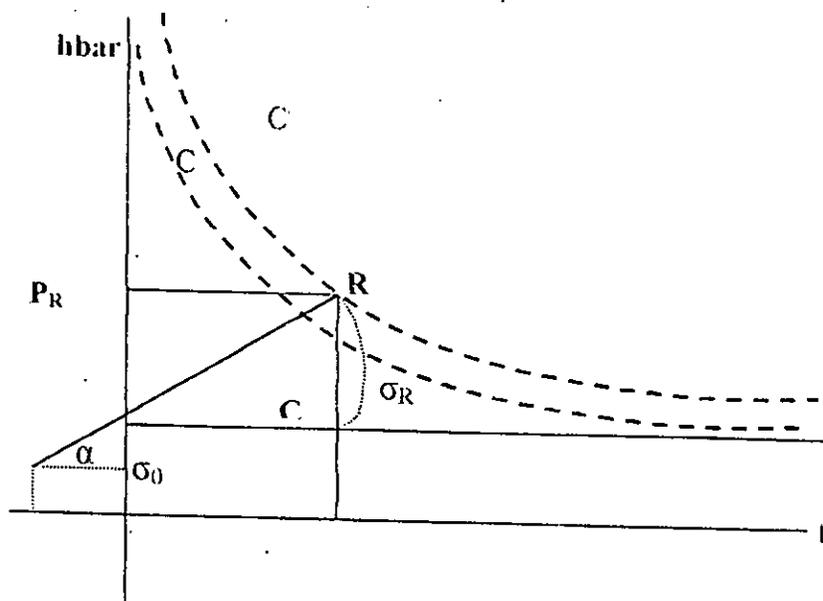


Fig.II.8-Principe de la méthode Prot de charge progressive.

e) Méthodes rapides indirectes :

-Etude de la flèche :

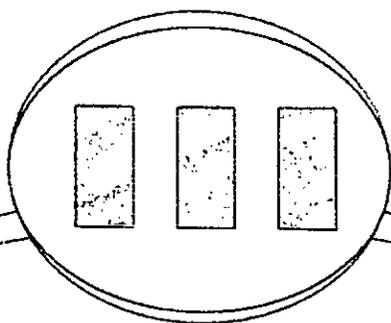
Si on mesure la flèche pendant toute la durée de l'essai de flexion rotative, on constate que, pour une contrainte assez élevée, la flèche augmente d'abord rapidement, elle atteint un maximum et diminue ensuite progressivement ; puis elle augmente de nouveau très vite et la rupture survient.

-Etude de l'échauffement :

En mesurant la température de l'éprouvette pendant l'essai de fatigue, la limite d'endurance pourrait se définir comme la contrainte maximale conduisant à un échauffement qui se stabilise quelle que soit la durée de l'essai.[6]

II.6-Conclusion :

L'intérêt de l'examen attentif d'une rupture de la pièce est une opération d'une grande importance dans le développement d'un produit. Elle est capable de montrer les causes de ruptures, donc les remèdes à appliquer pour que cet état de fait soit supprimé.



La Fatigue sous Corrosion

CHAPITRE III : LA FATIGUE SOUS CORROSION

III.1-Introduction :

La fatigue-corrosion est un phénomène qui attaque tous les métaux travaillant sous environnement corrosif. Elles peuvent provoquer la ruine des pièces au cours du fonctionnement.

L'intérêt de l'examen attentif d'une rupture de la pièce est une opération d'une grande importance dans le développement d'un produit.

Les essais comparatifs de résistance à la fatigue sur éprouvettes préalablement attaquées ou non par la corrosion ou corrodées au cours même de l'essai de fatigue ont fait l'objet de plusieurs essais. Il résulte de ces expériences que la diminution de résistance à la fatigue par corrosion avant l'essai est en général faible, tandis que l'influence de la corrosion exercée durant l'essai de fatigue est considérable.[6]

L'influence de la corrosion peut donc être envisagée de deux points de vue, selon que :

- ⇒ Les efforts de fatigue s'exercent sur les pièces préalablement corrodées ;
- ⇒ La fatigue et la corrosion agissent simultanément.

III.2-La corrosion :

III.2.1-Définition :

La corrosion est une dégradation du matériau ou de ces propriétés par réaction chimique avec l'environnement.[3]

La corrosion, est la cause de l'altération et de la destruction de la plupart des matériaux naturels ou artificiels, tout se corrode et tout milieu peut être corrosif suivant le matériau considéré. Les matériaux s'oxydent dans l'eau. L'air ambiant les eaux et les acides sont autant de milieux plus ou moins corrosifs.[4]

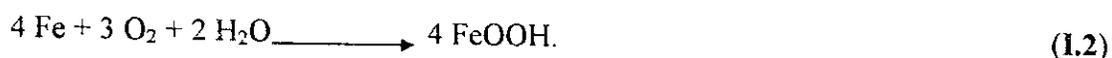
III.2.2-Notions de base :

- Réactions de corrosion :

La corrosion des métaux est due à une réaction d'oxydo-réduction irréversible entre le métal et un agent oxydant contenu dans l'environnement. L'oxydation du métal implique la réduction de l'agent oxydant.



En milieu neutre et alcalin, la corrosion des métaux est généralement due à une réaction du métal avec l'oxygène. En présence d'humidité, par exemple, le fer se corrode et forme la rouille, FeOOH.



L'oxygène contribue également à la corrosion des métaux en milieu acide. Cependant, sa concentration est tellement inférieure à celle des ions qu'on néglige plus souvent son effet. L'équation (1.2) fait également apparaître l'eau car, en absence d'humidité, l'oxygène gazeux est un agent corrosif seulement à température élevée.

- Oxydant :

En corrosion humide, les deux principaux oxydants rencontrés en pratique sont :

- Les ions solvates ;
- L'oxygène dissous.

A haute température, certaines substances chimiques, normalement inoffensives, deviennent corrosives, parmi les oxydants responsables de la corrosion sèche, on trouve :

- L'oxygène gazeux ;
- La vapeur d'eau.

– *Réaction électrochimique :*

On appelle réaction électrochimique une transformation chimique qui implique un transfert de charge à l'interface entre un conducteur électronique, appelé électrode, et un conducteur ionique, appelé électrolyte.



Chaque atome de fer qui passe en solution implique l'échange de deux électrons entre le métal et les protons. Elle contient deux réactions d'électrode : l'oxydation du fer et la réduction du proton.[4]

III.3-Origine de différents types de corrosion :

La résistance à la corrosion n'est pas une propriété intrinsèque du métal, d'où la nécessité de caractériser sa composition chimique et leur microstructure. La corrosion uniforme est une perte de matière régulière sur toute la surface ; donc on peut distinguer trois types de corrosion :

- *Galvanique (bimétallique) :* est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux.
- *Par piqûres :* est produite par certains anions, notamment le chlorure, sur les métaux protégés par un film d'oxyde. Elle induit des cavités de quelques micromètres de diamètre.
- *Erosion :* est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière.[3]

III.4-Phénomène de passivité :

La passivité d'un métal est l'état de haute stabilité chimique qu'acquiert ce métal dans certaines conditions particulières, il se comporte comme un métal d'activité normale.

Lorsqu'on plonge le fer dans une solution de NaCl, il se corrode d'une manière intense. Lorsqu'on augmente la concentration du NaCl, la vitesse de la corrosion augmente ; mais

lorsqu'on atteint une concentration critique, la corrosion cesse brusquement et le fer passe sans transition de l'état actif à un état passif.

Il est défini comme la présence d'une couche protectrice, contenant de l'oxygène. Cette couche peut atteindre $0.3\mu\text{m}$ et plus ; elle constitue une barrière efficace pour le passage des ions métalliques ; donc freiner la corrosion. [4]

La capacité du métal pour la dissolution et repassivation est le principale paramètre dans une solution corrosive, cette capacité varie notablement avec la composition du métal, les conditions d'obtention de l'éprouvette et les caractéristiques du milieu corrosif.

III.5-Fatigue et corrosion simultanées :

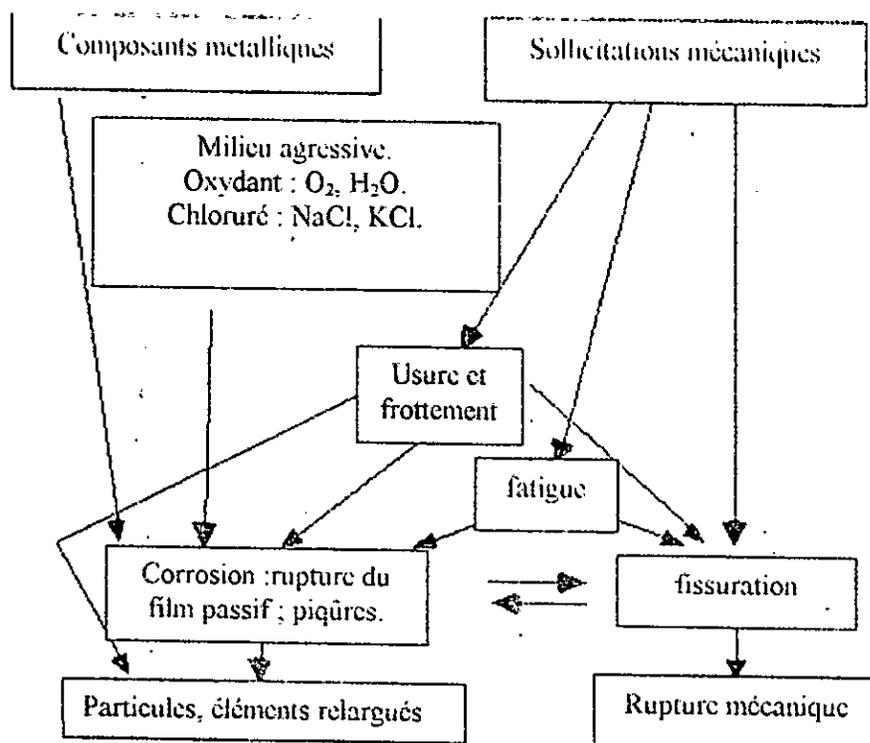


Fig.III.1 : Diagramme de la fatigue sous corrosion.

III.5.1-Manifestation des phénomènes :

L'endurance des matériaux peut être réduite à une valeur extrêmement basse lorsque des phénomènes de corrosion et de fatigue s'exercent simultanément.

Il faut distinguer la fatigue sous corrosion proprement dite des cas suivants :

- * Corrosion suivie de fatigue à l'air. Il s'agit de fatigue sous entaille ;
- * Fatigue-corrosion suivie de fatigue à l'air ; cette fois le stade préalable n'a qu'un rôle de création d'entaille ;
- * Fatigue à l'air suivie de Fatigue-corrosion, le stade préalable ne modifiant pas le résultat.[6]

III.5.1.1.Amorçage des fissures :

Les mécanismes qui contrôlent l'amorçage des fissures en Fatigue-corrosion sont mal connus. Il existe différentes formes de corrosion, l'influence de l'agressivité du milieu sur la durée de vie avant défaillance lors d'essais sur des éprouvettes non fissurées, confirme ce propos (fig.III.1), car ce type d'essai fournit la durée de vie d'amorçage des fissures.

La figure (fig.III.2) indique le caractère de la Fatigue-corrosion, et le nombre de cycles avant défaillance en fonction de la variation de contrainte appliquée, pour des éprouvettes en acier inoxydable exposées à l'air, ou immergées dans des solutions NaCl 3% ou H₂SO₄ 0.05M respectivement. Les échantillons s'altèrent plus rapidement dans l'acide sulfurique.

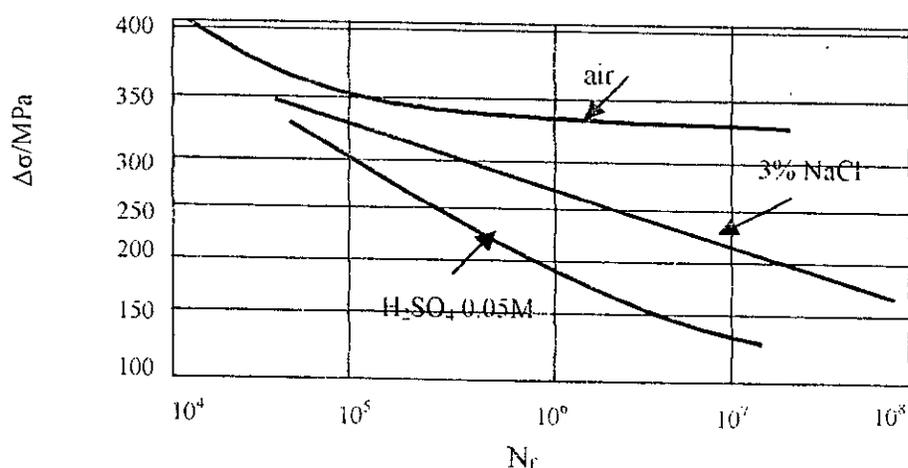


Fig.III.2 : Influence du milieu sur la durée avant rupture.

III.5.1.2. Propagation des fissures :

Trois mécanismes distincts peuvent contribuer à la propagation des fissures :

- La fatigue mécanique,
- La Fatigue-corrosion,
- La corrosion sous contrainte.

Les résultats indiqués sur la figure (fig.III.3) montrent la contribution des trois mécanismes à la progression des fissures.

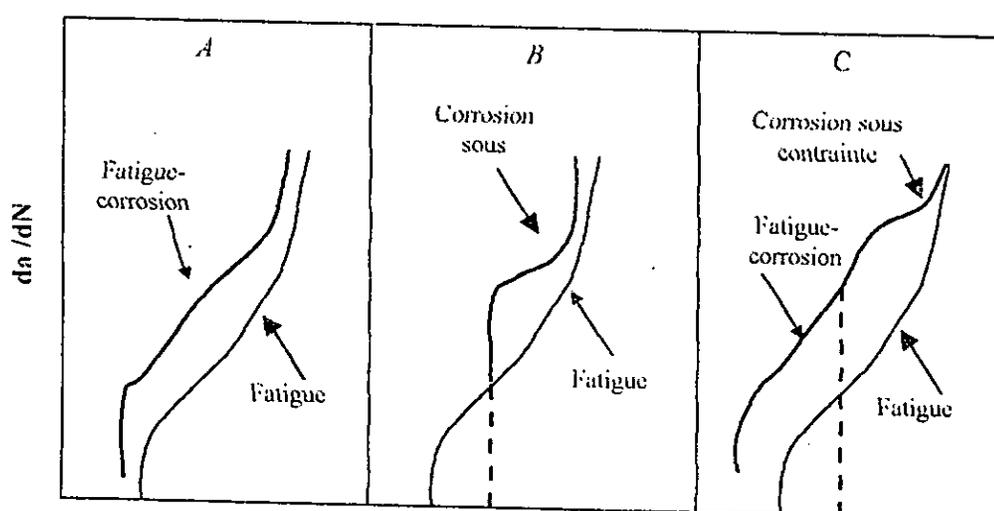


Fig.III.3 : Influence de différents phénomènes sur la variation de la vitesse de propagation des fissures, en fonction de contrainte en milieu corrosif (Fatigue-corrosion/ Fatigue/ corrosion sous contrainte).

La figure (fig.III.4) montre l'influence de différents milieux sur la vitesse de propagation des fissures.

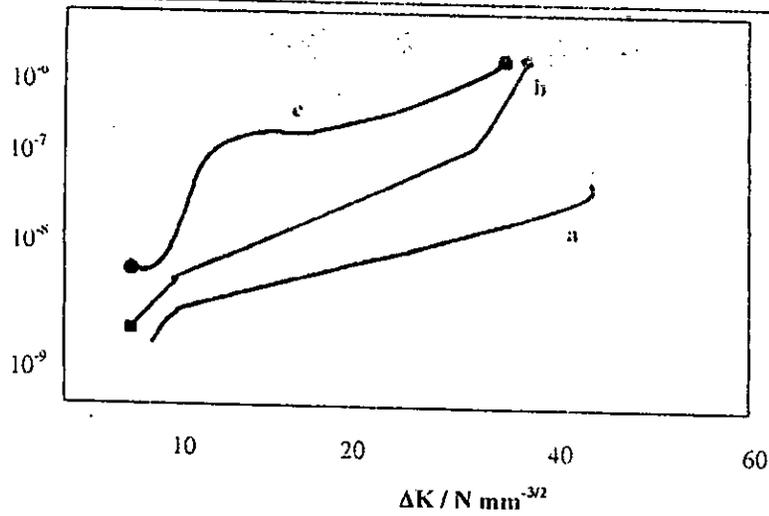


Fig. III.4: Vitesse de propagation des fissures, dans différents milieux :
 (a) air, (b) eau de mer, (c) eau de mer +H₂S[4].

III.5.2-L'influence du phénomène fatigue corrosion :

La Fatigue-corrosion est d'autant plus importante que la vitesse de corrosion intrinsèque du métal soit élevée dans le milieu en question(fig.III.5).

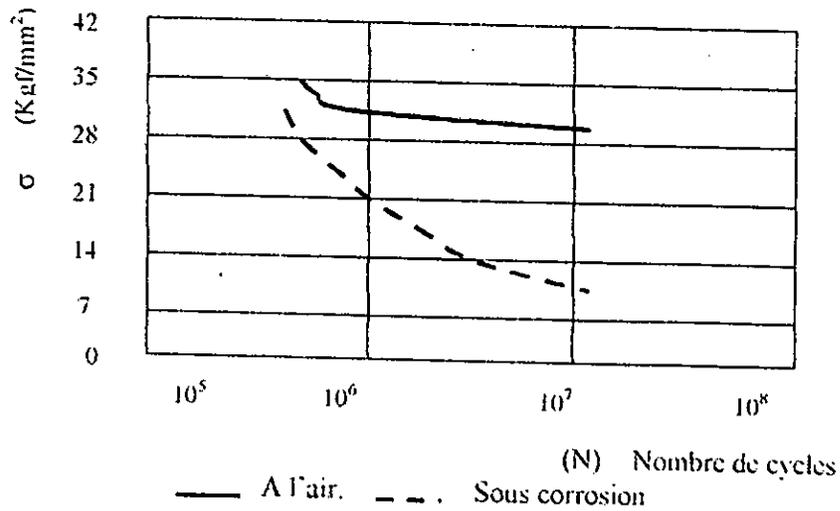


Fig.III.5 : Courbes de fatigue d'un acier au carbone à 0.56% C recuit ($R_m=64 \text{ kgf/mm}^2$).

III.6-Facteurs d'influence sur la fatigue sous corrosion :

L'étude des essais de fatigue corrosion est un sujet très vaste, compliqué par des facteurs importants comme l'état de surface de l'éprouvette, le type de variation sur la contrainte et l'influence de la forme de l'éprouvette sur la répartition de la contrainte.

III.6.1-Paramètres physico-chimiques :

Qui comprend trois facteurs :

- L'oxygène : lorsque en faisant circuler la solution corrosive dans un bain où l'air ne peut pas pénétrer, on trouve des limites d'endurance plus élevées par rapport à un milieu aéré. Des expériences faites sur l'influence de l'oxygène sur la vitesse de fissuration, ont montrés que la présence d'oxygène ou de vapeur d'eau agissent essentiellement en accélérant cette vitesse(fig.III.6).[6]

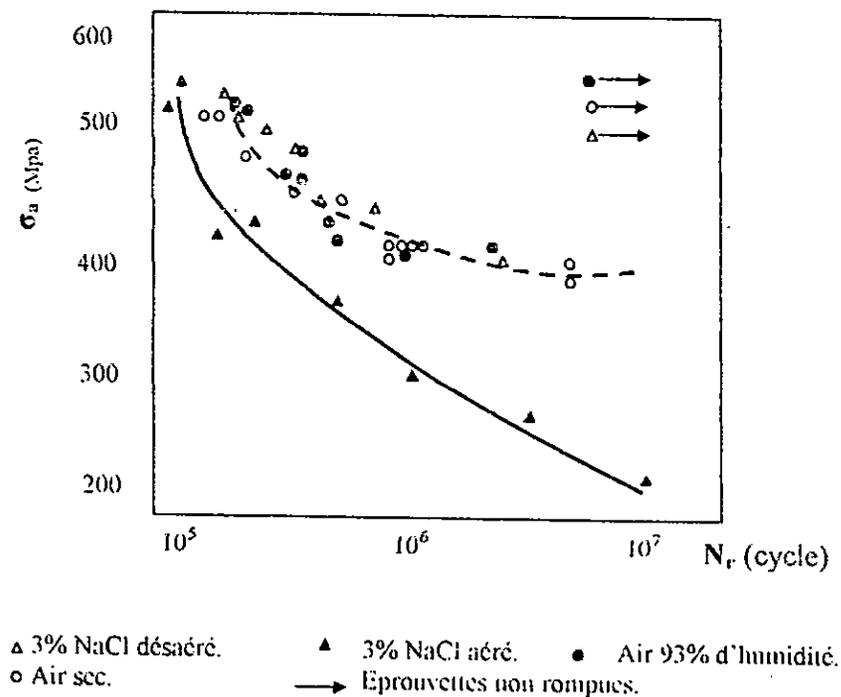


Fig.III.6 :Influence de l'humidité dans l'air et de l'aération et désaération de la solution à 3% NaCl sur le comportement en fatigue de l'acier AISI 4140.

- La teneur en Cl⁻ : lorsque la teneur en Cl⁻ du milieu aqueux augmente, les durées de vie diminuent. Les caractéristiques de fatigue sont généralement sensiblement moins bonnes dans l'eau salée (3% NaCl), que dans l'eau de ville qui contient moins de chlorure.

- PH : la figure (fig.III.7) présente l'évolution des durées de vie des éprouvettes sollicitées dans des solutions de NaCl possédant différents pH. L'endurance se détériore en milieu acide, tandis qu'elle s'améliore considérablement lorsque le pH devient basique. Ce phénomène s'explique par la présence d'une couche passive stable qui recouvre la surface du métal, atténuant ainsi l'intervention du milieu corrosif.

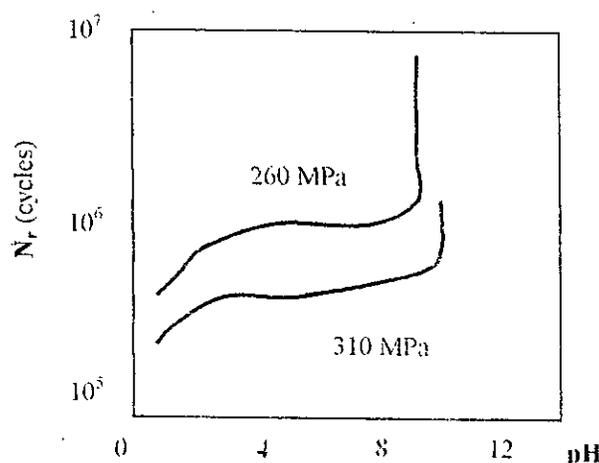


Fig. III.7 : Effet du pH de la solution corrosive sur la durée de vie en fatigue d'un acier doux en solution aérée 3% NaCl.

III.6.2-Paramètres mécaniques :

- Contrainte moyenne : dans des sollicitations alternées, la valeur moyenne de la contrainte étant nulle pendant un cycle. Or réellement les métaux sont soumis à des cycles d'efforts dont la valeur moyenne n'est pas nulle. Il est important de connaître le comportement des métaux sous des sollicitations de ce genre en présence de corrosion.

- Contraintes combinées de flexion et de torsion : il a été fait très peu d'essais comparatifs de résistance à la fatigue sous corrosion, pour des sollicitations de flexion alternée et de torsion alternée et des sollicitations combinées en phase des deux sortes ; et d'après les résultats obtenus, l'influence de la corrosion est plus marquée en flexion qu'en torsion.

- La fréquence des cycles : la plupart des essais de fatigue sous corrosion ont été effectués à une fréquence de 1500 à 4000 cycles par minute. L'influence propre de la fréquence, montre que la réduction de durées de vie apportée par ce seul paramètre est bien inférieure à celle obtenue lorsqu'il y a simultanément un phénomène de corrosion ; ce résultat peut s'expliquer par l'augmentation du temps de corrosion lorsque la fréquence diminue.

III.6.3-Paramètres géométriques :

- Effet d'entaille : La concentration de contrainte est un phénomène d'augmentation locale des contraintes dans une zone comportant une variation de la géométrie de la pièce, telles que les variations de diamètres, les congés de raccordement, les rainures de clavettes, les trous de perçage et les entailles.

