

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

3/88

وزارة التعليم العالي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

2EX

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : MINES ET METALLURGIE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

REALISATION
D'UN
APPAREIL D'USURE

1 PLANCHE

Proposé par :

MAISTROUK A.

Etudié par :

GHRAB K.

ZIANE M.S.

Dirigé par :

MAISTROUK A.

PROMOTION JANVIER 1988

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : MINES ET METALLURGIE

المدسة الوطنية المتقدمة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

REALISATION
D'UN
APPAREIL D'USURE

Proposé par :

MAISTROUK A.

Etudié par :

GHRAB K.

ZIANE M.S.

Dirigé par :

MAISTROUK A.

PROMOTION JANVIER 1988

DEDICACE

A ma mère qui n'a cessée de prier et se préoccuper
de moi.

A mon père

A ma grande mère

A mes frères et à ma sœur

A tous mes amis du quartier.

A tous ce qui me sont chers.

Je dedie ce Projet de fin d'étude.

Gh ab Krimo

A ma mère et à son grand amour.

A mon père

A mes frères et soeurs

A mes oncles et beaux frères :

A mon cher ami Djamel et à sa famille

A mes neveux

A tous mes frères et amis

Je dedie ce travail

Zizne Med Said

Remerciements

Que Monsieur MAÏSTROUK. A trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance pour avoir dirigé ce travail. Ses précieux conseils nous ont été très utiles.

Nous remercions vivement Monsieur SALHI.E qui a bien voulu s'intéresser à ce travail et qui n'a cessé de se déranger pour nous et nous prodigué ses conseils fructueux et ses encouragements.

Nous remercions Monsieur Sazda.A pour son aide.

Nous remercions Monsieur Boukaabache chef du département mécanique ainsi que les techniciens; Rachid; Mustapha; Abdeslam; Ali; Aziz; et Ahmed, sans oublier notre cher EL ouali auxquels nous témoignons notre profonde reconnaissance

Nous remercions également M^{RS} CHITROUB et DJIDJELLI pour leur confiance.

Que Monsieur GHILACI et les agents de l'ENPC acceptent nos remerciements.

Nous prions Monsieur KOULOUGLI.T d'accepter nos sincères remerciements pour son aide grandiose.

Nous remercions M^{RS} Assameur.M; HARROUCH.A; TEFFAHJ.A pour leur aide.

A tous nos camarades nous exprimons notre profonde sympathie pour l'aide qu'ils nous ont apporté et l'ambiance chaleureuse qu'ils ont su créer.

PLAN DE TRAVAIL

Première partie
 Etude théorique de l'usure

Chapitre 1. Introduction

1.1 Définition d'une usure	1
1.2 Intérêt de l'étude de l'usure	1
1.3 Classement des usures	2

Chapitre 2. Facteurs de l'usure

2.1 Caractéristiques de l'organe	3
2.1.1 Matériaux utilisés	3
2.1.2 Propriétés mécaniques	3
2.1.3 Propriétés physiques	8
2.1.4 Traitements de surfaces	10
2.2 Conditions opératoires	13
2.2.1 Charge	13
2.2.2 Vitesse	14
2.2.3 Température	14
2.2.4 Temps de fonctionnement	15

Chapitre 3. Effets observables

3.1 Résistance au déplacement	17
3.2 Vibrations	17
3.3 Phénomènes thermiques	17
3.4 Transformations géométriques	17
3.5 Transformations mécanique et chimique	18
3.6 Variation de masse	18

Chapitre 4. Principaux types d'usure

4.1 Usure adhésive	19
4.2 Usure érosive	19
4.3 Usure par fatigue	19
4.4 Usure corrosive	20
4.5 Usure abrasive	20
4.5.1 Définition	20
4.5.2 Mécanismes de l'abrasion	20
4.5.3 Facteurs influant sur l'abrasion	21
4.5.4 Abrasion en circuit ouvert et fermé	25
4.5.5 Exemple de pièces et machine qui fonctionnent à la condition abrasive	25

Deuxième partie
 Description de la machine

Chapitre 5 Description de la machine

5.1 Schéma et principe de fonctionnement	30
5.2 Constitution de la machine	30
5.2.1 Carcasse	30
5.2.2 Moteur électrique	31
5.2.3 Axe cylindrique	31
5.2.4 Porte échantillon	32
5.2.5 Réservoir	32
5.2.6 Accessoires	33
Planches	34

Troisième partie

Essais d'usure

Chapitre 6 - Théorie sur les fontes G.S

6.1 Comparaison entre les fontes G.L et les fontes G.S	51
6.2 Utilisation des fontes G.S	52
6.3 Composition des fontes G.S	52
6.3.1 Elements habituels	52
6.3.2 Elements spéciaux	53

Chapitre 7. Essais d'usure

7.1 Introduction	59
7.2 Calcul d'usure	59
7.3 Résultats	60
7.4 Interprétation des résultats	69
7.5 Conclusion	70

Conclusion	71
----------------------	----

Première partie

ETUDE THEORIQUE
DE L'USURE

Chapitre 1

Introduction

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

1.1 Définition d'une usure.

On entend par usure la perte de matière d'une surface qui frotte sur une autre.

Plus généralement, l'usure signifie la détérioration d'une chose par suite de l'usage que l'on en fait.

Cette définition révèle bien la permanence et l'universalité du phénomène d'usure.

Il est permanent, car tout au long de l'histoire l'homme a essayé et essaye toujours d'atténuer ce phénomène et d'augmenter la durée de vie des outils et machines qu'il fabriquait, puisque leurs organes ne travaillent que grâce aux actions de contact.

Il est aussi universel car on le rencontre sur toutes les machines existantes.