Le terme entaille est utilisé pour une discontinuité imposée ou accidentelle dans la forme ou une non-homogénéité du matériau.

Les entailles peuvent être de trois types :

- Métallurgique ;
- Mécanique ;
- De service (se forme durant l'utilisation).

III.7-Conclusion:

La fatigue corrosion est un processus complexe d'endommagement des matériaux qui résulte de l'interaction de deux mécanismes différents. Elles peuvent provoquer la ruine des pièces au cours du fonctionnement.

L'étude du phénomène de fatigue sous corrosion en flexion rotative a pour but, d'essayer des éprouvettes pour apprécier la variation de la limite d'endurance entre l'essai en fatigue sous corrosion et en fatigue à l'air libre.

IV

Essais de Fatigue sous Corrosion

CHAPITRE IV : ESSAIS DE FATIGUE SOUS CORROSION

IV.1-Introduction :

Le mode d'action du milieu corrosif pendant la fatigue est très complexe et encore insuffisamment connu : il se produit des piqûres de corrosion provoquant des effets d'entaille et on observe des détériorations locales très fortes tandis que l'attaque générale est faible.

Les efforts alternés agissent sur la corrosion par les facteurs suivants :

- ↳ Endommagement de la structure cristalline qui devient plus réactive (plus anodique) vis-à-vis des agents de corrosion ;
- ↳ Rupture des films protecteurs avec diminution de la polarisation anodique ;
- ↳ Augmentation de l'apport en oxygène avec diminution de la polarisation cathodique. [2]

IV.2-Essais de Fatigue-corrosion :

IV.2.1-Définitions :

Fatigue-corrosion : effet combiné de la fatigue et d'un environnement agressif agissant simultanément, qui conduit à une dégradation du comportement en fatigue.

Désaération : processus d'élimination des gaz d'un environnement liquide avant et pendant l'essai de fatigue.

Environnement : ensemble d'éléments chimiques et d'énergie qui entoure l'échantillon d'essai.

Cellule de corrosion : récipient contenant la partie utile de l'éprouvette d'essai.

Composition du milieu corrosif : concentration des produits chimiques dans le milieu liquide au cours d'essai de Fatigue-corrosion.

Volume d'environnement : volume total entourant directement l'éprouvette d'essai ainsi que celui qui est contenu dans le réservoir de circulation.

Temps de maintien : durée dans le cycle de sollicitation pendant laquelle la variable d'essai contrôlée (charge, déformation) reste constant avec le temps. [5]

IV.2.2-Etude expérimentale de la Fatigue-corrosion :

Pour étudier expérimentalement le comportement des métaux en Fatigue-corrosion, on applique une contrainte ou une déformation périodique.

Les machines sont semblables à celles que l'on utilise pour les testes de fatigue, mais dans ce cas, les essais se déroulent dans un milieu corrosif. On compare généralement les résultats obtenus dans un milieu corrosif à ceux obtenus dans un milieu inerte. Il existe deux sortes d'essais de Fatigue-corrosion en fonction du type d'éprouvette :

- Eprouvette non fissuré ;
- Eprouvette préfissuré.

IV.3-Dispositifs et différents essais de fatigue sous corrosion :

IV.3.1-Dispositifs :

Les dispositifs d'essais sont très divers mais ils ne donnent pas tous les même résultats. Dans un très grand nombre de machines d'essai de flexion rotative, la corrosion est produite en faisant tomber le liquide goutte à goutte sur l'éprouvette soumise à la fatigue. Ce procédé présente certains inconvénients, car sous l'effet du choc des gouttes, des effets de cavitation peuvent se produire.

C'est pourquoi, on fait frotter sur l'éprouvette de fatigue une bande de toile tendue ou de matière poreuse (feutre), humectée du liquide réactif. On peut aussi approcher tous près de la surface de l'éprouvette en rotation, une tige de verre le long de laquelle on fait arriver le liquide. Celui-ci mouille l'éprouvette par capillarité, on évite de cette manière les effets de cavitation.[5]

Le milieu corrosif est alors appliqué de différentes façons :

- Une bague de feutre imbibée par le milieu corrosif vient s'appliquer sur la surface de l'éprouvette (fig. IV.1) ;

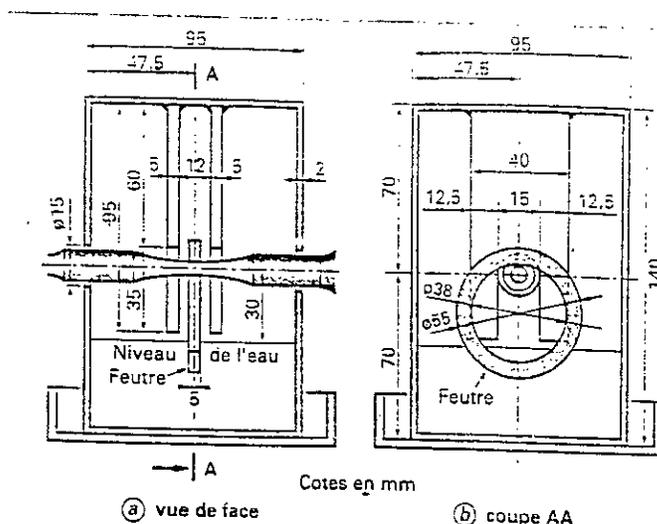


Fig. IV.1-Bac pour essai de flexion rotative en milieu corrosif.

- Une pulvérisation du liquide corrosif est appliquée à la partie utile de l'éprouvette, qui est soumise à l'action du liquide corrosif au moyen du dispositif représenté sur la figure (fig. IV.2), qui permet la formation d'un anneau liquide par capillarité entre la surface de l'éprouvette et la paroi du tube en regard. La continuité de cet anneau était assurée par la rotation de l'éprouvette.

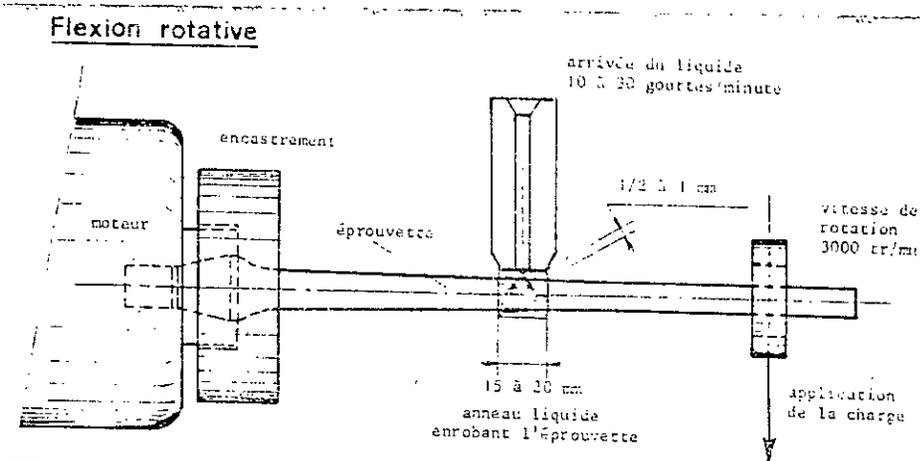


Fig. IV.2-Essai en flexion rotative par un anneau liquide.

▪ La partie utile de l'éprouvette est immergée dans le milieu corrosif grâce à une cellule de corrosion fixe.[5]

IV.3.2-Principaux essais de fatigue-corrosion :

IV.3.2.1-Essai en récipient ouvert :

C'est le procédé le plus simple pour la détermination de la résistance à la corrosion des métaux soumis à la fatigue.

IV.3.2.2-Essais dans les liquides en mouvement :

Dans certaines conditions rencontrées en pratique, le matériau travaille dans un milieu liquide en mouvement continu. Ces essais conviennent-il de reproduire au laboratoire des conditions particulières de corrosion.

IV.3.2.3-Essai en brouillard salin :

Ces essais ont pris actuellement un développement considérable. Il consiste à soumettre les éprouvettes à l'action d'une solution corrosive pulvérisée. Cet essai permet de reproduire le plus fidèlement les conditions naturelles, dans ce cas la corrosion a lieu dans une couche liquide mince. [7]

IV.4-Méthode expérimentales :

IV.4.1-Objectifs et but :

Les essais de Fatigue-corrosion ont deux objectifs principaux :

- ↳ Etudier l'influence d'un milieu corrosif sur le comportement en Fatigue d'un matériau en ce milieu,
- ↳ Caractériser la tenue d'une pièce dans des conditions données.

Dans le premier cas, les éprouvettes d'essais sont réalisées dans des conditions normalisées (normes NF A03-400) qui permettent la comparaison des résultats en provenance de laboratoires différents. [10]

Dans le deuxième cas, la géométrie et les conditions de surface des éprouvettes ainsi que le milieu corrosif doivent simuler le mieux possible les conditions de service.

La résistance à la corrosion n'est pas une propriété inhérente au métal comme par exemple la résistance mécanique, mais une propriété qui dépend de la nature du métal et du caractère du milieu. Chaque méthode d'essai à la corrosion doit tenir compte de ce principe.

Le but poursuivi par les essais de corrosion est la détermination de la durée d'exploitation probable d'un métal donné dans des conditions données. [4]

IV.4.2-Méthodes d'étude au laboratoire :

L'étude des échantillons passe par des étapes qui comporte :

- Composition chimique.
- Leur structure.
- Caractéristiques technologique.
- Les déformations.
- Etat du traitement de surface.
- Provenance de l'échantillon.
- Forme de l'échantillon.[7]

III.4.3-Mesures associées :

Les mesures qui sont recommandées lors des essais de la fatigue sous corrosion sont :

- La teneur en oxygène dissous dans la solution ;
- Le pH de la solution. [2]

III.4.4-Milieu corrosif :

Plusieurs types d'eau peuvent être utilisés selon les renseignements recherchés. On distingue les eaux de mer reconstituées et naturelles.

↳ **Eau de mer reconstituée :**

A partir d'une eau distillée, deux solutions salines sont couramment utilisées.

- a) *Eau salée* : NaCl (30g/l) tamponné au pH 8.2 par le mélange phosphate dissoudique Na_2HPO_4 (0.19g/l) et acide borique H_3BO_3 (1.25g/l).
- b) *Eau de mer synthétique* : sans ions métalliques lourds (norme ASTM D 1142).

L'eau de mer reconstituée doit être renouvelée autant de fois que nécessaire au cours d'un essai afin de conserver la stabilité des paramètres chimiques.

↳ **Eau de mer naturelle :**

Leur utilisation permet a priori de mieux rendre compte de l'environnement réel d'un site.

composants	NaCl	MgCl ₂	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	KCl	NaHCO ₃	KBr	H ₃ BO ₃	SrCl ₂	NaF
Concentration (g/l)	24.53	5.20	4.09	1.16	0.69	0.201	0.101	0.027	0.025	0.003

Tableau III.1: La composition chimique de l'eau de mer synthétique.

IV.4.5-Cellule de corrosion :

Pour des essais de fatigue en eau de mer, l'environnement marin est simulé en ayant recours à la circulation d'eau de mer dans une cellule qui n'englobe que la partie utile d'un échantillon sollicité.[5]

IV.5-Conclusion :

L'aspect des pièces varie sensiblement avec l'agressivité du milieu et la structure des matériaux. Pour contrôler le comportement des pièces, on réalise des testes ou des essais sur des éprouvettes normalisées ou sur les pièces elles mêmes, pour simuler le plus fidèlement possible l'environnement réelle d'exploitation.

V

Partie Expérimentale

CHAPITRE V : ETUDE EXPERIMENTALE

V.1-Introduction :

Une machine ou autre structure mécanique, doit satisfaire aux divers impératifs concernant sa , productivité et sa longévité. A cette fin, chaque pièces doit satisfaire rigoureusement à toutes les prescriptions de résistance, rigidité, tenue aux vibrations et à la corrosion.[8]

V.2-La machine d'essai de flexion rotative :

V.2.1-Présentation de la machine :

On possède dans notre laboratoire, une machine de flexion rotative, type « *SCHENCK* » datée de 1954, d'une fréquence de rotation de 2760 tr/mn, 0.32 kW de puissance. Nous ne somme pas intéressés à l'essai de la fatigue seulement, mais à l'essai de la fatigue sous corrosion, ce qui n'est pas disponible sur notre machine.

V.2.2-Principe de fonctionnement et description de la machine :

Cette machine permet l'entraînement d'éprouvettes à 2760 tr/mn, en les sollicitant par un système de mise en charge en deux appuis à une contrainte maximale de 65 daN/mm^2 . Ce système de charge est monté sur un socle rigide et lourd permettant de minimiser les effets des vibrations.[8]

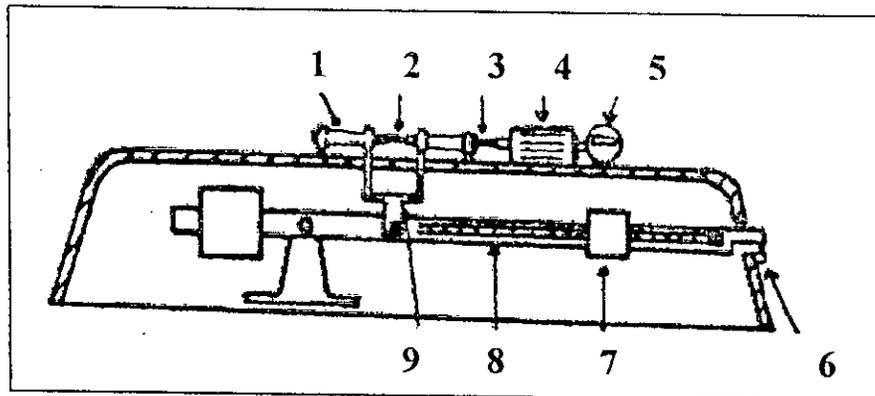


Fig.V.1- Principaux éléments de la machine.

1	Fourreaux. (Mandrin)	4	Moteur électrique.	7	Contre poids.
2	Eprouvette.	5	Compte-tour.	8	Levier.
3	Accouplement.	6	Interrupteur.	9	chape

La machine est formée de deux parties :

- Partie électrique ,qui comprend un moteur électrique et une broche de commande;
- Partie chargement où il y a la broche de la charge.

L'éprouvette (2) étant emmanchée à ses deux extrémités dans des pinces (1) et entraînée en rotation par l'arbre (3), qui est lié au moteur (4) par un accouplement élastique(3) avec un ressort.

Le guidage en rotation de l'arbre de chargement (7) est assuré par deux paliers à roulements rotule à deux rangés de billes.

La flexion de l'éprouvette au cours de l'essai est provoquée par le poids des masses (7) , qui sont liées aux paliers (1) par l'intermédiaire de deux tiges ou chapes(9) , articulées en deux points.

Le moteur(4) est relié à un compteur(5) qui indique le nombre de cycles effectués par l'éprouvette pendant l'essai.

V.3-Travaux effectués sur la machine :

V.3.1-Démontage et vérification de la fonctionnalité de la machine :

La machine de flexion rotative a subi le démontage, et les mesures sur ses pièces, puis un nettoyage et graissage.

Pendant cette opération, nous avons rencontré des anomalies dans le système de fixation des éprouvettes d'essais. Il y a eu un endommagement au niveau des pinces.

Ce problème nous exige de réparer ou remplacer par un autre système de fixation qui convient. Nous avons prévu une solution qui évite le glissement de l'éprouvette dans les mandrins de fixation. Deux solutions différentes sont proposées :

L'une repose sur l'enlèvement complet de la pince endommagée et la remplacer par un autre système qui lui ressemble , ce système est composé par :

Un cylindre plein, percé au $\varnothing 12$ et on monte à travers le perçage, une éprouvette pour garder la forme intérieure du perçage , et on usine la partie extérieure d'une forme conique et on fait usiner des fentes longitudinales pour rendre le cylindre plus flexible ; mais cette solution est coûteuse , et on peut pas garantir une bonne flexibilité.

Une deuxième solution proposée, c'est de percer un trou puis le tarauder à M6 sur la surface latérale du mandrin, pour compenser l'adhérence de l'éprouvette avec la pince cassée, avec une vis à appui plat.

V.3.2-Solution adoptée :

Il existe deux pinces dans la machine et sont toutes les deux partiellement cassées.

Dans la figure (fig.V.2) on a une pince constituée de cinq mâchoires où deux sont cassées ; cette situation nous a posé des problèmes de maintien de l'éprouvette lors des essais.

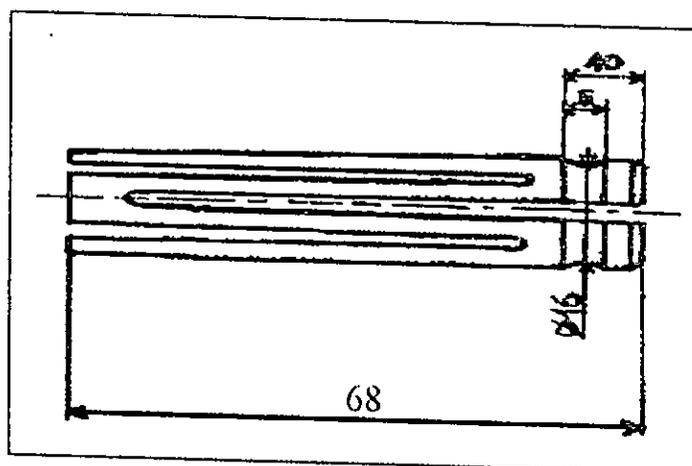


Fig.V.2-Pince n°1.

Pour cela on a adopté la deuxième solution, qui consiste à percer sur le mandrin un trou de $\text{Ø}8$, puis on a logé un écrou de M4 dans ce trou (fig.V.3) , Puis on a monté une vis M4 pour bloquer l'éprouvette. Ce travail à été réalisé à l'entreprise (POVAL) Berrouaghia, département des pompes.

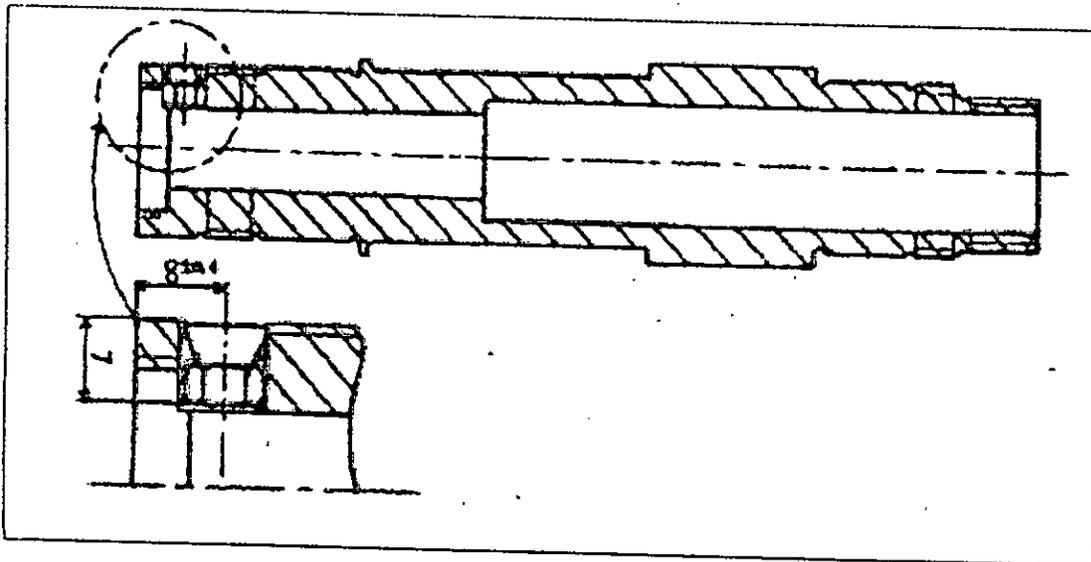


Fig.V.3-Solution adoptée.

La deuxième pince (fig.V.4) qui est située dans la partie gauche de la machine, ne peut pas se loger dans le porte pince à cause de l'absence d'un épaulement sur cette pince qui est cassée.

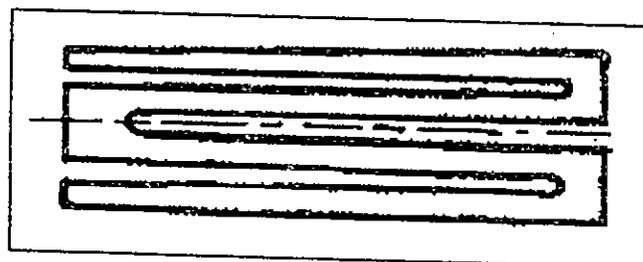


Fig.V.4-Pince n°2.

constitué par un réservoir à huile et un piston plat lié à la poutre par une chape, pour but d'équilibrer le système du chargement au cours du fonctionnement (amortisseur).

Lorsqu'on applique une charge, le piston comprime l'huile à l'intérieur du réservoir, et cette charge réagit sur les appuis portants des roulements rotule à deux rangés de billes qui à son tour fait soumettre à l'éprouvette une charge de flexion.

La machine est prête à démarrer, on fait actionner le disjoncteur de commande, le moteur tourne et il entraîne l'ensemble « mandrin, porte pince, pince et l'éprouvette », donc on a automatiquement une flexion rotative, où l'éprouvette est soumise à un double effets de traction et de compression de ses fibres.

Lorsque la rupture se produit après un certain nombre de cycles, les deux mandrins symétriques reliés par l'intermédiaire de l'éprouvette se lâchent, la poutre support tombe brusquement en interrompant le courant qui alimente le moteur à l'aide d'un interrupteur qui est placé à l'extrémité droite de la machine. Le mouvement rapide du rappel de la poutre est assuré par l'effet du système hydraulique cité ci-dessus, et à cause de la pression générée par le piston, il pousse la poutre.

On actionne la manette (FLR.01.38) pour tourner la came (FLR.01.36), qui pousse la poutre support (FLR.01.46) vers le haut de quelque centimètre, pour que le système du chargement ne se fatigue au cour de repos.

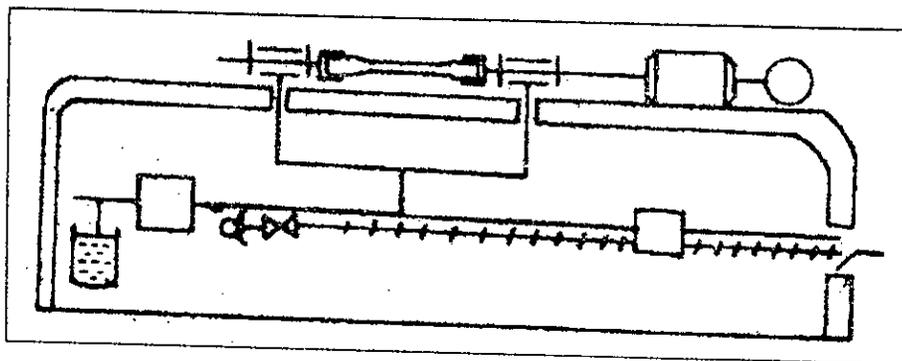


Fig.V.5-Schémas de la machine.

V.5-Dessin de l'ensemble et de définition de la machine :

On a figuré dans deux grands plans, le dessin de l'ensemble qui montrent tout les détails internes et externes de la machine de l'essai de flexion rotative.

Dans le premier plan, il y a une vue de dessus globale, le système du chargement (mise en charge), qui comprend : le volant , et les organes de transmissions , cette dernière est l'engrenage par des pignons coniques à dentures droite.

Le deuxième plan, qui est divisé en trois sous ensembles :

Le premier est le système de la mise en repos, lorsque la machine est en arrêt, qui est composé par une manette inclinée (38)[FLR.01.26] et une came (36)[FLR.01.27].

Le deuxième est un palier qui est relié à la poutre support (17) [FLR.01.17] par l'intermédiaire d'une chape support (26) [FLR.01.32]. Ce palier porte deux roulements rotules à deux rangés de bille.

Le sous ensemble n° 3 c'est la vue de gauche complète de sous ensemble n° 2 , qui montre la partie droite des organes tournants {les deux roulements (29), le mandrin (28) [FLR.01.30],et une pince (27) [FLR.01.31] qui se monte dans le porte pince (49) [FLR.01.03]} et un corps support (26) [FLR.01.32] qui assure la stabilité du système de chargement, ce corps support est relié au socle (10)[FLR.01.15].

On a réalisé les dessins de définitions de tous les organes ; et nous n'avons pas mentionné la nuance des matériaux pour chaque pièce, puisque nous n'avons pas ,et les informations sur la nature exacte , et la provenance.

On a utilisé une nouvelle normalisation, qui concerne la symbolisation de l'état de surface(rugosité).

V.6-Conception et réalisation de la Cellule de corrosion :

Nous décrivons la conception de la cellule pour fatigue sous corrosion adaptée à la machine de flexion rotative. Pour cela on a choisi pour la conception de la cellule et en fonction des conditions de fonctionnement, les paramètres suivants :

V.6.1-Matière :

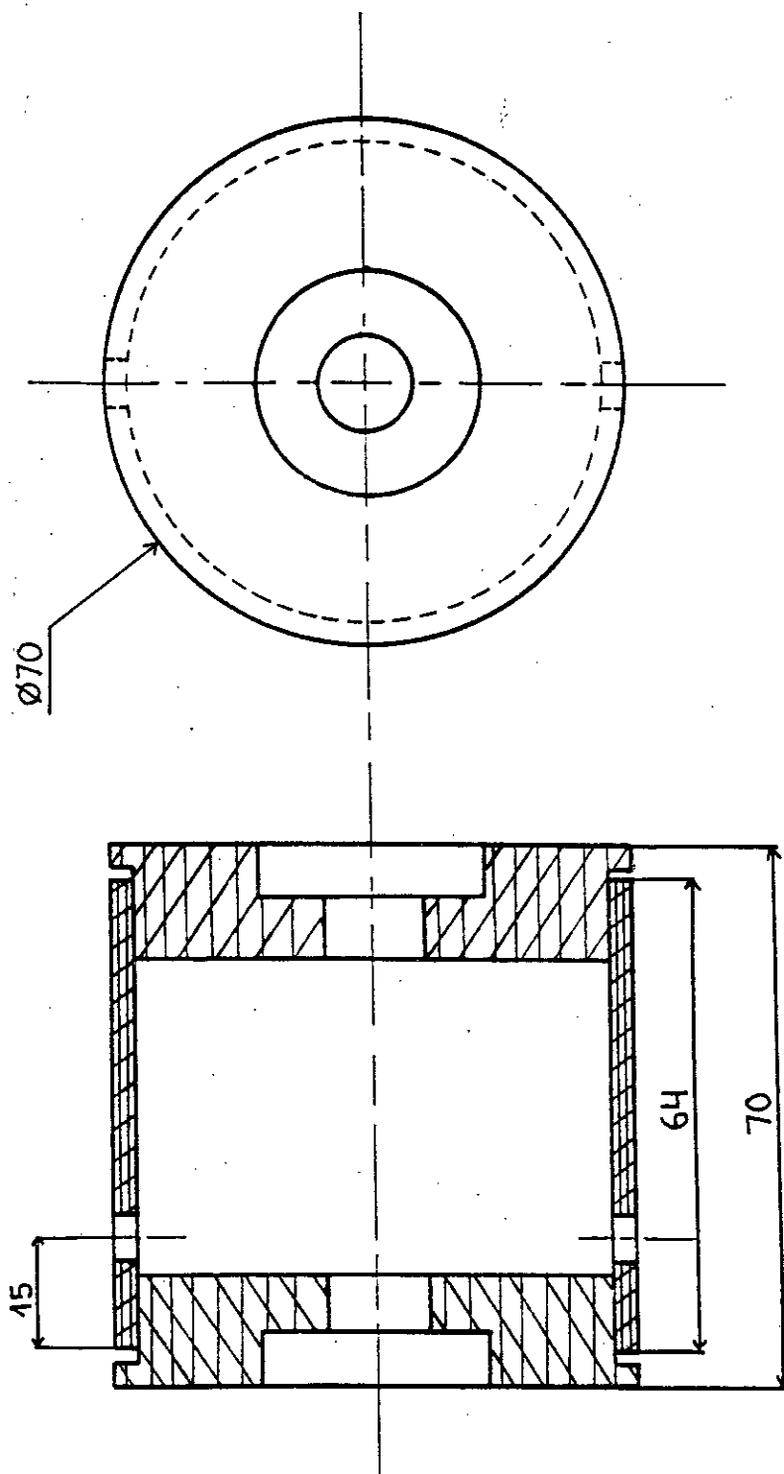
Le matériau utilisé doit à la fois être résistant, léger et économique. On a choisi une matière en plastique, qui résiste relativement bien aux efforts. Elle permet une bonne transparence optique lors du l'essai de fatigue sous corrosion, c'est du PVC (POLYCHLORURE de VINYLE), de caractéristiques suivantes :

- $R_{\min}(\text{Flexion}) = 70 \text{ MPa}$
- Masse volumique = 1350 kg/m^3
- Transmission lumineuse : bonne transparence optique
- Usinage : très bon. [11]

V.6.2-Géométrie :

Une forme cylindrique, formée par un cylindre creux débouchant, d'une longueur 54 mm, une épaisseur de 3 mm, et d'un diamètre extérieur $d_{\text{ext}} = 70 \text{ mm}$.

Elle est composée aussi de deux flasques de diamètre $D = 70 \text{ mm}$ avec un alésage de diamètre $\varnothing 30$, ces flasques sont collés avec le cylindre précédent par une colle spéciale pour les matériaux plastiques. La longueur totale de la cellule est de 70 mm (fig. V.6) et (fig. V.7).



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		CELLULE de CORROSION	ENP Dép. G. Mécanique
1:1				
Etudiant	KOSSEIR			
Promoteurs	Belkacemi			
	Guergueb			
				Fig. III.4

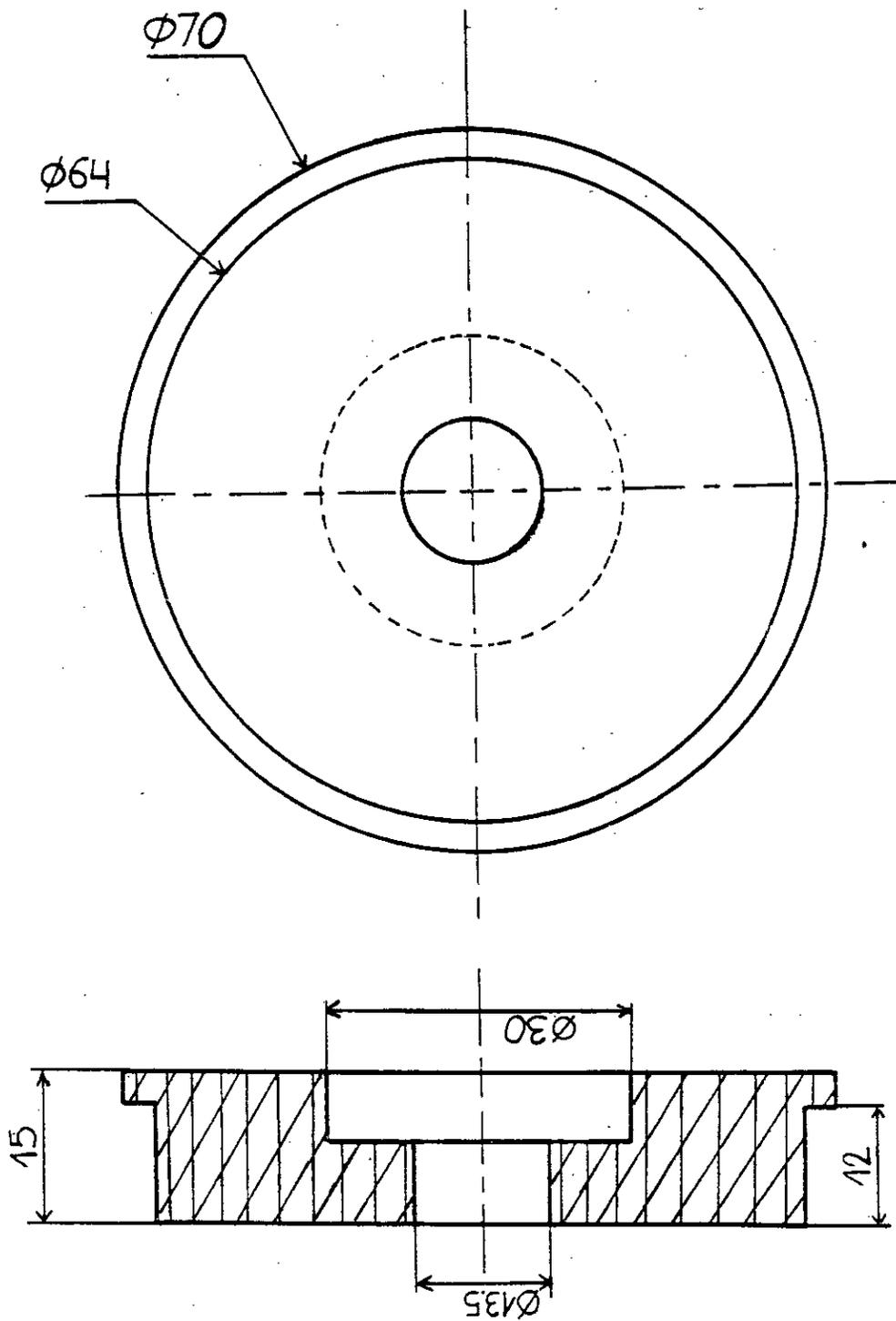


Fig. III.5

V.6.3-Etanchéité :

Les essais de fatigue en eau de mer ou autre solution corrosives, sont longs avec les problèmes d'étanchéité des cellules qui sont difficiles à régler. Donc on utilise les joints pour empêcher les fuites au cours du fonctionnement.

L'étanchéité qui est entre la cellule et l'éprouvette, elle est assurée par deux bagues d'étanchéité à effet radial (joint à lèvres) en caoutchouc synthétique.

Pour maintenir ces joints en place, on a usiné le couvercle de la cellule avec deux épaulements intérieurs pour accueillir les deux joints à lèvres. Ces joints doivent être parfaitement immobilisés dans ses logements. Son principal but c'est d'assurer l'étanchéité en rotation.

Les joints seront montés serrés dans l'alésage. Le sens du montage des joints à lèvres est important, il faut monter les deux joints l'un à la suite de l'autre de telle manière que les lèvres soient tournées vers l'intérieur de la cellule pour assurer la retenue du liquide corrosif ; et d'assurer une étanchéité dans un seul sens par un contact sur l'arbre.

Son montage exige :

- ↳ Un ajustement de H8 sur le moyeu, et h11 sur l'arbre ;
- ↳ Un état de surface de $R_a=0.4$ (fig.V.7).

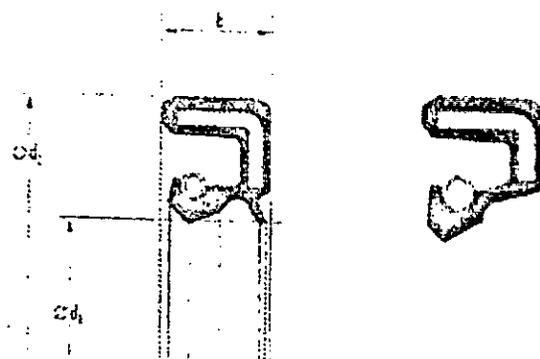


Fig.V.8-Joint à lèvres.

Pour garantir un mécanisme parfaitement étanche, on a prévu deux joints à lèvres à frottement radial de caractéristiques suivantes :

- Diamètre nominale $d_1 = \varnothing 12$;
- Diamètre extérieur $d_2 = \varnothing 30$;
- Largeur $b = 7$.

Leur désignation : *joint à lèvre, type IE, 12*30*7.(Paulstra)*

Où :

I : armature métallique interne.

E : ressort torique apparent.

V.6.4-Fixation et blocage :

On a utilisé un système de blocage ordinaire pour s'assurer que la cellule ne tourne pas avec l'éprouvette au cours de la rotation.

Un collier d'un diamètre légèrement supérieur à celui de la cellule pour envelopper cette dernière. Ce collier comprend une ouverture à l'extrémité supérieure pour le serrage de la cellule et une rainure d'une longueur de 14 mm pour le réglage en hauteur (fig. V.9).

Ce collier est relié au corps de la machine par l'intermédiaire d'un support fixé par quatre vis M6 . Le système est équilibré par des joints plats placés entre le support et le bâti de la machine pour absorber les vibrations générées au cours du fonctionnement (fig. V.10).

La figure(fig.V.11) nous donne l'ensemble de la cellule et ses fixations sur le corps de la machine.

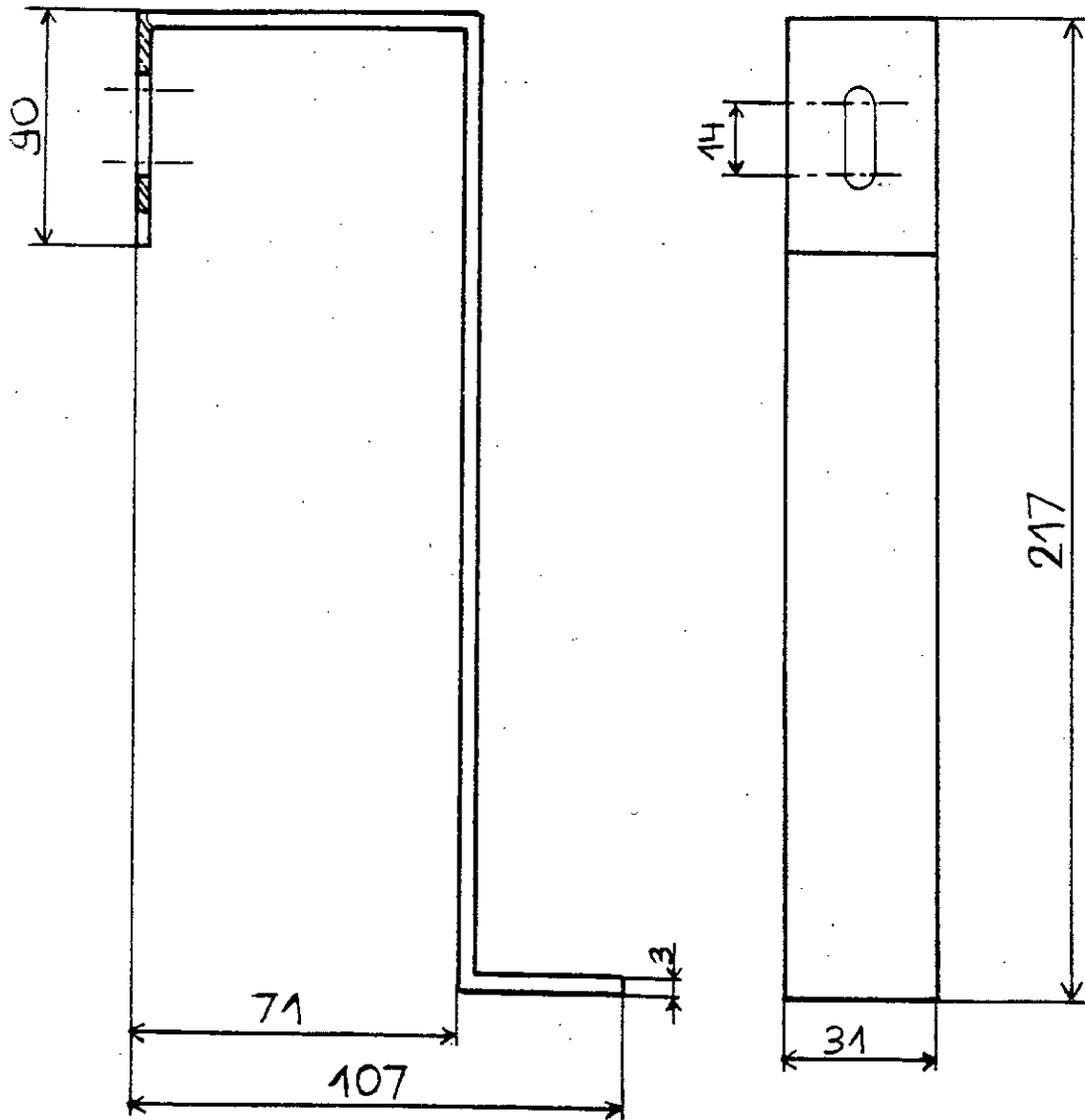
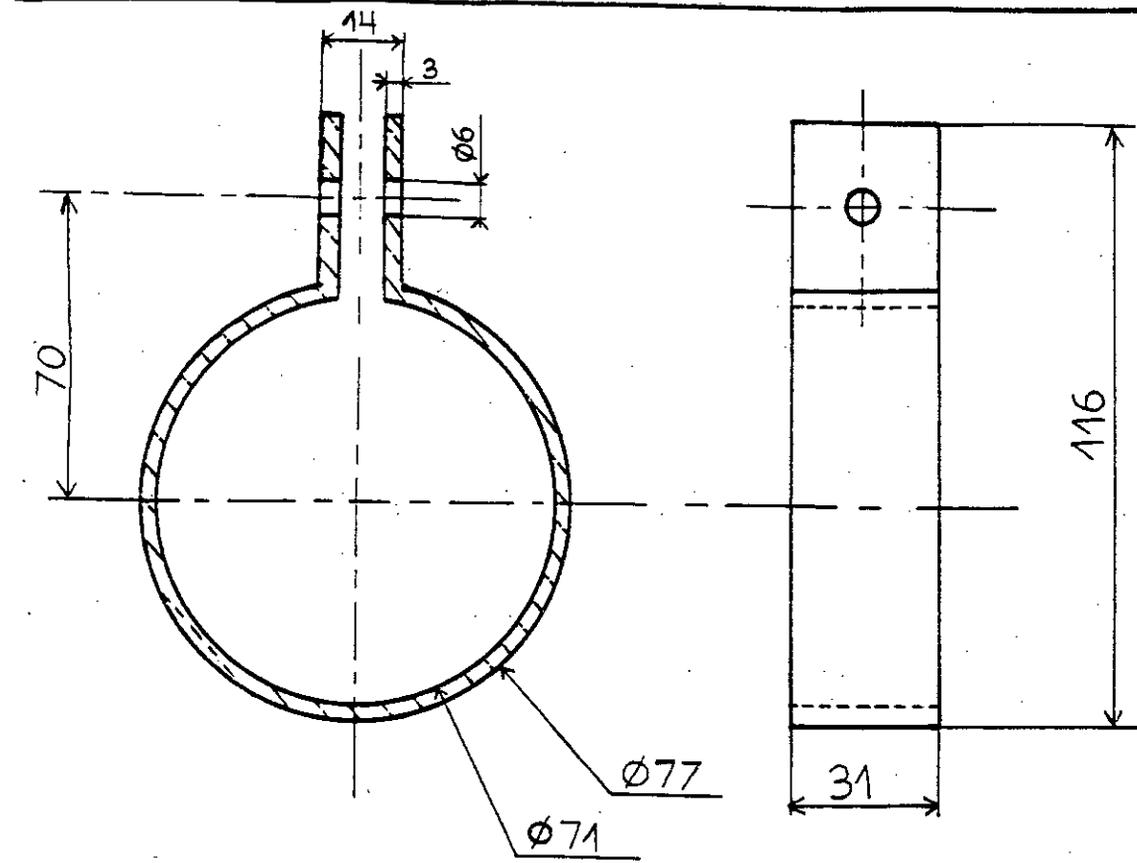


Fig. III.6

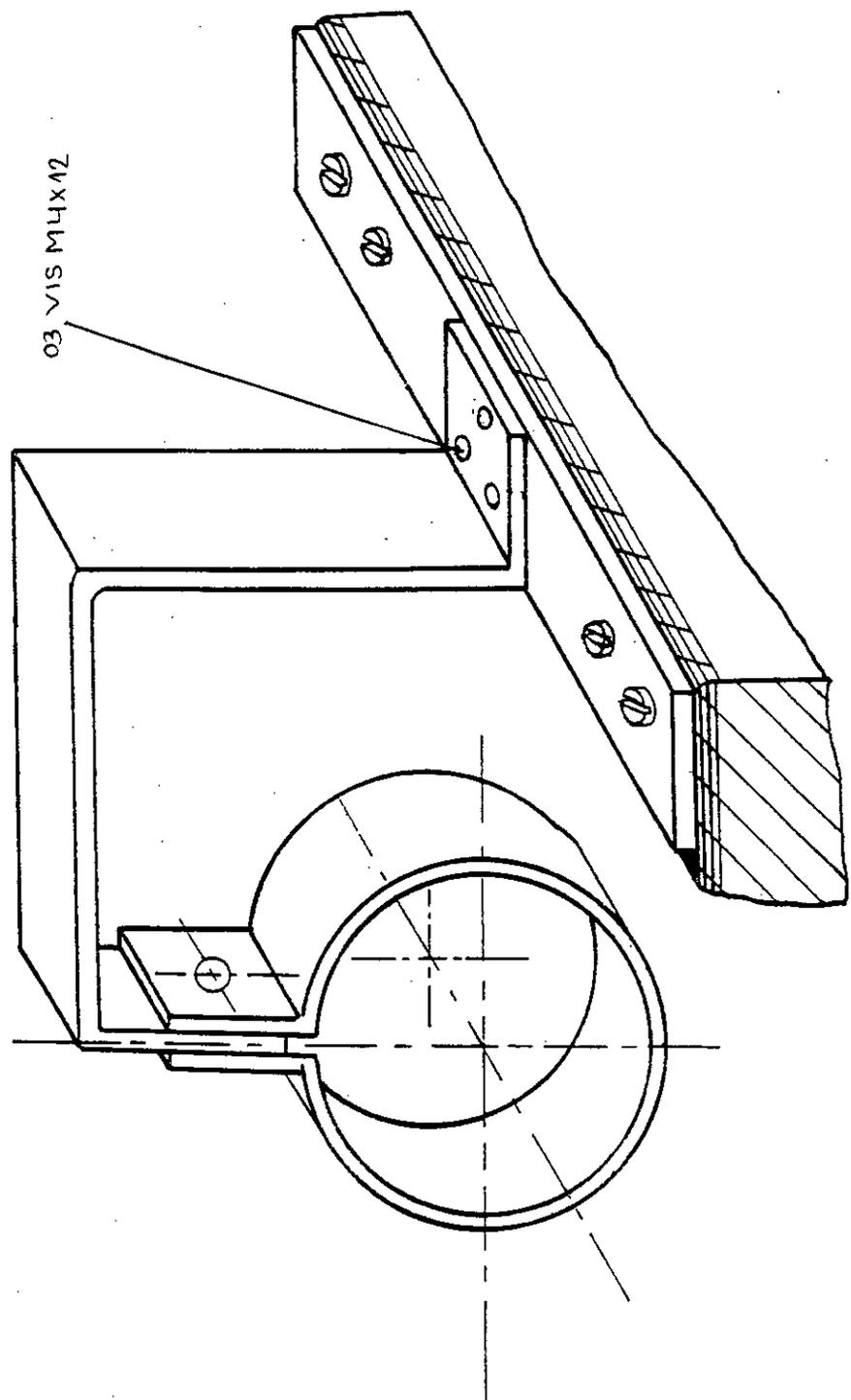
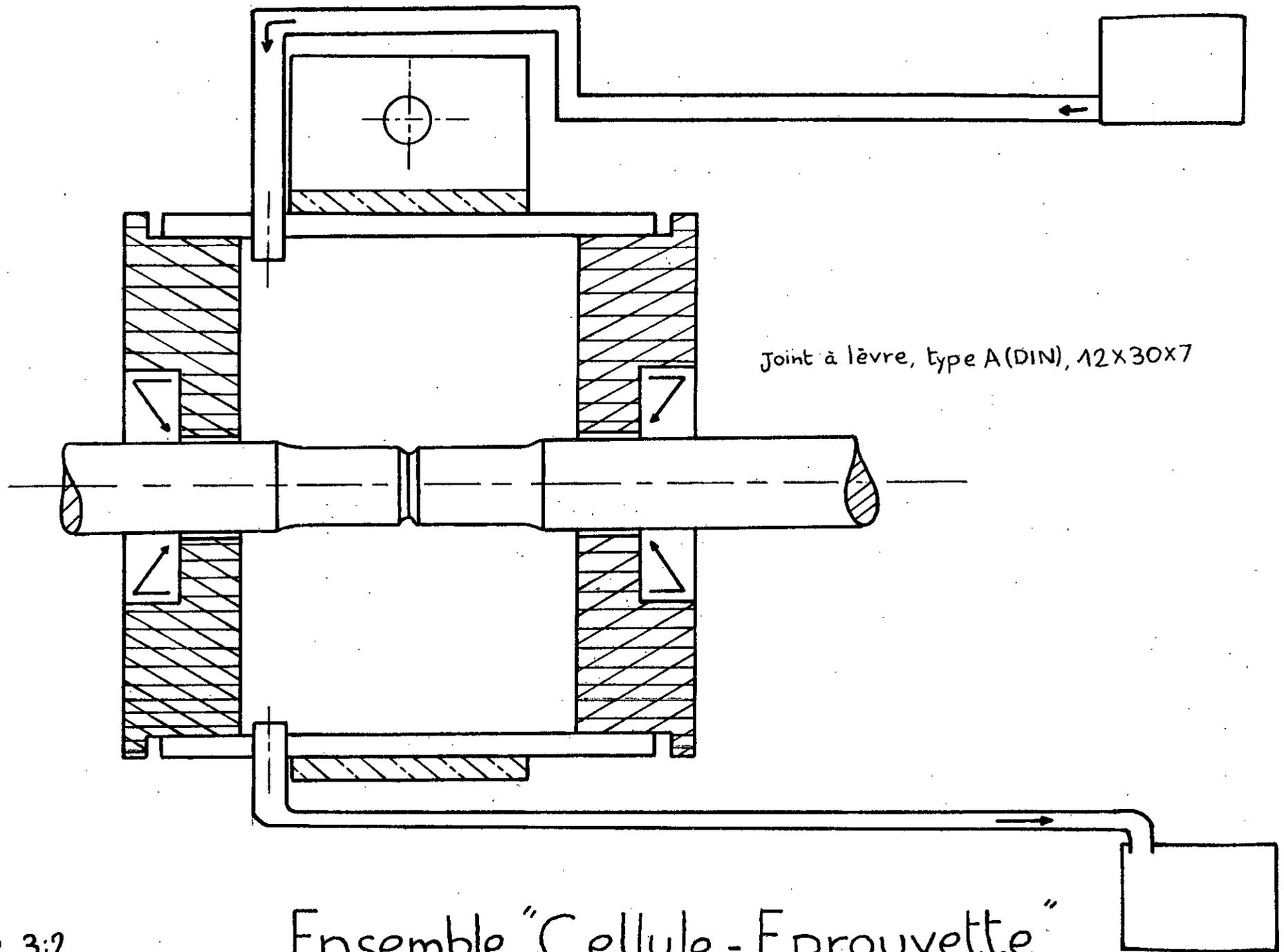


Fig.III.7



V.6.5-Nature de milieu corrosif utilisé:

Nous utilisons une eau du robinet ou eau de mer, qui convient à nos essais. Ses concentrations en sel ou la teneur globale en sels (%) est entre (3.7 ;3.9).[5] La composition totale est :

Sels	NaCl	MgCl ₂	MgSO ₄	CaSO ₄	K ₂ SO ₄	CaCO ₃	MgBr ₂
Teneur (gr/kg)	27.2	3.8	1.7	1.2	0.9	0.1	0.1
Quantité de sels (%)	77.8	10.9	4.7	3.6	2.5	0.3	0.2

Tableau V.1: La Composition De L'eau De Mer Méditerranée En Masse.

Le pourcentage de NaCl est de 3.5%. [7]

La composition en (g/l) volume est :

Na ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	S ⁻	O ₂	pH	$\rho(\Omega^*m)$ a 25°
12.2	0.5	1.4	24	3	6.5	8	0.2

Tableau V.2 : La Composition Volumique Des Ions De La Mer Méditerranée.

Où : ρ est la passivité de l'eau à 25°. [1]

V.6.6-Circulation du liquide corrosif :

La cellule comporte deux orifices, l'un pour le remplissage et l'autre, pour la vidange et la régénération du liquide. De diamètre ϕ 6 situé à l'extrémité de la cellule et relié à une conduite de ϕ 4.5, branchée à un réservoir qui est situé à environ 440 mm au-dessus de la cellule. Le débit est contrôlé par une vanne en plastique.

Pour l'orifice de vidange, on a prévu un récipient pour cumuler le liquide sortant de la cellule, tout en gardant un niveau du volume constant dans la cellule (fig.V.11).

V.7-Préparation et manipulation des essais de fatigue sous corrosion :

V.7.1-Eprouvettes d'essais :

II.7.1.1-Matière :

On a utilisé des éprouvettes en acier doux A33.[9]

II.7.1.2-Préparation et usinage :

Les éprouvettes(fig.V.12)ont été réalisées à partir d'une barre de ϕ 14 d'un acier doux A33 qui est le seul disponible au magasin du département.

L'usinage des éprouvettes est fait sur tour, en deux étapes :

- ❖ L'ébauche : par passe de profondeurs décroissante jusqu'au diamètre ϕ 12.5 mm , puis pour la partie utile jusqu'au ϕ 10.5. Le but de cette opération est d'avoir la forme générale de l'éprouvette.
- ❖ Finition : elle est faite directement après l'ébauche, avec des passes de petites profondeurs, pour éviter la déformation ou l'écrouissage superficiel.

On a réalisé les éprouvettes avec des outils de coupe suivantes:

- Outil à fileter en carbure d'angle au sommet de 60° , pour la réalisation des entailles.
- Outil à charioter droit, pour le chariotage.[10]

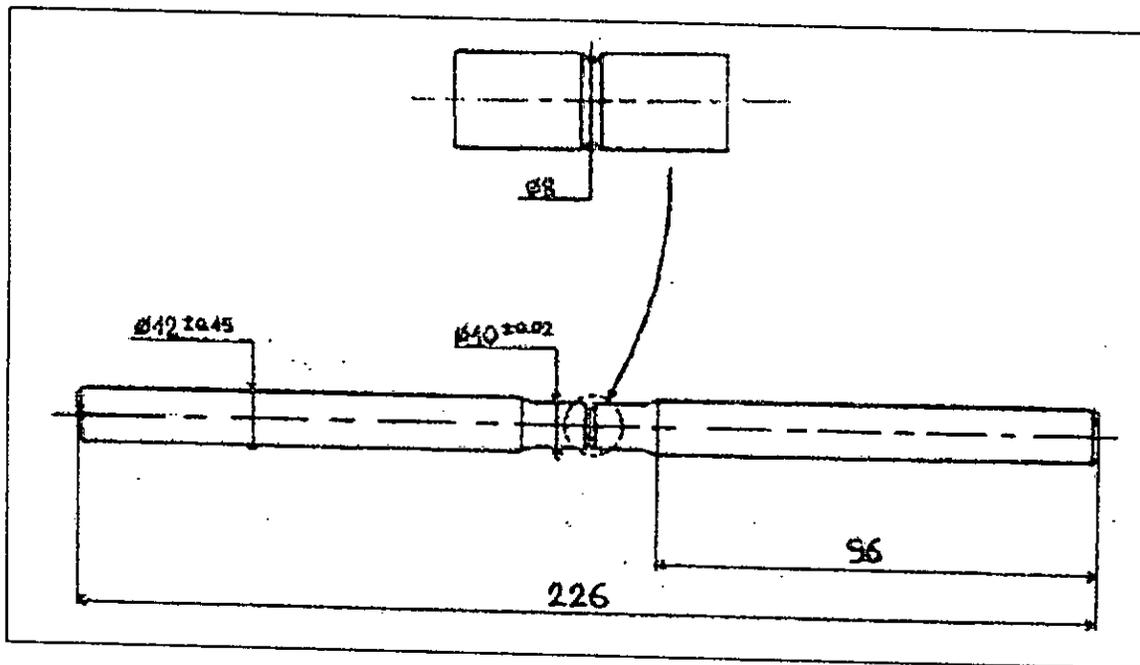


Fig.V.12-Eprouvette de flexion rotative.

V.7.2-Protocole des essais réalisés :

V.7.2-Protocole des essais réalisés :

Pour mener les essais sur les éprouvettes, nous avons choisi la méthode classique qui consiste à choisir un seul niveau de contrainte et à essayer deux éprouvettes, l'une à la fatigue à l'air libre et l'autre à la fatigue sous corrosion, il y a huit éprouvettes en tout.

Au premier lieu, on fait essayer quatre éprouvettes en fatigue à l'aire. Puis quatre autres éprouvettes en mode fatigue sous corrosion ; pour le but de vérifier la bonne fonctionnalité de la machine réparée et l'ensemble machine cellule de corrosion.

V.7.2.1-Résultats des essais réalisés :

N° d'essai	(mm)	Contrainte (MPa)	N° de cycles
01	148	320	1001200
02	203	440	568300
03	203	440	551900
04	203	440	553200

Tableau V.3 : Essais de fatigue à l'air libre.

N° d'essai	(mm)	Contrainte (MPa)	N° de cycles
01	148	320	623000
02	203	440	532200
03	203	440	534400
04	203	440	538100

Tableau V.4 : Essais de fatigue sous corrosion.

V.7.2.2-Interprétation des résultats :

Les essais de corrosion ont été menés en utilisant de l'eau de robinet. Nous remarquons que les cycles à la rupture soit comparable en ce qui concerne les résultats des tableaux (I) ou (II).

Une mise en point de la machine reste à faire. Ceci a été mis en évidence par les essais n°1 où un glissement de l'éprouvette a été remarqué. Le serrage pince -éprouvette en est la cause.

V.8-Conclusion :

La machine d'essai est en marche, après des améliorations apportées sur ses organes endommagés. Nous avons vérifié ses capacités de résister aux longues durée d'expériences, on a réalisé environ 2486000(cycles), lors des essais menés sur dix éprouvettes entaillées au milieu au diamètre 8mm. La cellule réalisée est bien adaptée à la machine.



Conclusion Générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la conception et la réalisation d'une cellule pour fatigue sous corrosion adaptée à la machine de flexion rotative ; afin d'intégrer une nouvelle fonction à cette machine.

Après rappel des généralités sur la fatigue et ces essais, et de la fatigue sous corrosion et les facteurs qui peuvent définir cet phénomène, nous avons procédé à l'étude expérimentale qui se divise en deux parties :

Dans la première, on a vérifié la fonctionnalité de la machine d'essai. On a réparé les pannes qui empêchent le fonctionnement normal de la machine. Cette étude a été complétée par des dessins de définitions de tous les organes, et un dessin d'ensemble.

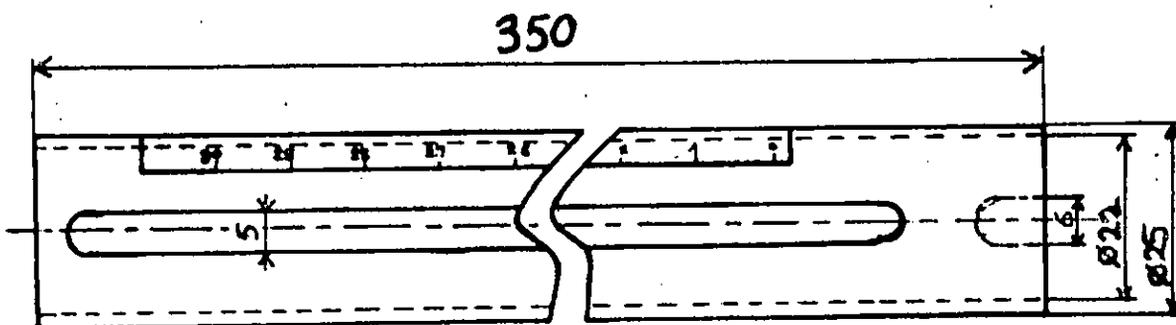
Dans la deuxième, une étude conceptuelle a été menée pour adapter une cellule de corrosion pour fatigue. Pour cela, on a conçu un modèle qui convient à cette machine.

Des testes ont été réalisés sur des éprouvettes entaillées en acier doux, pour la vérification de la bonne fonctionnalité de la machine, entre l'essai de fatigue à l'air et sous corrosion en utilisant l'eau du robinet.

Les essais de fatigue sous corrosion avec une solution spécifique ou à la limite avec de l'eau de mer pour mieux quantifier l'endommagement produit.

BIBLIOGRAPHIE

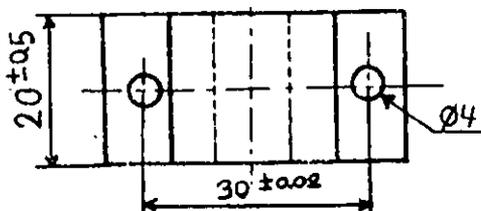
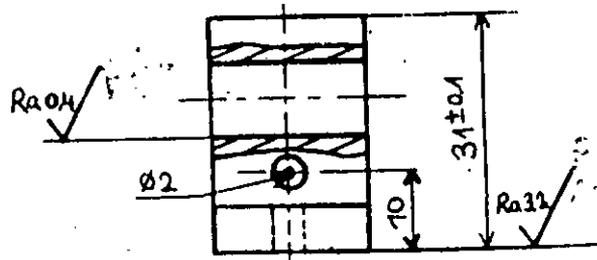
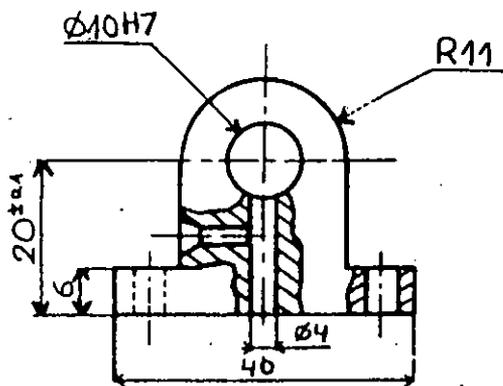
- [1] BAILON /BATHIAS « la fatigue des matériaux et des structures » presse de l'université de Montréal (1980)
- [2] J.COUPRY « Corrosion :traitement, protection, finition » Centre de recherche de Voreppe C^{ic} Pechiney (1994)
- [3] jean-jaques LAMOUREUX « Précis de corrosion » édition Masson (1993)
- [4] dieter LANDOLT « Corrosion et chimie de surface des métaux » édition Dunod (1994)
- [5] Technique d'ingénieur « Essai de fatigue corrosion » (1996)
- [6] CAZAUD « La fatigue des métaux » édition Dunod (1969)
- [7] AKIMOV « Théorie et méthodes d'essai de la corrosion des métaux » édition Mir (1957)
- [8] MECHERI/SAIDI « Banc d'essai en élasticité flexion torsion des plaques » pfe/ ENP (1992)
- [9] BOULENOUAR « Etude conception et réalisation d'une machine d'essai de fatigue par flexion rotative » pfe/ENP (1994)
- [10] CHABANE/BOUDAUD « Etude expérimentale du phénomène de fatigue sous entaille en flexion rotative » pfe/ENP (1997)
- [11] A.CHEVALIER « Guide de dessinateur industriel » édition Hachette technique (1998/1999)
- [12] NAIT OMRAN « Etude de la corrosion dans le milieu marin et la protection des carènes » pfe/Ecole Militaire Polytechnique(1992)
- [13] KHELLADI « Introduction à la théorie de l'endommagement » exposé en poste graduation (2000)



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 BIBLIOTHEQUE — المكتبة
 Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		<h2>PORTE REGLE</h2>	<h3>ENP</h3> <p>Dép. G. Mécanique</p>
1:1				
Etudiant	Kosseir			
Promoteur	Belkacemi			
Promoteur	Guergueb			
				FLR 01.09



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 BIBLIOTHEQUE — المكتبة
 Ecole Nationale Polytechnique

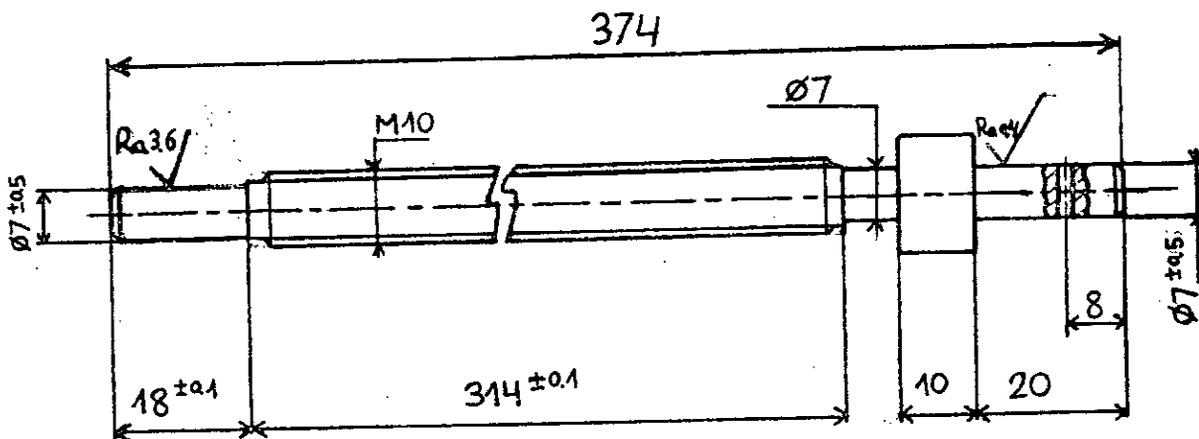
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse	
1:1		
Etudiant	Kosseir	
Promoteur	Belkacemi	
Promoteur	Guergueb	

CHAPE
 SUPPORT

ENP
 Dép. G. Mécanique

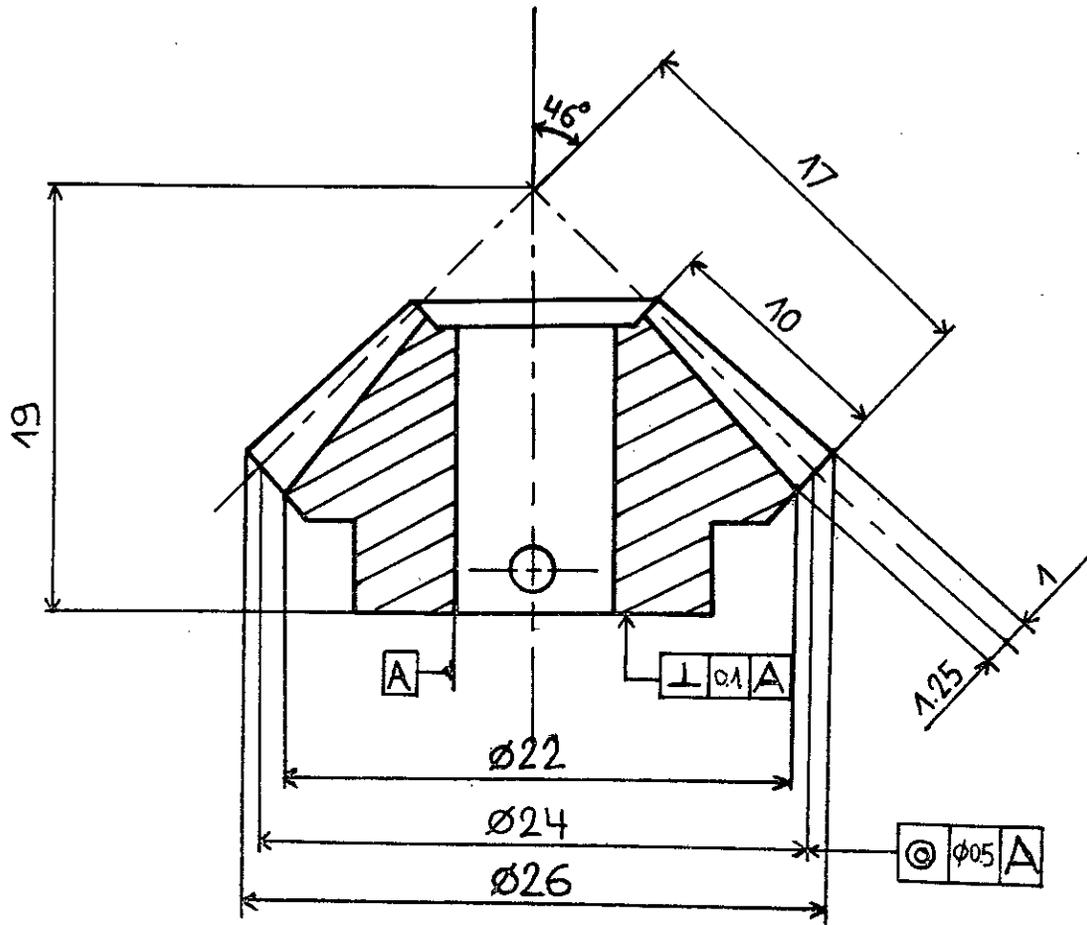
FLR01.08



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		<h2>AXE FILETE</h2>	<h2>ENP</h2>
1:1				
Etudiant	Kosseir			Dép. G. Mécanique
Promoteur	Belkacemi			
Promoteur	Guergueb			
				FLR 01.07



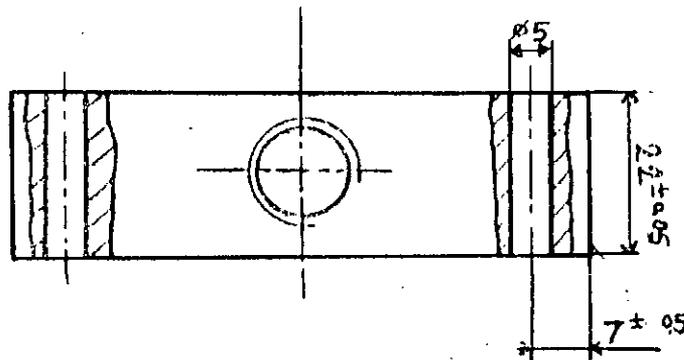
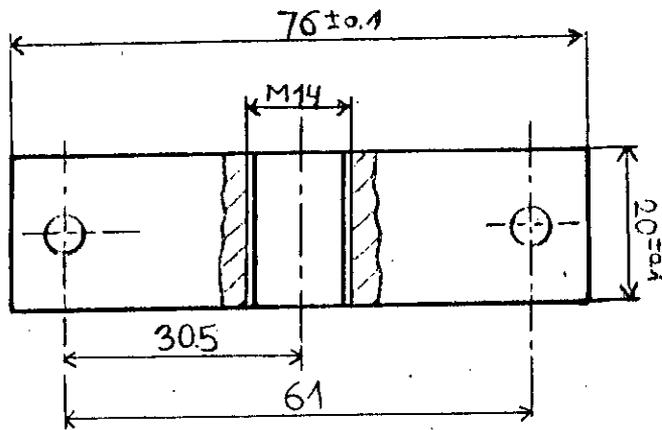
Z : 25

$\alpha : 20^\circ$

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

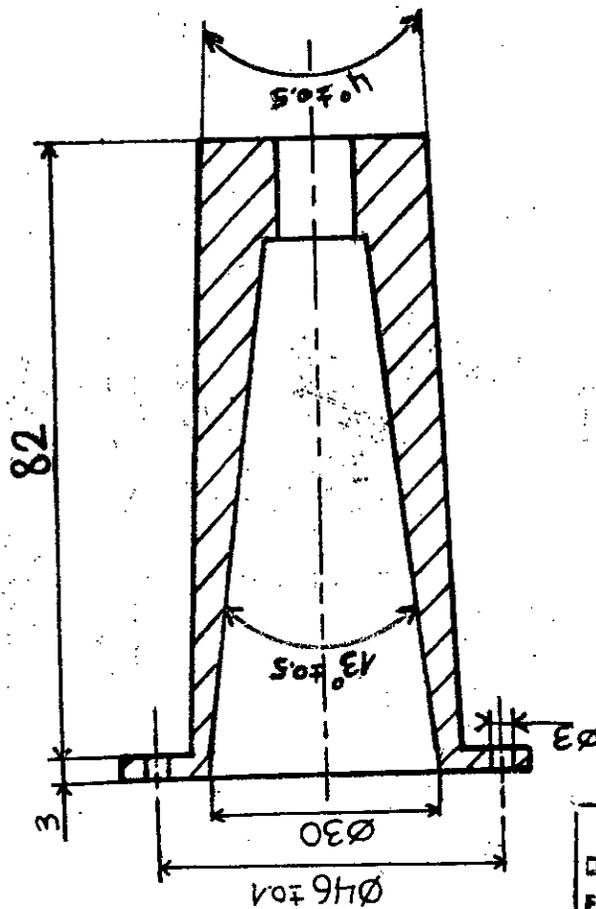
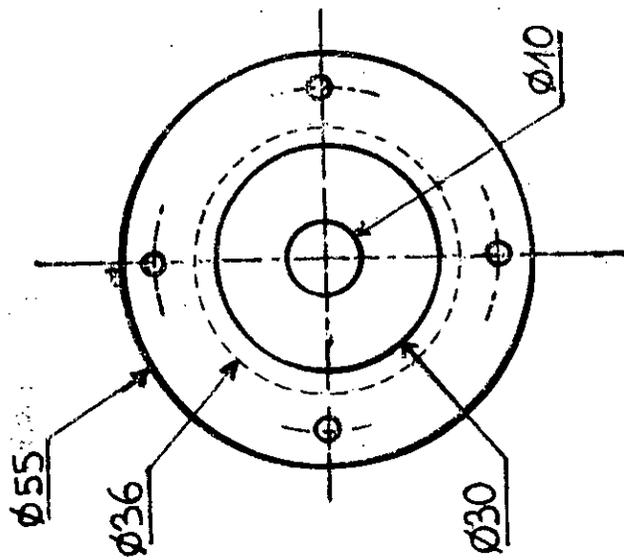
Echelle	Masse		PIGNON CONIQUE	EN.P Dép. G.MECANIQUE
3:1				
Etudiant	Kosseir			
Promoteur	Guergueb			
	Belkacemi			
				FLR01.06



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
 BIBLIOTHEQUE — المكتبة
 Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

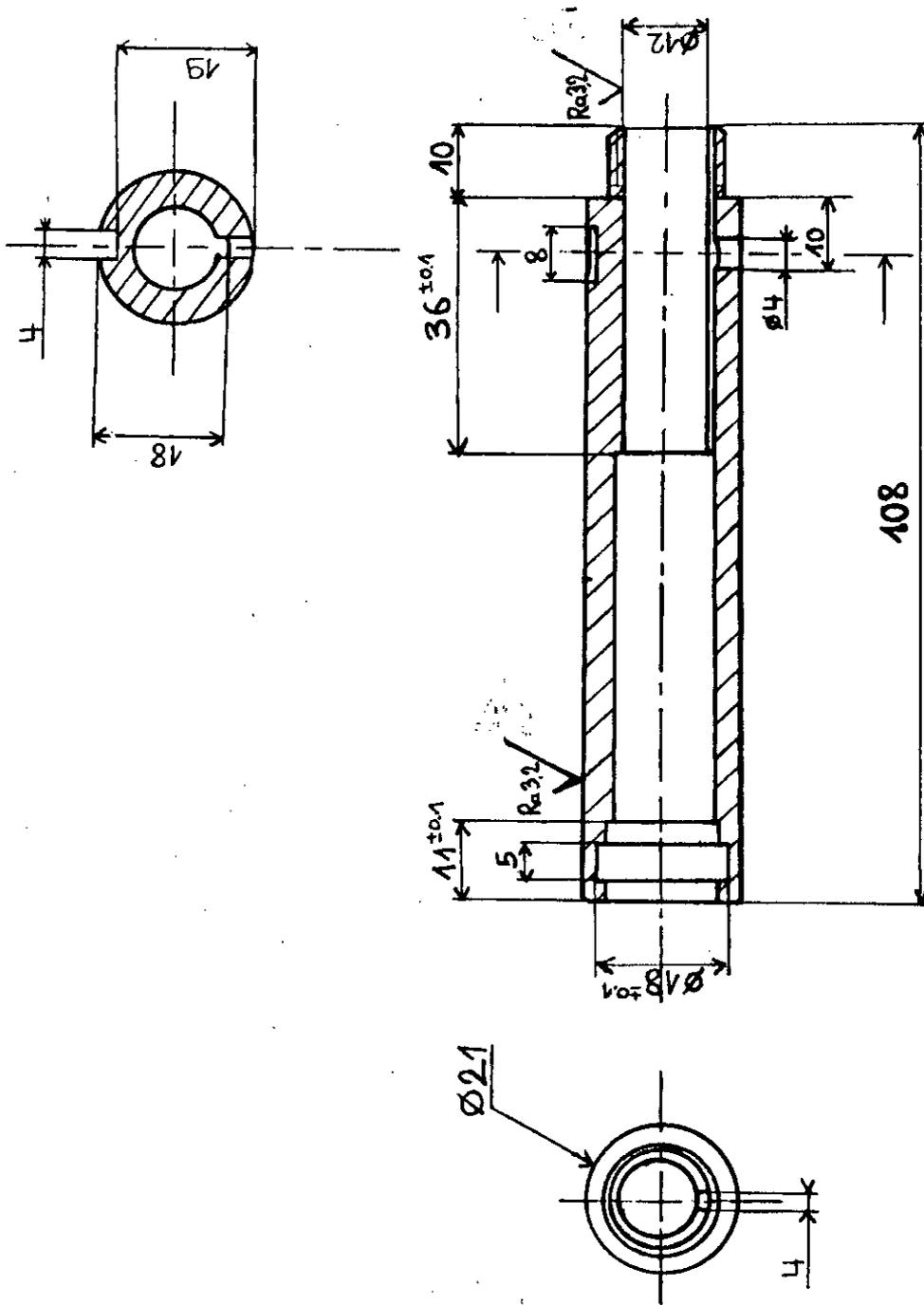
Echelle	Masse		GUIDE de l'AXE	ENP Dép. G. Mécanique
1:1				
Etudiant	Kosseir			
Promoteur	Belkacemi			
Promoteur	Guergueb			
				FLR 01.05



المدرسة الوطنية المتعددة الفنون
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique

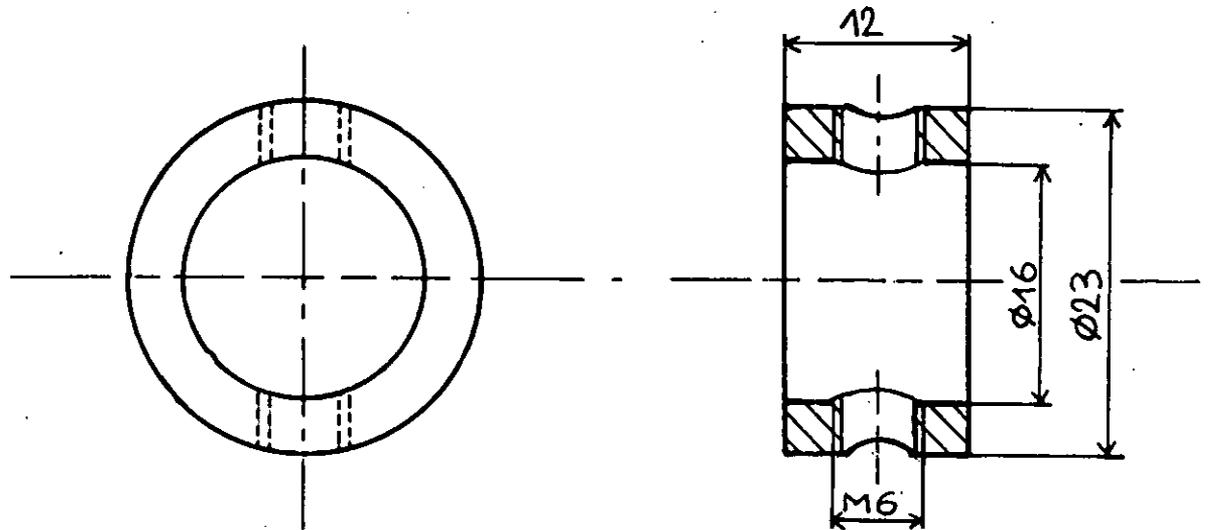
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		PORTE PALIER	ENP Dép. G. Mécanique
1:1				
Etudiant	Kosseir			
Promoteur	Belkacemi			
Promoteur	Guergueb			
				FLR 01.04



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique

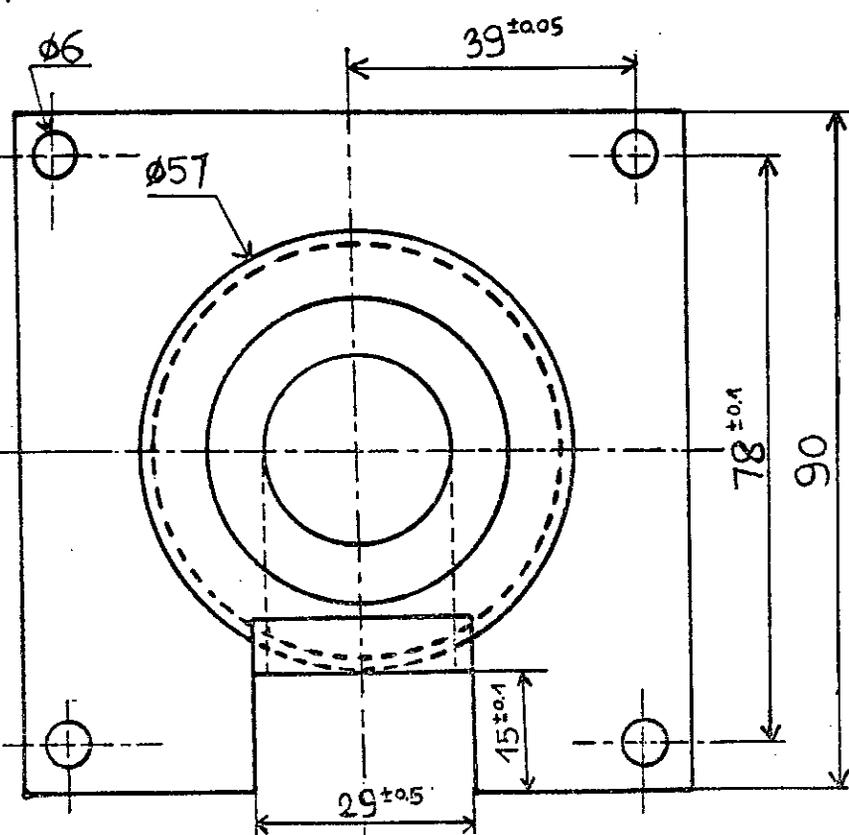
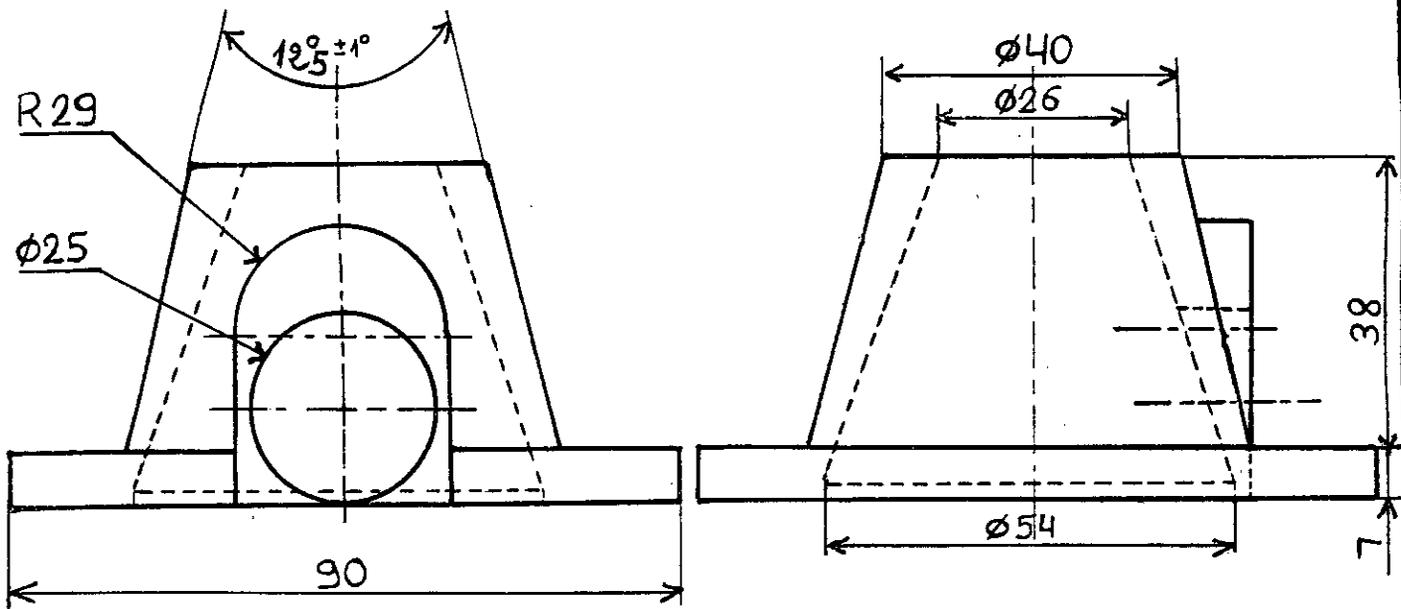
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			PORTE PINCE	E.N.P Dép. G. MECANIQUE
Echelle	Masse			
1:1				
Etudiant	KASSEIR			
Promoteur	Guergueb			
Promoteur	BELKACEMI			
Chef dépt				
Prés jury				FLR 01.03



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 BIBLIOTHEQUE — المكتبة
 Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse			BAGUE D'ARRET	ENP Dép. G. Mécanique
2:1					
Etudiant	Kosseir				
Promoteur	Belkacemi				
Promoteur	Guergueb				
					FLR 01.10



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique

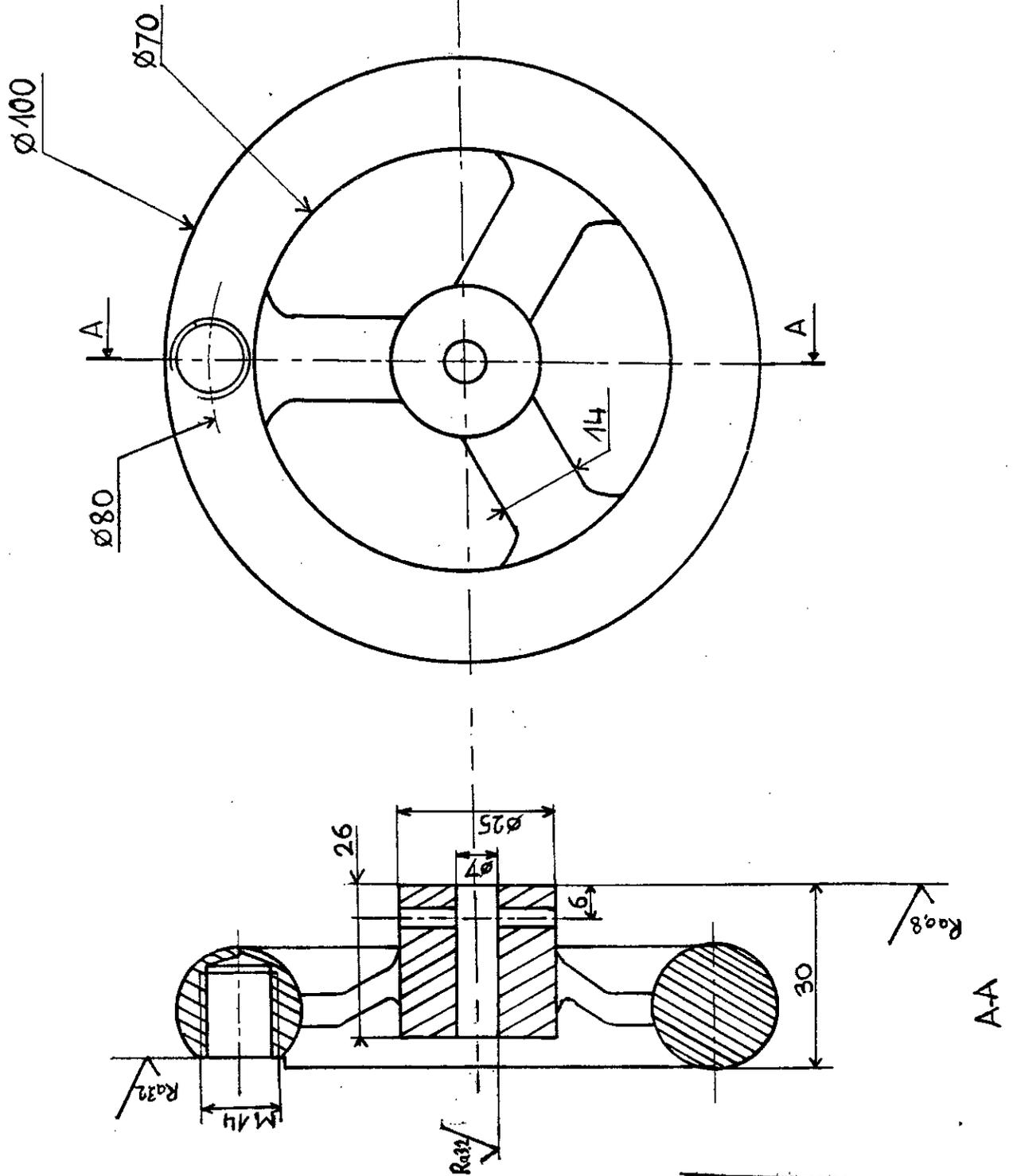
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse	
1:1		
Etudiant	KOSSEIR	
Promoteur	Guergueb	
Promoteur	Belkacemi	
Chef dépt		
Prés. jury		

PORTE VOLANT

E.N.P
 Dép. G. MECANIQUE

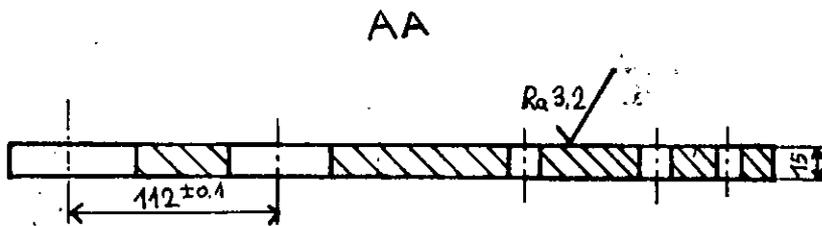
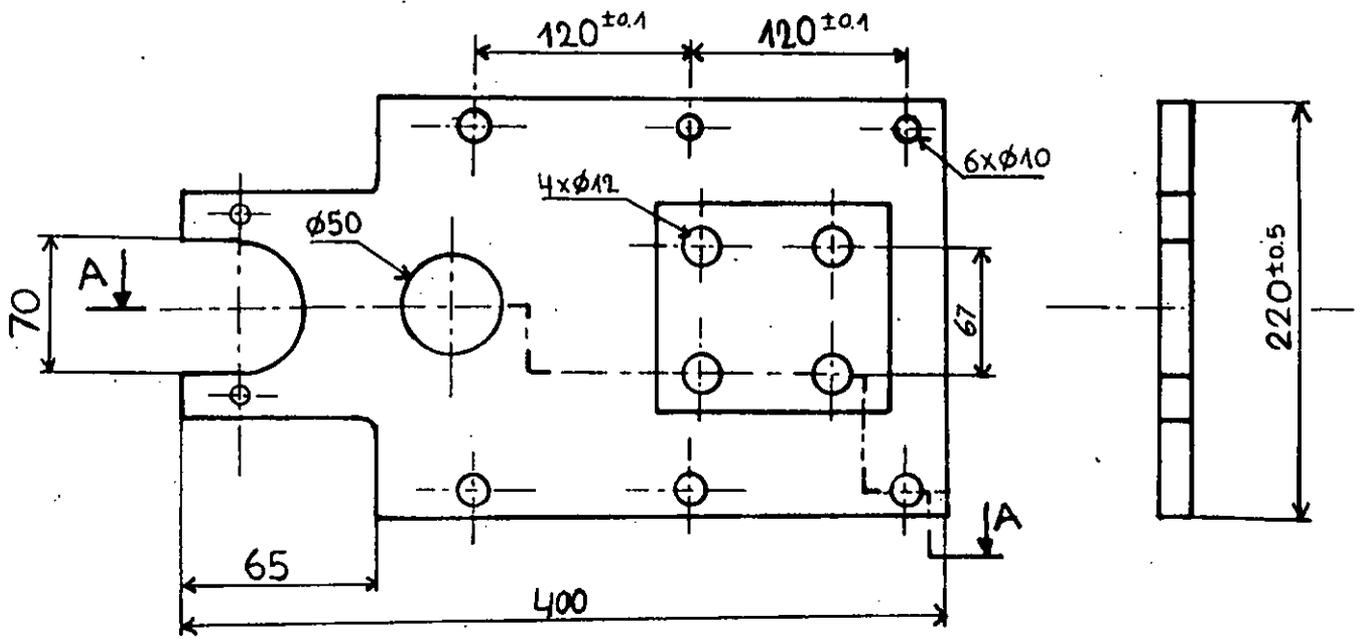
FLR 01.11



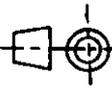
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique

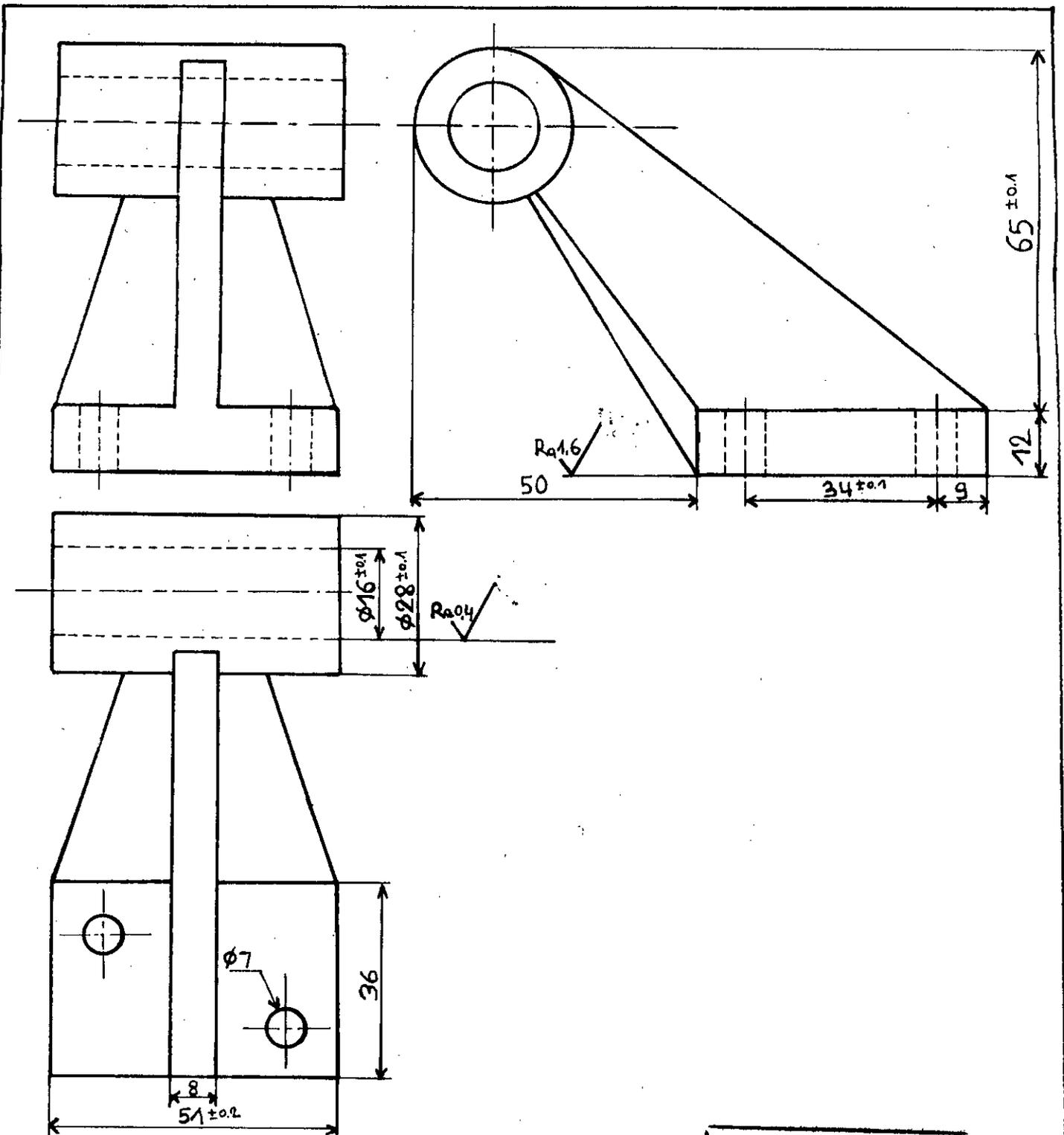
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		VOLANT	E.N.P Dép. G. MECANIQUE
1:1				
Etudiant	Kosseir			
Promoteur	Guergueb			
Promoteur	Belkacemi			
Chef dépt				
Prés jury				FLR 01.12



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique

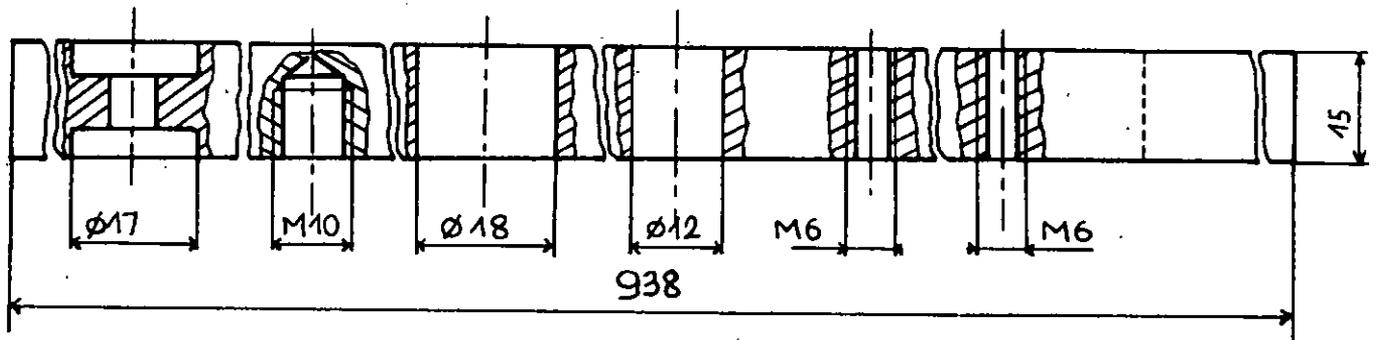
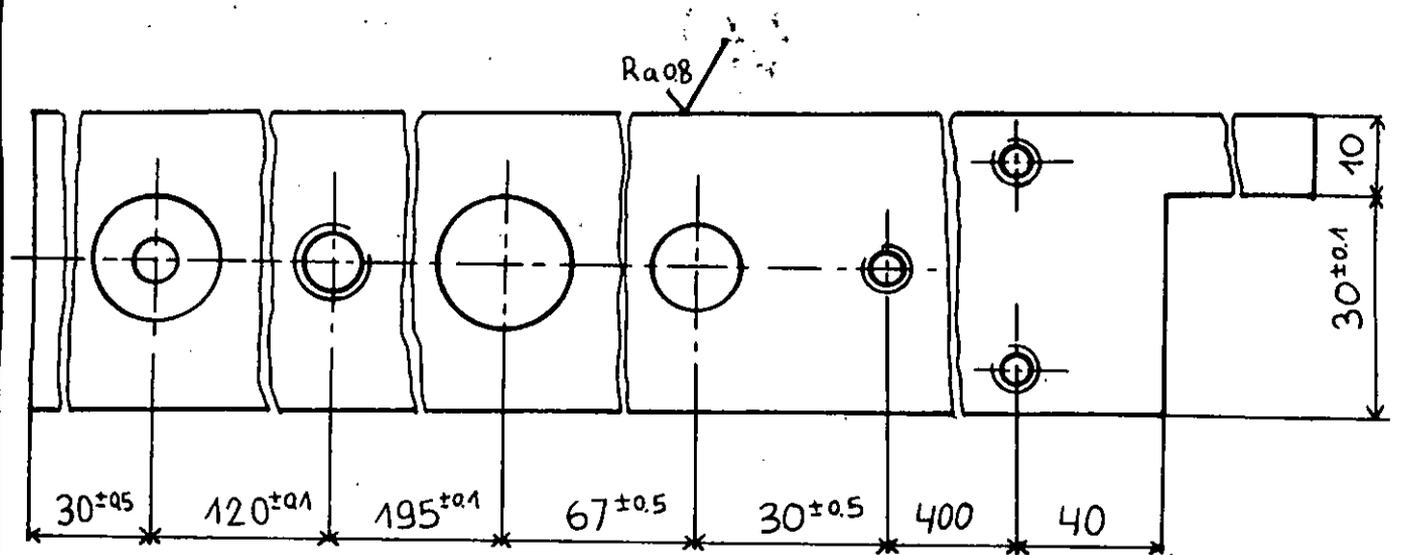
<h1 style="text-align: center;">ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE</h1>			<h2 style="font-size: 2em;">SOCLE</h2>	<h2 style="font-size: 2em;">ENP</h2> <p>Dép. G.MECANIQUE</p>
Echelle	Masse			
1/4				
Etudiant	KOSSEIR			
Promoteur	Guergueb			
Promoteur	Belkacemi			
Chef dépt				
Prés. Jury				FLR 01.15



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

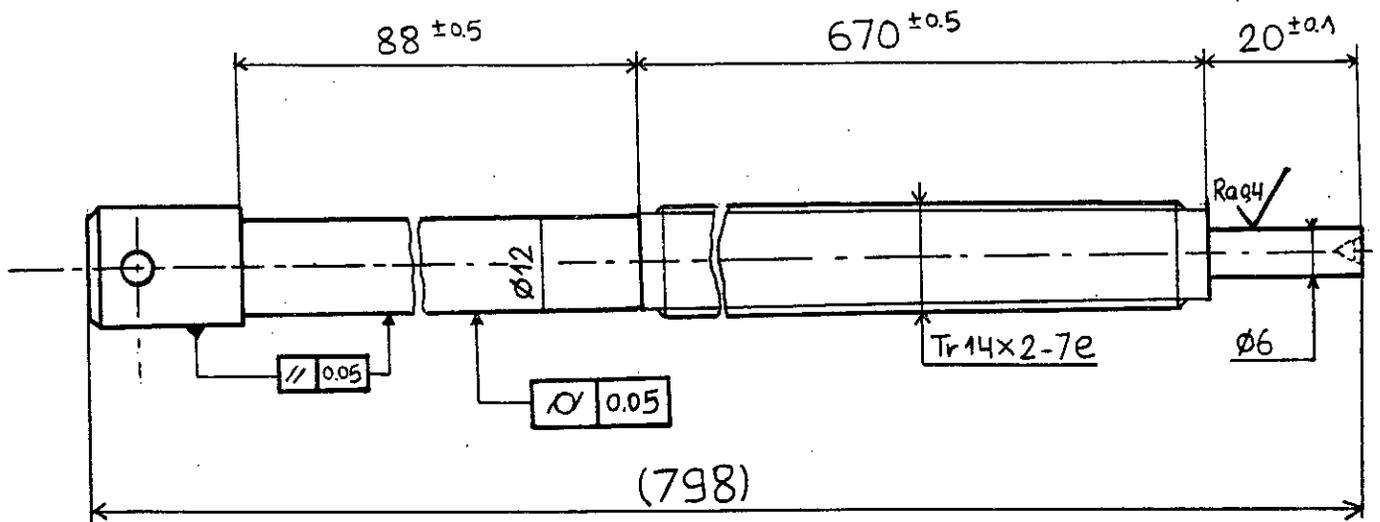
Echelle	Masse		CHAPE SUPPORT	ENP Dép. G. MECANIQUE
1:1				
Etudiant	KOSSEIR			
Promoteur	Belkacemi			
Promoteur	Guergueb			
Chef dépt				
Prés. jury				FLR 01.16



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

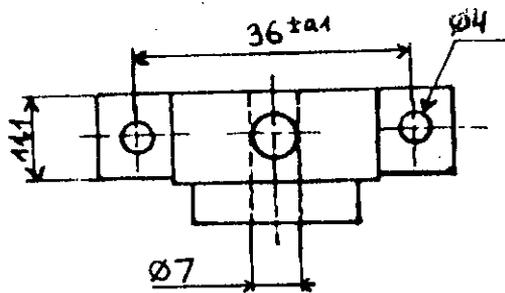
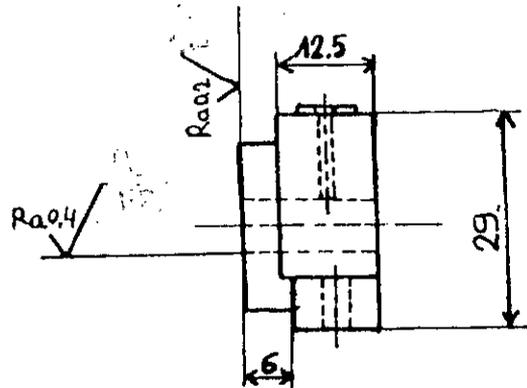
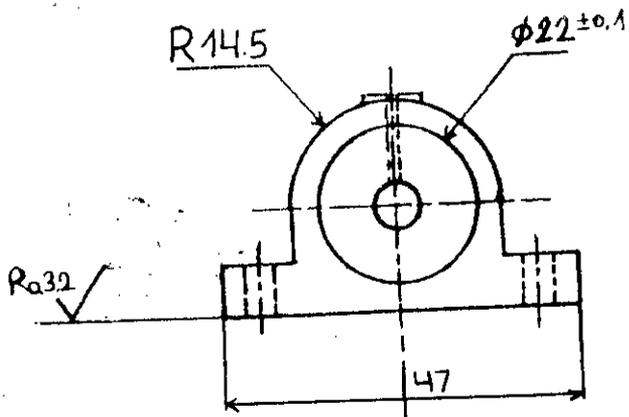
Echelle	Masse		<h2>POUTRE SUPPORT</h2>	<h2>ENP</h2>
1:1				
Etudiant	Kosseir			Dép. G. Mécanique
Promoteur	Belkacemi			
Promoteur	Guergueb			
				<h2>FLR 01.17</h2>



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
 BIBLIOTHEQUE — المكتبة
 Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		<h2>AXE FILETE</h2>	<h2>ENP</h2>
1:1				
Etudiant	Kosseir			Dép. G. Mécanique
Promoteur	Belkacemi			
Promoteur	Guergueb			
				FLR 01.18



المركز الوطني للتقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

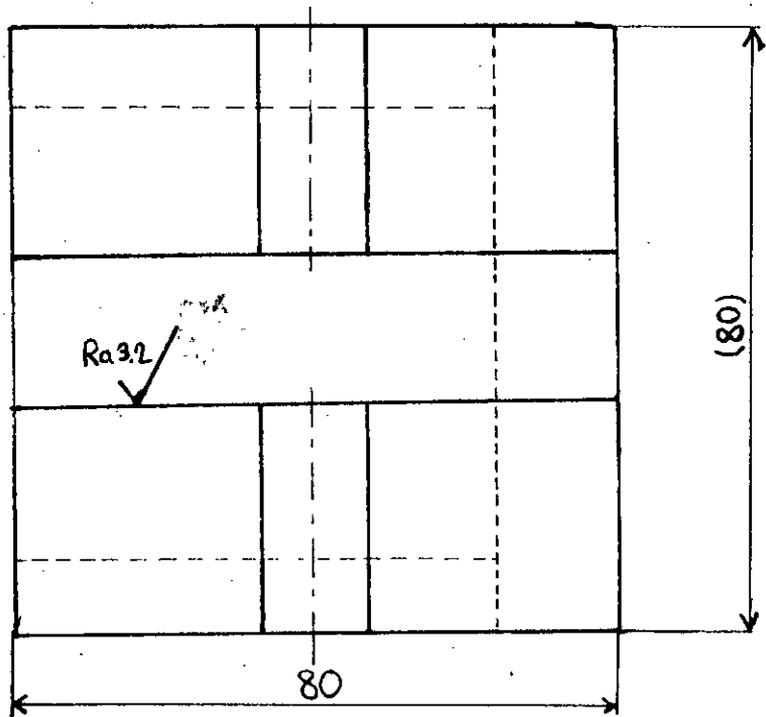
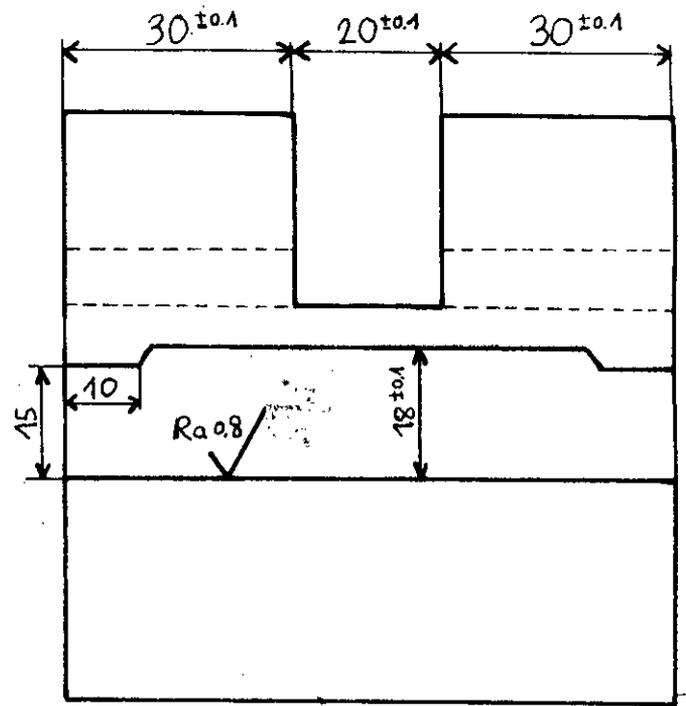
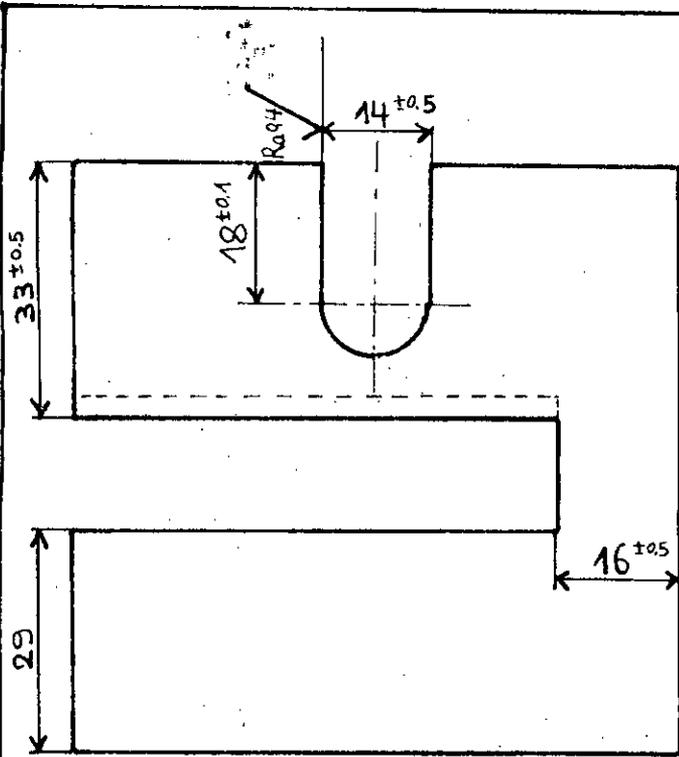
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse	
1:1		
Etudiant	Kosseir	
Promoteur	Belkacemi	
Promoteur	Guergueb	

CHAPE SUPPORT

ENP
Dep. G. Mécanique

FLR01.19



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 BIBLIOTHEQUE — المكتبة
 Ecole Nationale Polytechnique

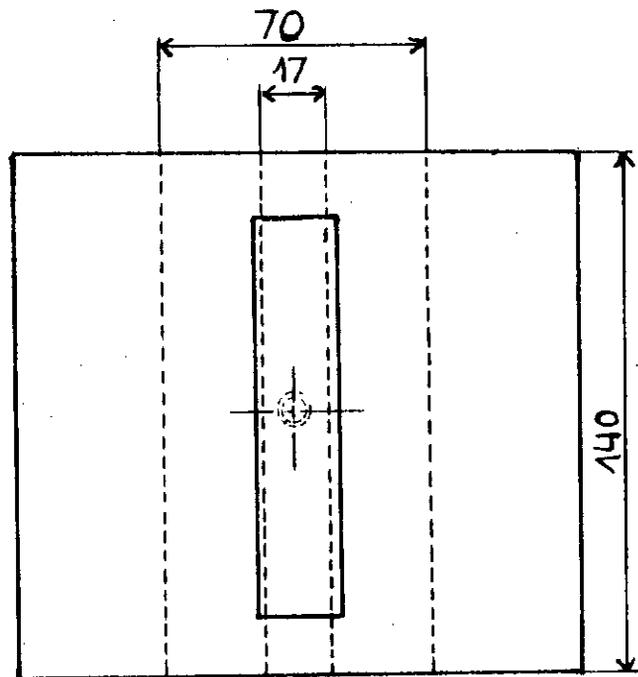
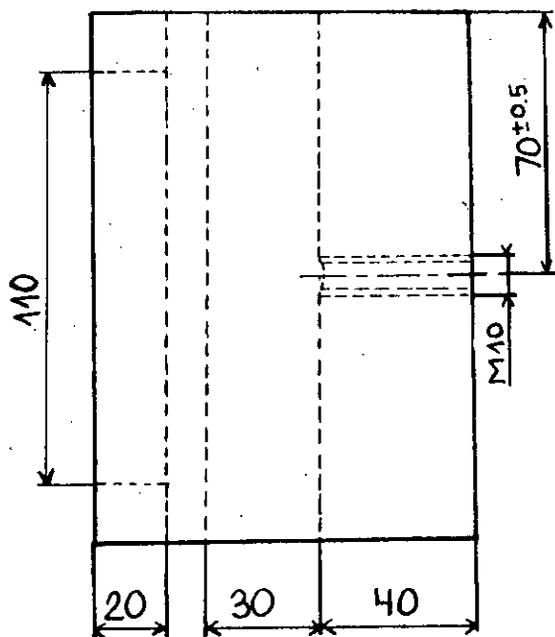
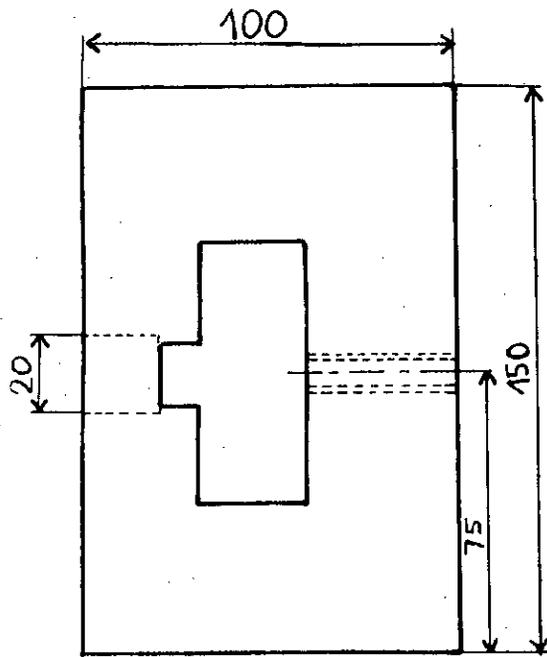
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse	
1:1		
Etudiant	KOSSEIR	
Promoteur	Guergueb	
Promoteur	Belkacemi	
Chef dépt		
Prés. jury		

PORTE AXE

ENP
 Dép. G. MECANIQUE

FLR 01.20



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 BIBLIOTHEQUE — المكتبة
 Ecole Nationale Polytechnique

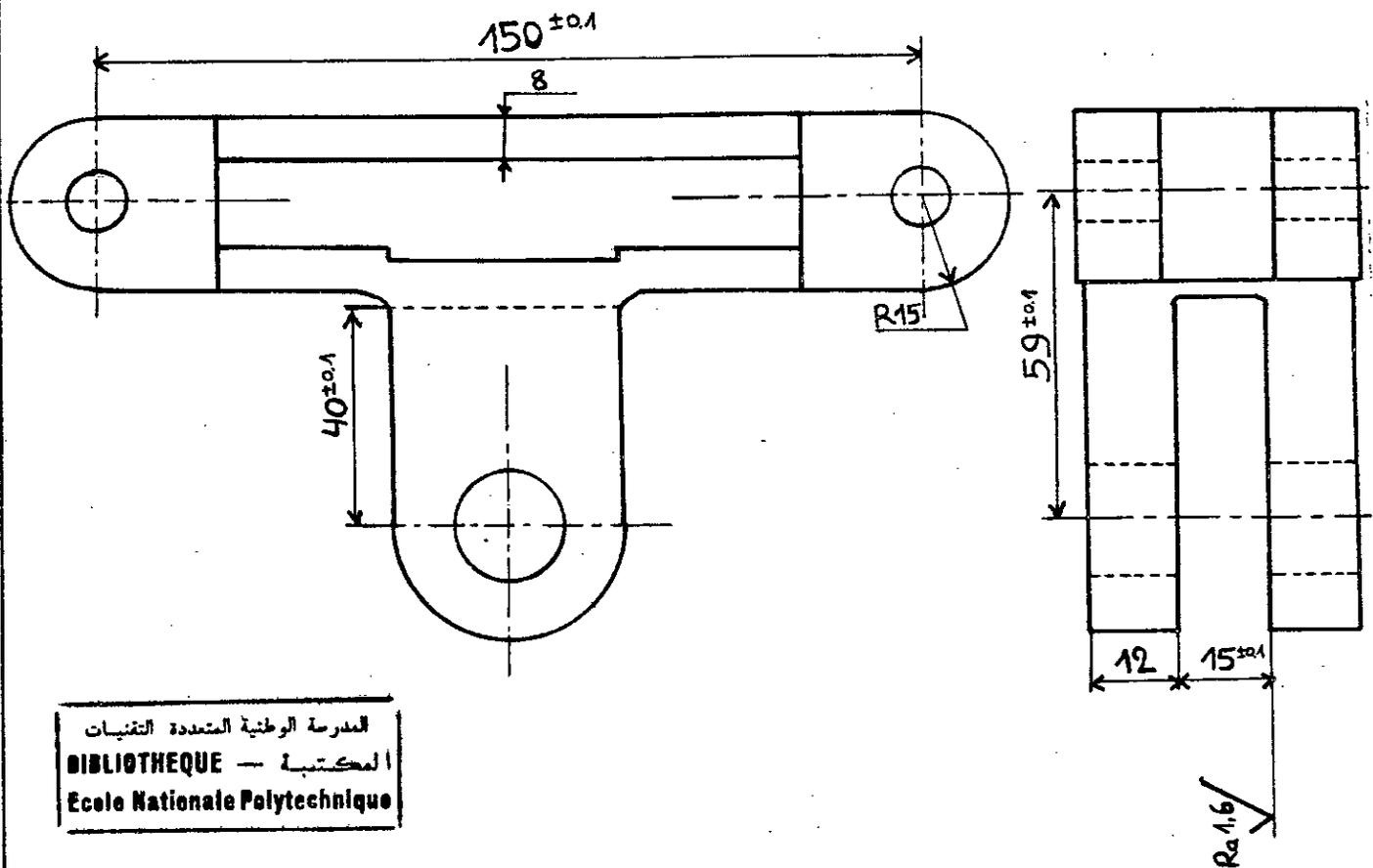
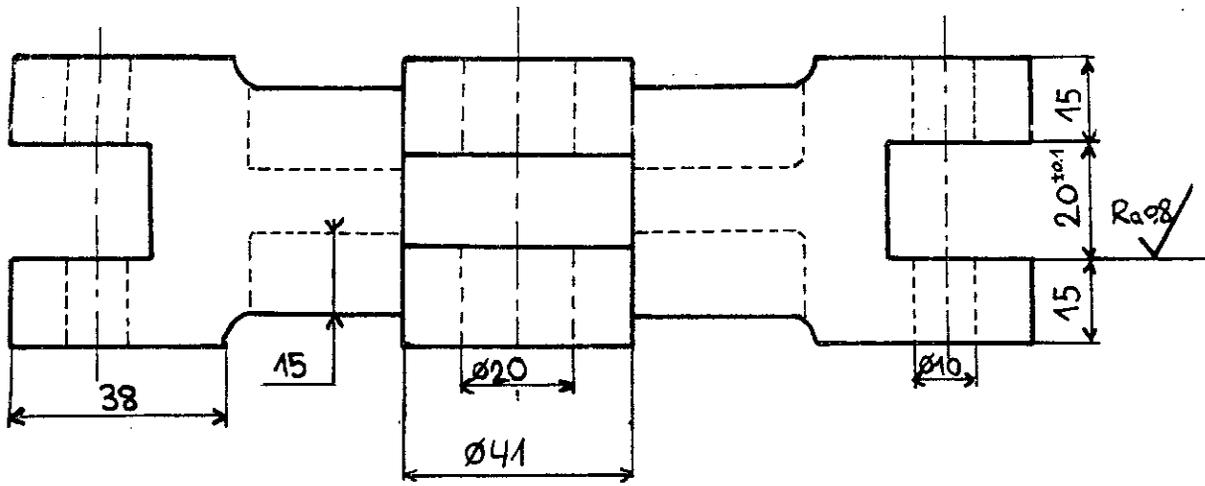
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse	
1/2		
Etudiant	KOSSEIR	
Promoteur	Guergueb	
Promoteur	Belkacemi	
Chef dépt		
Prés. jury		

CONTRE POIDS

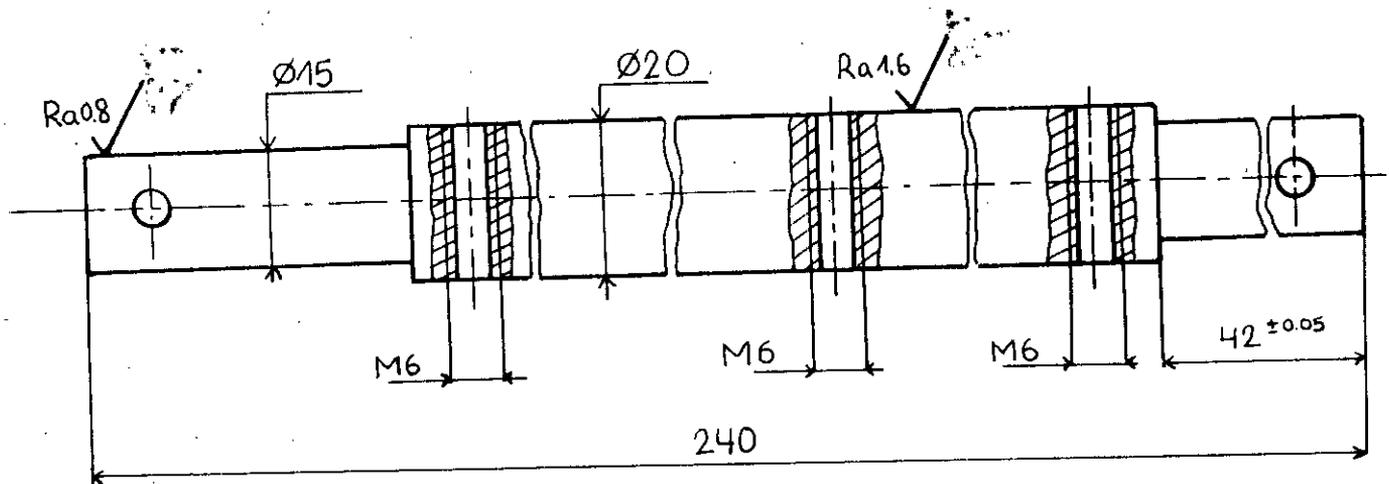
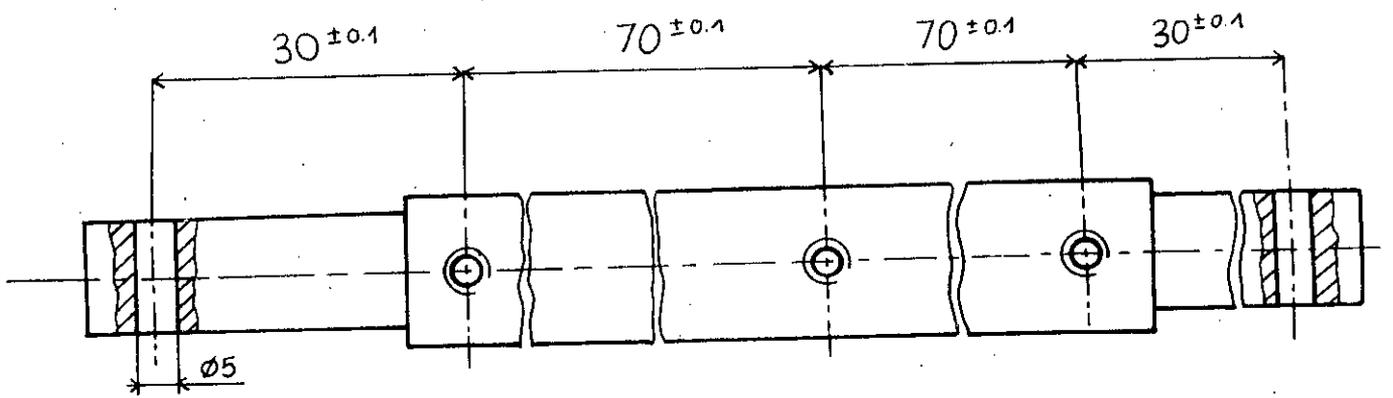
ENP
 Dép. G.MECANIQUE

FLR 01.21



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 BIBLIOTHEQUE — المكتبة
 Ecole Nationale Polytechnique

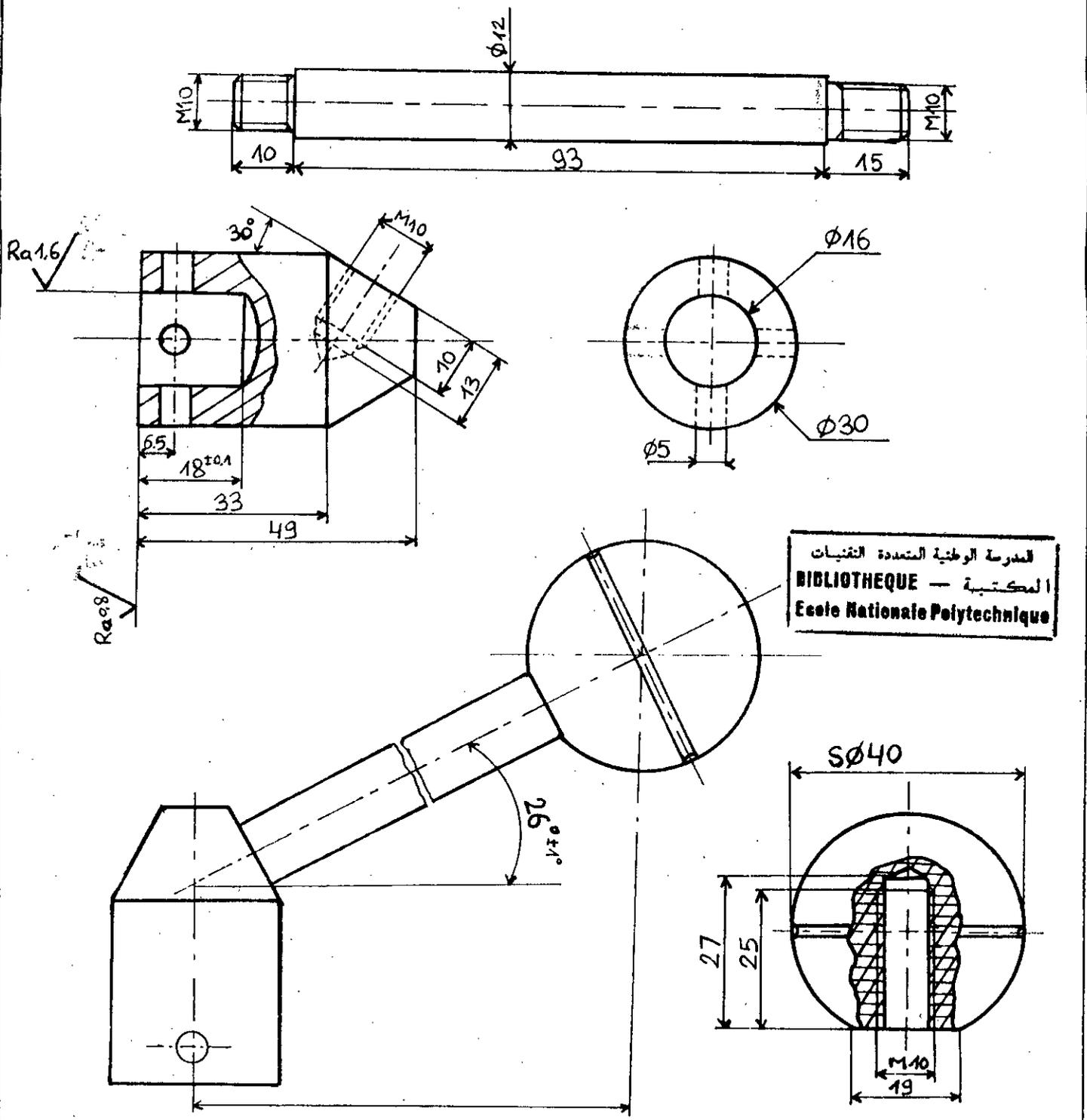
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			
Echelle	Masse		<h1>CHAPE</h1>
3/4			
Etudiant	KOSSEIR		
Promoteurs	Belkacemi		
	Guergueb		
			ENP Dép. G. Mécanique
			FLR 01.24



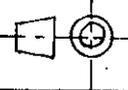
Tolérance générale ± 0.05

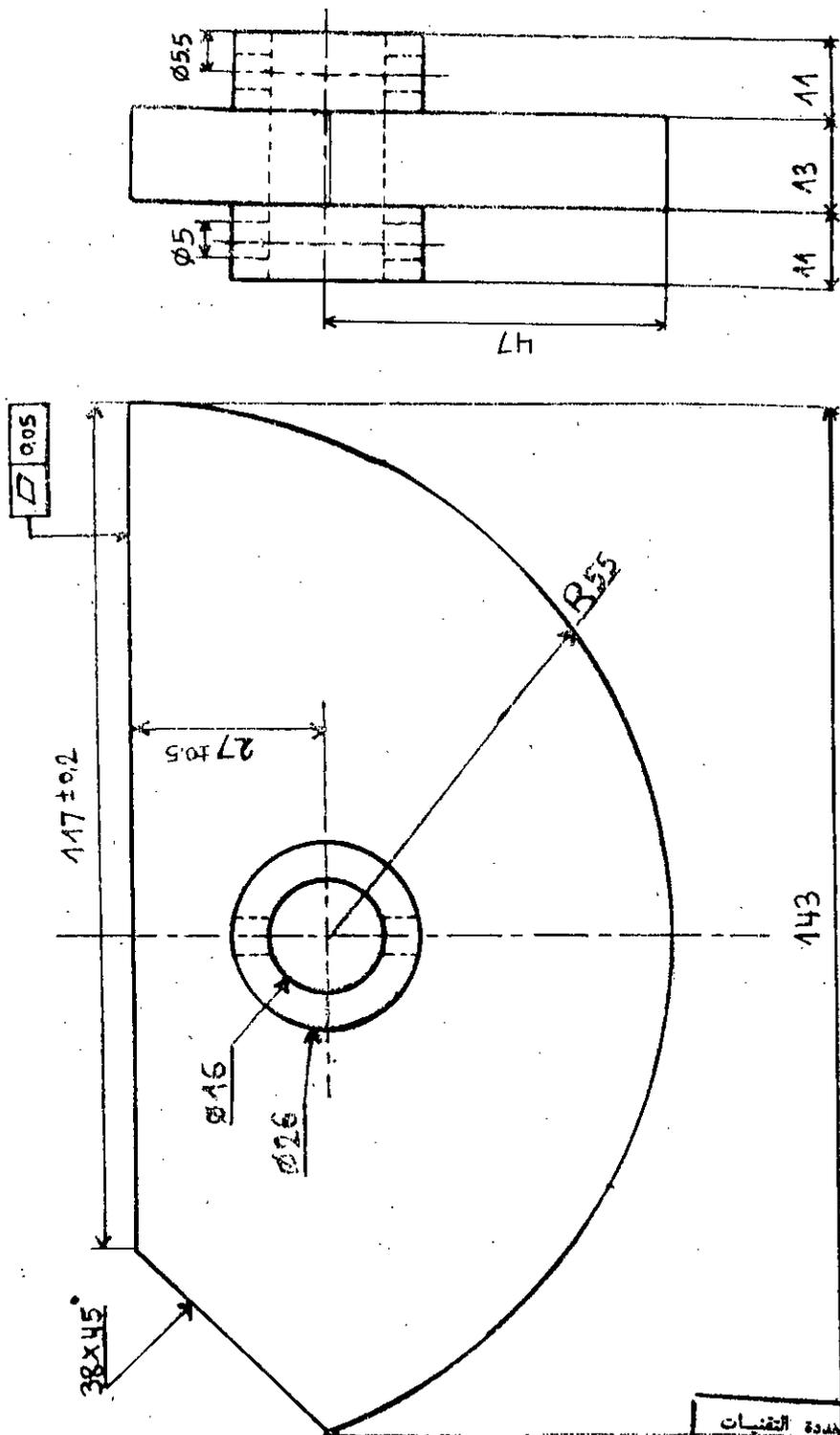
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE				
Echelle	Masse		<p style="text-align: center; font-size: 2em;">AXE</p>	
1:1				
Etudiant	KOSSEIR			<p style="text-align: center; font-size: 1.5em;">ENP</p> <p style="text-align: center;">Dép. G. Mécanique</p>
Promoteur	Belkacemi			
Promoteur	Guergueb			
			FLR 01.25	



المدرسة الوطنية المتعددة الفنون
 BIBLIOTHEQUE — المكتبة
 Ecole Nationale Polytechnique

RP	N° dessin	Designation	Nb	unit	Total	Mat	Observ
				Masse			
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE							
Echelle	Masse	 MANETTE INCLINEE	ENP Dép. G. MECANIQUE FLR 01.26				
1:1							
Etudiant	KOSSEIR						
Promoteur	Guer, queb						
Promoteur	Belkacemi						
Chef dépt							
Prés. jury							



المدرسة الوطنية للمهندسة التقنيات
 BIBLIOTHEQUE — المكتبة
 Ecole Nationale Polytechnique

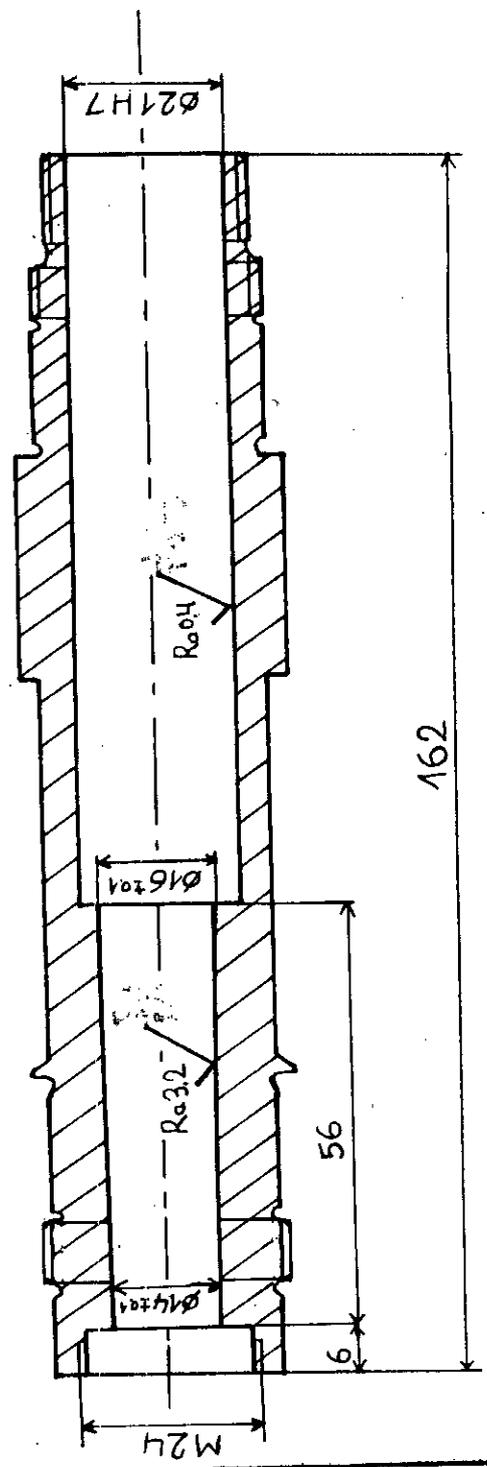
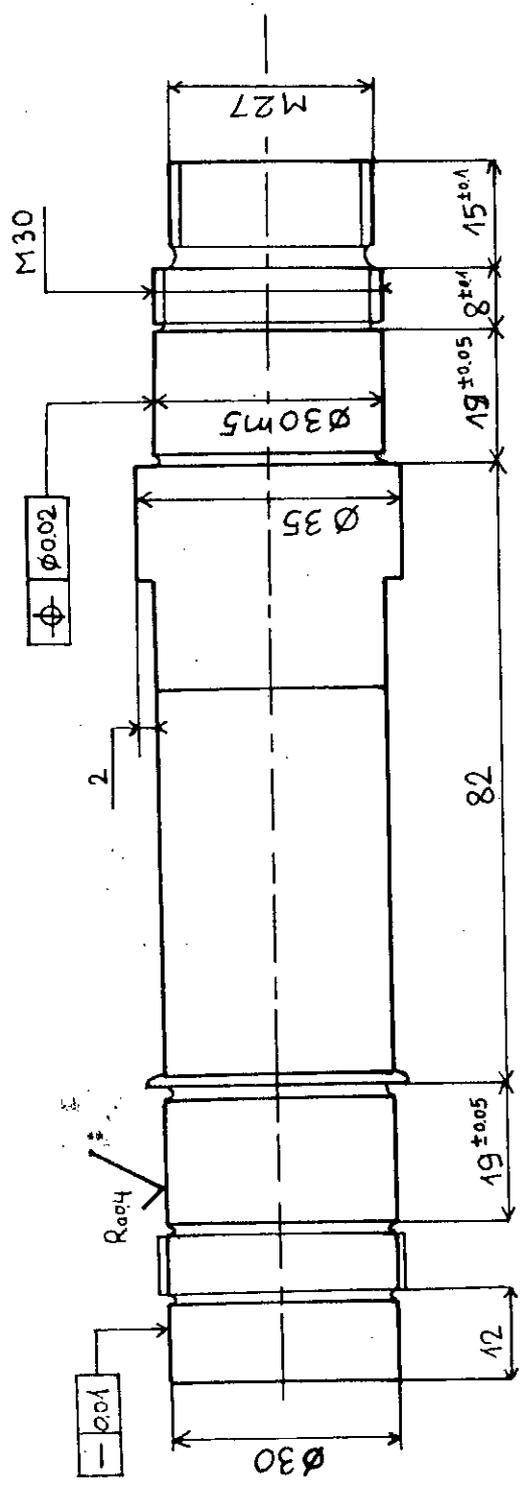
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse	
1:1		
Etudiant	Kosseir	
Promoteur	Belkacemi	
Promoteur	Guergueb	

CAME

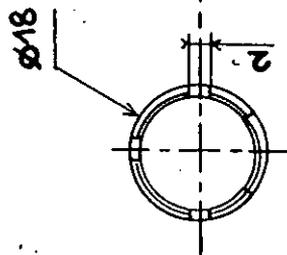
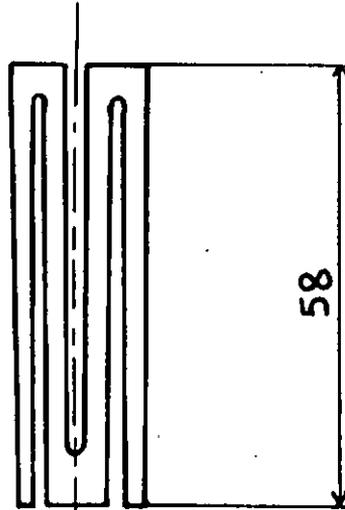
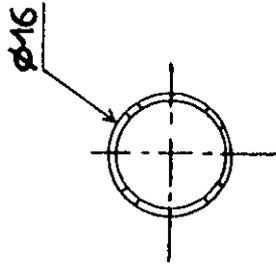
ENP
 Dép. G. Mécanique

FLR 01.27



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 BIBLIOTHEQUE — المكتبة
 Ecole Nationale Polytechnique

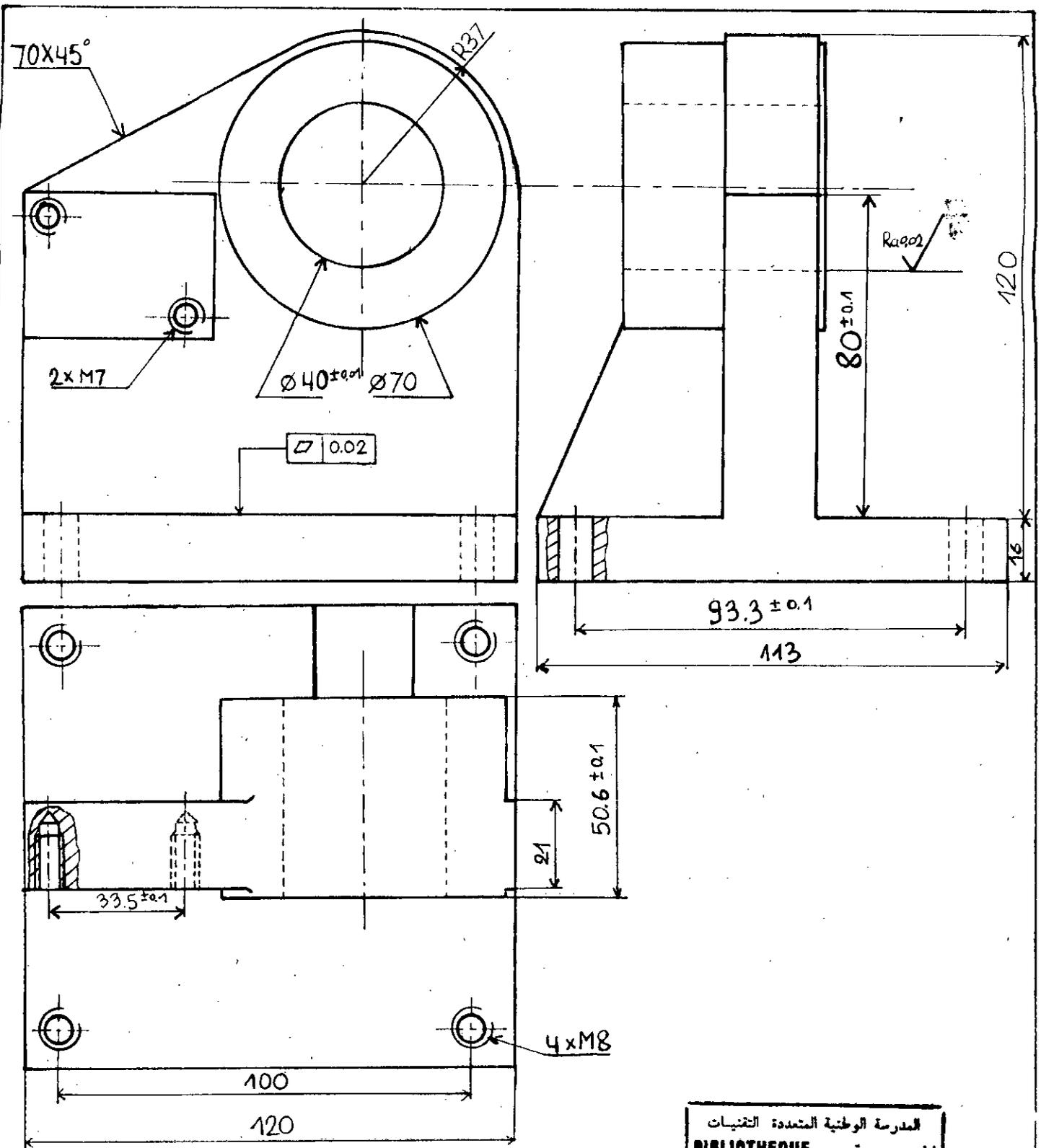
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			
Echelle	Masse		MANDRIN
1:1			
Etudiant	Kosseir		ENP Dép. G. Mécanique
Promoteur	Belkacemi		
Promoteur	Guergueb		
			FLR 01.30



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

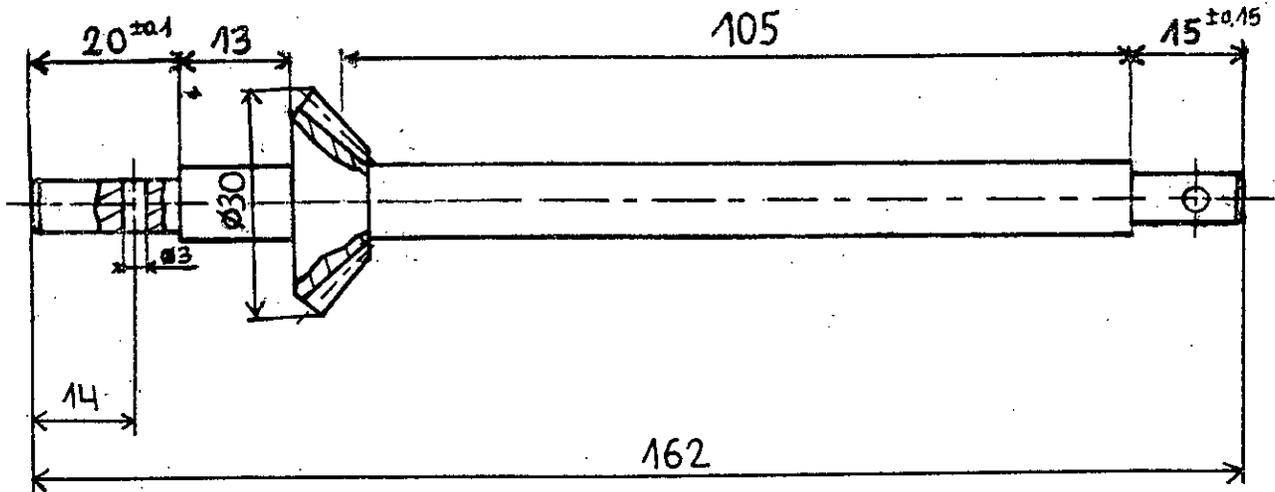
Echelle	Masse		<h2>PINCE</h2>	<p>E.N.P Dép. G.MECANIQUE</p>
1:1				
Etudiant	KOSSEIR			
Promoteur	Guergueb			
Promoteur	BELKACEMI			
Chef dépt				
Prés jury				<h2>FLR 01.31</h2>



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 BIBLIOTHEQUE — المكتبة
 Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

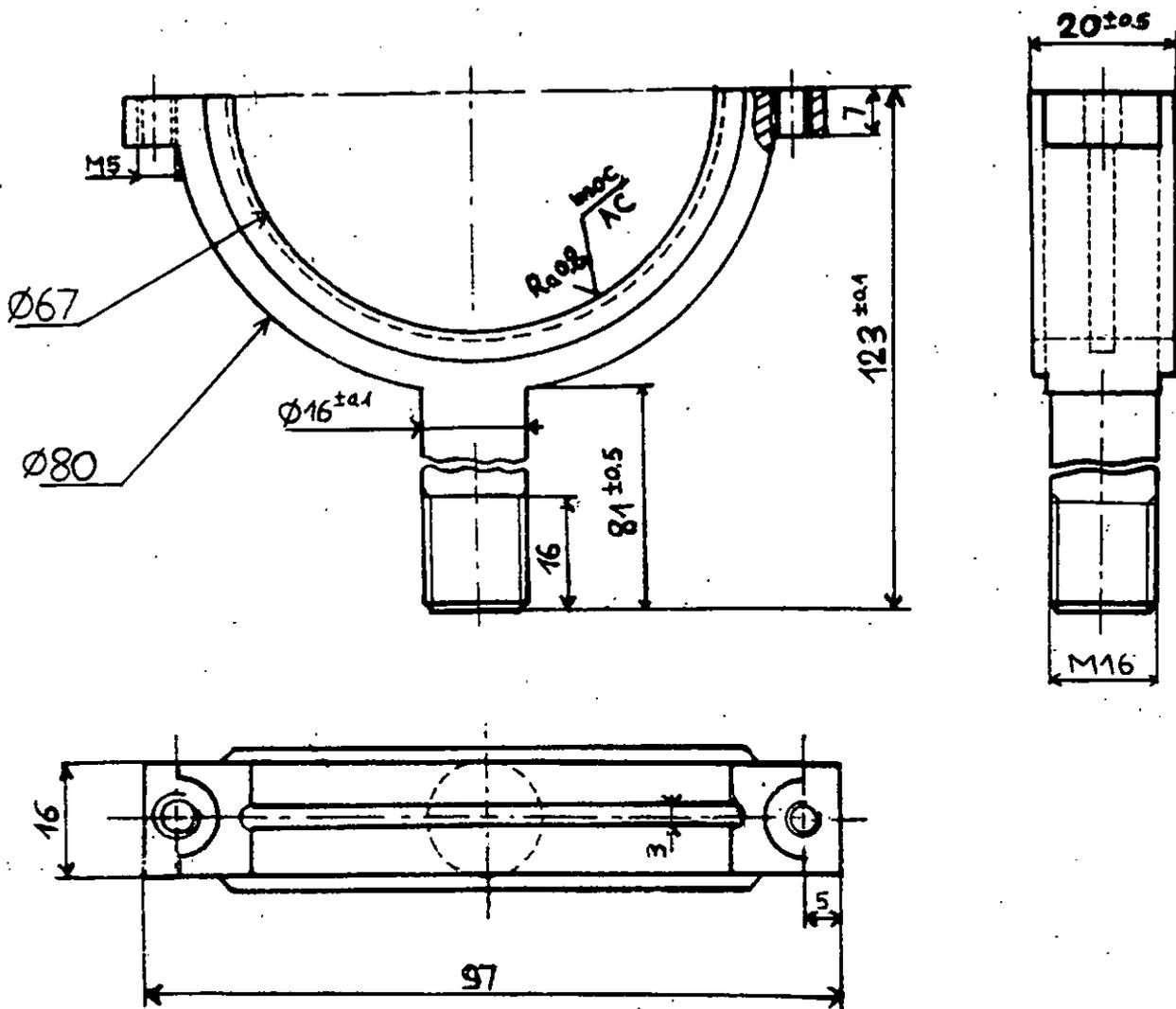
Echelle	Masse		<h2>CORPS SUPPORT</h2>	<p>ENP Dép. G. MECANIQUE</p>
3/4				
Étudiant	KOSSEIR			
Promoteur	Belkacemi			
Promoteur	Guergueb			
Chef dép.				
Prés. Jury				FLR 01.32



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

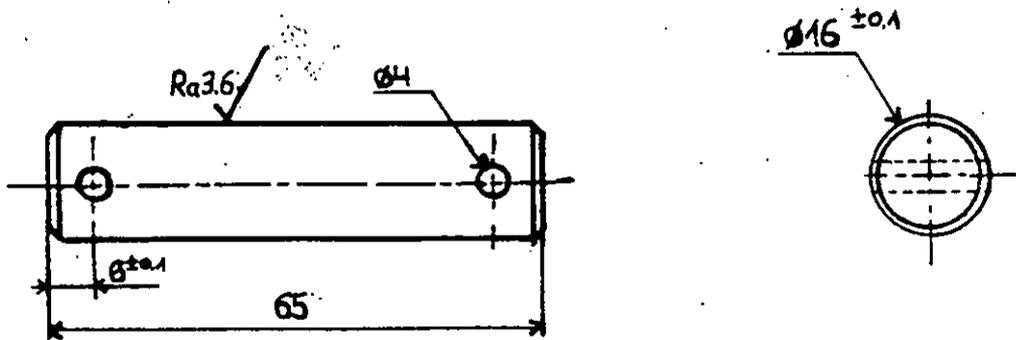
Echelle	Masse		ARBRE	ENP	
1:1					
Etudiant	Kosseir				Dép. G. Mécanique
Promoteur	Belkacemi				
Promoteur	Guergueb				
				FLR 01.34	



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		APPUI	ENP
Etudiant	KOSSEIR			
Promoteurs	Belkacemi			
	Guergueb			
				FLR 01.35

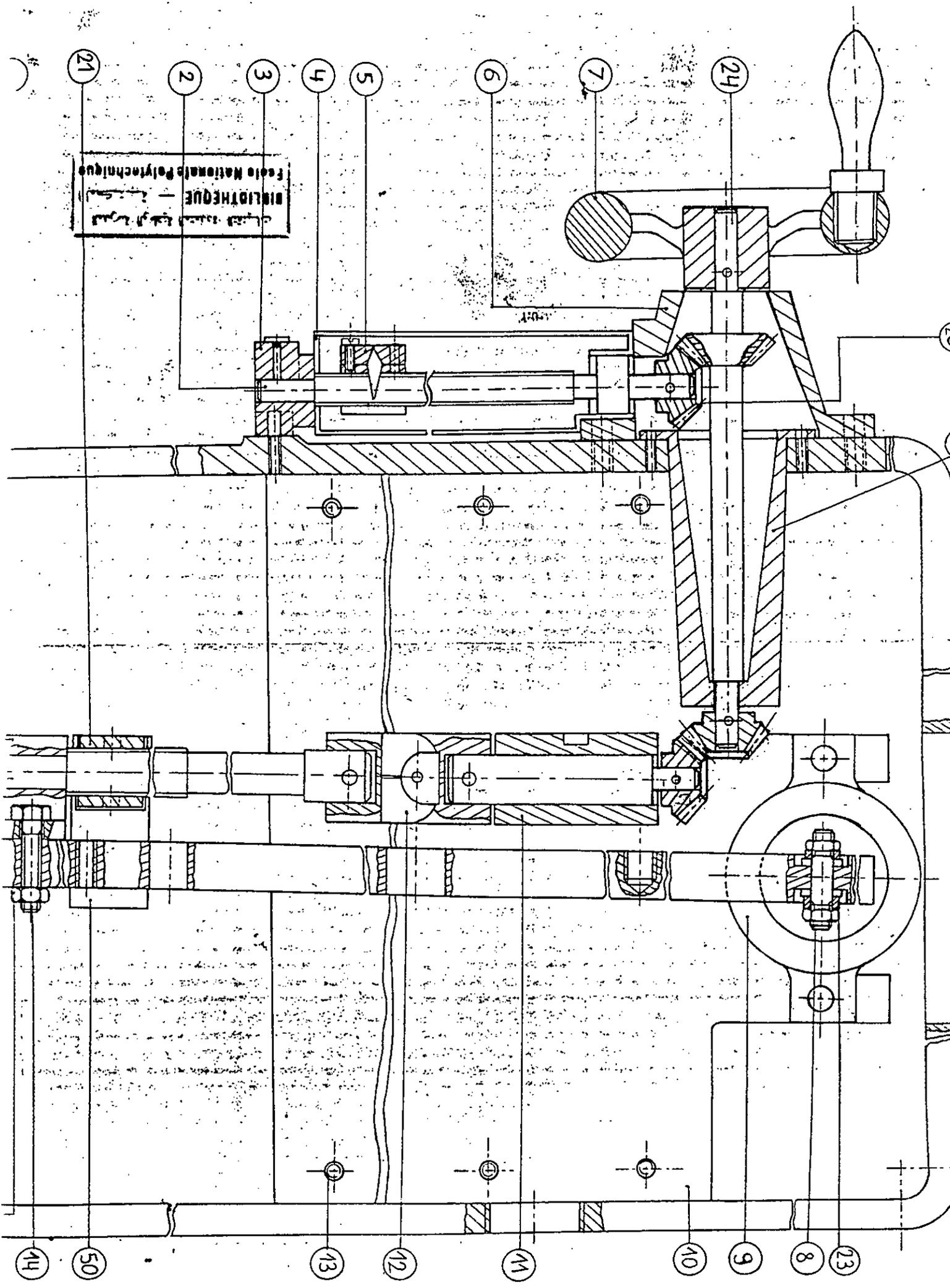


المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

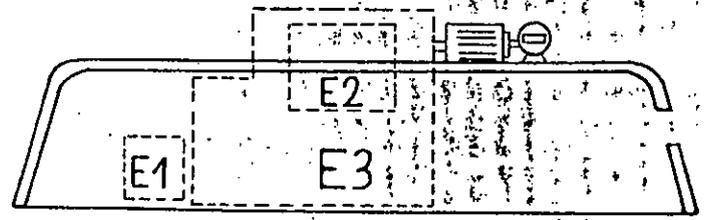
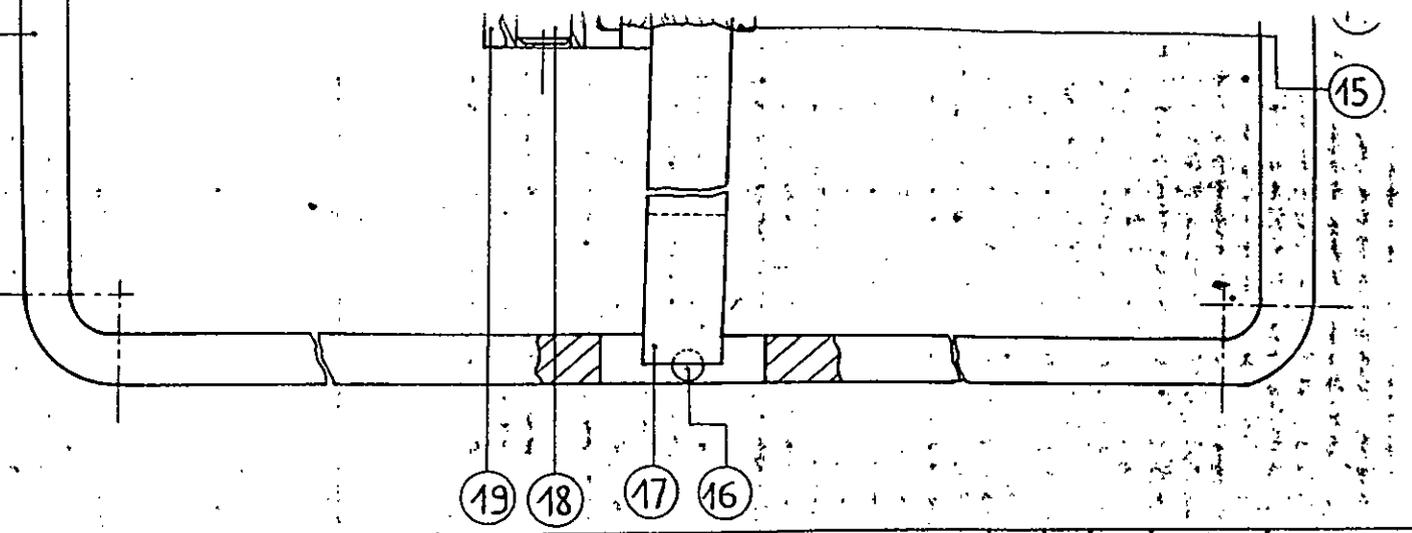
Echelle	Masse		<h2>AXE</h2>	<h2>ENP</h2>
1:1				
Etudiant	KOSSEIR			
Promoteurs	Belkacemi			
	Guergueb			
				FLR 01.36

Dép. G. Mécanique



Bureau National Polytechnique
 BUREAU NATIONAL POLYTECHNIQUE
 Feuille Nationale Polytechnique

المعهد الوطني للتكنولوجيا
 BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique



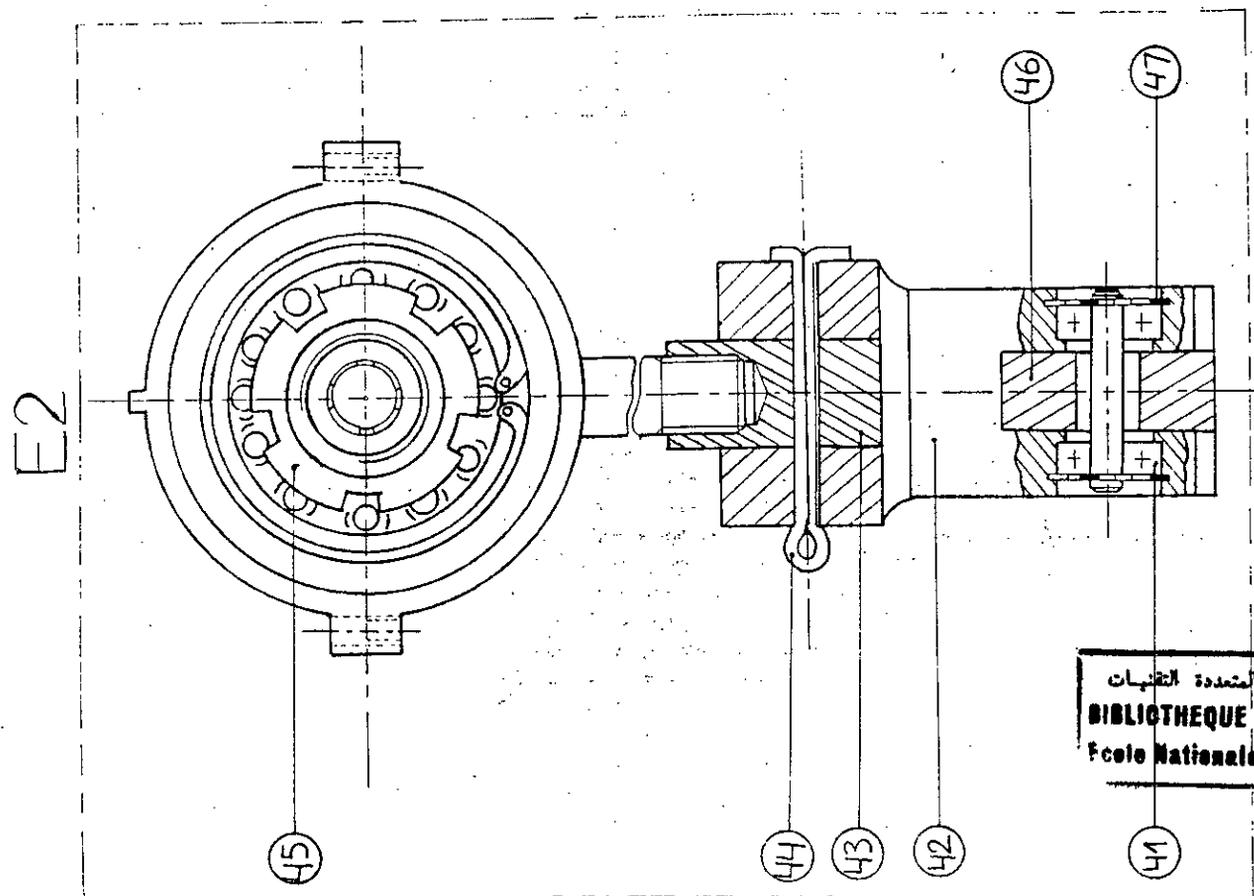
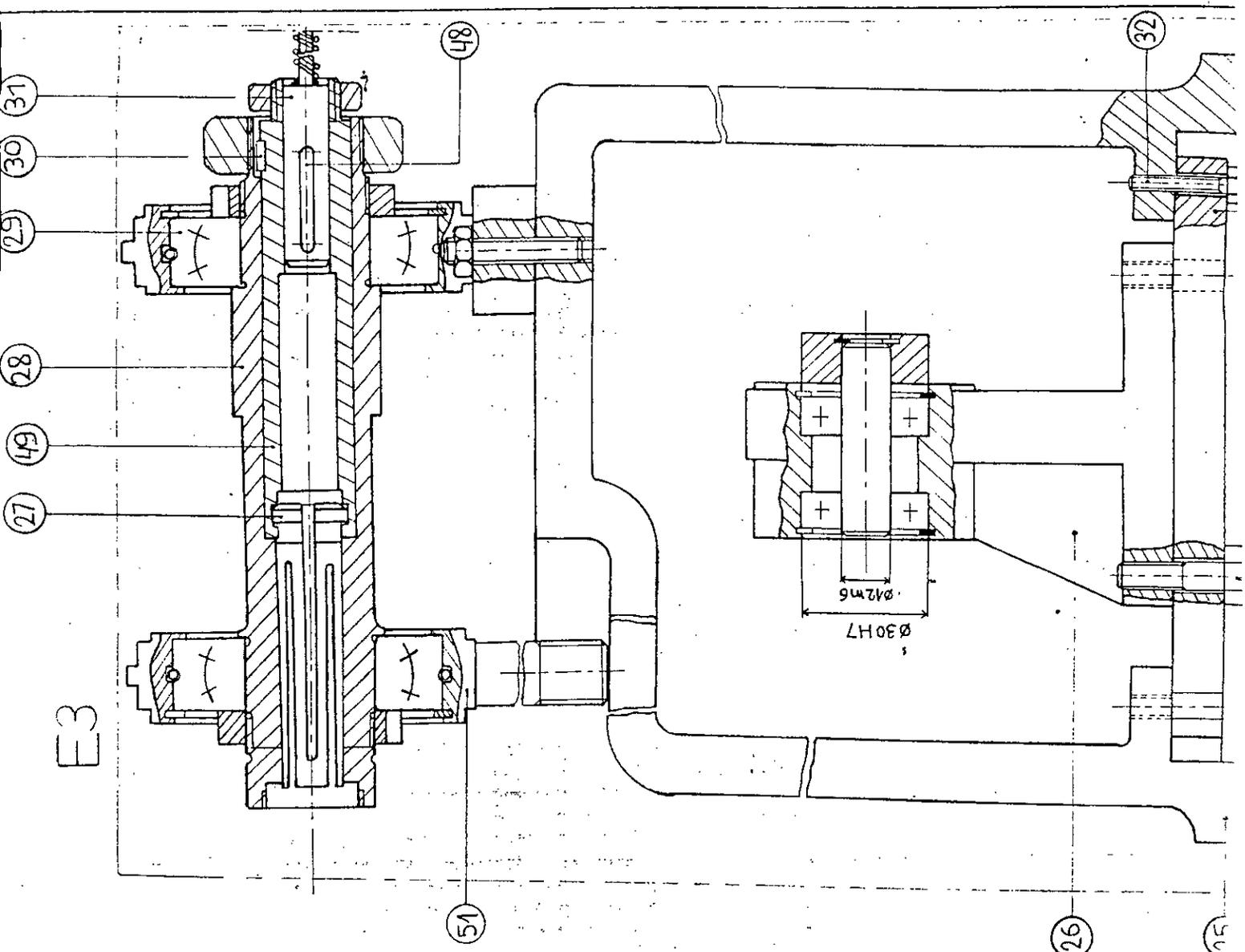
19	FLR 01.19	CHAPE SUPPORT	01				
18	FLR 01.18	AXE FILETE	01				
17	FLR 01.17	POUTRE SUPPORT	01				
16		INTERRUPTEUR	01				
15		VIS M6X30-8-8	02				
14		ECROU M6-10	02				EN24032
13		VIS M6X30	06				EN 24014
12		JOINT de CARDAN	01				
11	FLR 01.16	BAGUE SUPPORT	01				
10	FLR 01.15	SOCLE	01				
9	FLR 01.14	AMORTISSEUR a HUILE	01				
8	FLR 01.13	GOUJON	01				
7	FLR 01.12	VOLANT	01				
6	FLR 01.11	PORTE VOLANT	01				
5	FLR 01.10	BAGUE D'ARRET	01				
4	FLR 01.09	PORTE REGLE	01				
3	FLR 01.08	CHAPE SUPPORT	01				
2	FLR 01.07	AXE FILETE	01				
1		CORPS	01				
Rp	N°dessin	Designation	Nb	unit	Total	Mat	observ
				Masse			

50	FLR 01.20	PORTE AXE	01				
24	FLR 01.34	ARBRE	01				
23		RONDELLE	02				
22	FLR 01.04	PORTE PALIER	01				
21	FLR 01.05	GUIDE D'AXE	01				

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		machine de flexion rotative	ENP dép. GMECANIQUE
1:1				
Etudiant	KOSSEIR			
Promoteur	Guegueb			
	Belkacemi			

ELP 0100



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
 BIBLIOTHEQUE — المكتبة
 Ecole Nationale Polytechnique