1.2 Intérêt de l'étude de l'usure.

Un double intérêt est à souligner

1°. Intérêt économique : Parmi les causes de vieillissement des machines et leur mise hors service, il y a l'usure qui se présente en tête, car plus on diminue ses effets plus on arrive à économiser annuellement des sommes considérables.

2°. Intérêt scientifique ; La technologie actuelle exige une connaissance approfondie des mécanismes fondamentaux responsables de l'endommagement et de la transformation des surfaces, vu l'accroissement considérable des pressions de contact, des vitesses de glissement et de la durée de vie de fonctionnement des organes. Pour

cela toute une science est mise au point. Il s'agit de la "Tribologie" qui fait appel à plusieurs disciplines telles que, la mécanique du solide, la mécanique des fluides, physique du solide, chimie, ... etc.

Les données qu'apporte cette science aux ingénieurs et techniciens leurs permettent soit d'améliorer les dispositifs existants soit d'en construire de nouveaux.

Malgré les recherches très poussées dans ce domaine, le remède reste inconnu en raison de la multiplicité des facteurs qui influencent l'usure.

1.3 Classement des usures:

Les spécialistes classent l'usure selon trois catégories:

1^o Usure bénéfique :

Elle se nomme aussi "usure de rodage", son importance décroît dans le temps et conduit à un meilleur fini de surface ce qui permet un meilleur fonctionnement des organes.

2^o Usure normale:

C'est une usure très lente, elle conduit au vieillissement de la machine.

3^o Usure catastrophique :

C'est la plus néfaste des usures, elle conduit à la destruction rapide et complète des surfaces et même parfois à la destruction de l'organe en question.

Chapitre 2

Facteurs de l'usure

Une fois un organe est mis en service, plusieurs facteurs viennent influencer l'usure. Ils sont repartis en trois groupes.

- Caractéristiques de l'organe.
- Condition opératoires.
- Frottement et lubrification.

2.1 Caractéristiques de l'organe :

Il s'agit de la composition chimique, de la structure métallurgique, et des propriétés mécaniques des métaux et alliages, plus particulièrement des couches superficielles.

2.1.1 Matériaux utilisés.

Le choix d'un matériau est d'une importance primordiale, il faut tenir compte de la destinée de l'organe, de la charge supportée, de la vitesse de la température, de la résistance à la fatigue, au choc, à l'abrasion et à la corrosion.

Les matériaux fréquemment utilisés sont :

- . Les métaux ferreux.
- . Les métaux non ferreux
- . Les matières plastiques.
- . Les matériaux composites.

2.1.1.2 Métaux ferreux

Les métaux ferreux sont les matériaux de construction mécanique les plus utilisés, vu leur prix de revient relativement bas, et parce que dans la plupart des cas leur usinage est facile.

Quand on parle de métaux ferreux, il s'agit pratiquement des fontes

et des aciers qui se différencient en premier lieu par leur teneur en carbone.

Nous mettrons ici, l'accent sur les fontes puisqu'elles représentent le matériau sur lequel nos essais ont été menés, puis nous donnerons un aperçu très bref sur le reste des matériaux.

- Les fontes

Sous le vocable de fonte, on désigne des alliages (fer-carbone) dont la teneur en carbone parcourt le domaine (2,3% ÷ 4%).

Elle peuvent avoir des structures variables : austénitique, ferritique, perlitique, martensitique, bainitique et cémentée.

S'allier à d'autres éléments tels que : Mo ; Cr ; Mn ; W ; Ni ; V et autres.

Subir des traitements thermiques.

De ce fait on peut distinguer :

1^o Les fontes grises.

Elles renferment du graphite réparti en lamelles de structures et de dimensions variables. Elles ont une résistance à la rupture élevée, une bonne capacité d'amortissement et un excellent comportement vis-à-vis des frottements grâce à la présence de graphite.

2^o Les fontes blanches :

Elles sont constituées de carbone en solution sous forme de perlite, de martensite, de bainite, de carbone en combinaison, de cémentite et de carbures complexes de Fe ; Cr ; Mn ; Mo ; W ; ...etc. Les fontes blanches sont fragiles aux choc, mais la présence d'une grande quantité de carbures de fer et d'autres métaux augmente leur dureté, leur résistance à l'abrasion aussi.

- Les aciers

Les aciers se distinguent par :

- Leur teneur en carbone (doux ; mi-doux ; mi-durs ; durs ; très durs).
- La structure des diverses combinaisons et mélanges qu'ils forment.
- La présence éventuelle d'autres éléments qui en font des aciers alliés et spéciaux.

2.1.1.b Métaux non ferreux.

Dans certains domaines, il n'est plus question d'utiliser les métaux ferreux pour cela on fait recours à d'autres métaux et alliages. A titre d'exemple on a :

- Alliages du Nickel
- Alliages d'Aluminium.

2.1.1.c Matière plastique

1°. Polymères : Certaines matières plastiques comme les polyméthacrylates polyuréthanes, et le polychlorure de vinyle sont utilisés pour la fabrication de pièces frottantes.

2°. Résines: Les résines sont utilisées :

- Soit en mélange avec des fibres en coton ou en amiante ce qui donne naissance à un matériau léger qui résiste bien aux liquides et peut travailler sous forte charge et à faible vitesse sans lubrifiant.
- Soit à l'état pur, comme les polyimides, et résines thermoplastiques résistant à 400 °C et possédant un faible coefficient de frottement et une grande résistance à l'usure.

2.1.1.d Matériaux composites

L'agglomération de poudres, le frittage permettent la fabrication de maté

riaux de frottement, pièces mécanique, outils, filières, galets. On arrive par cette technique à combiner les propriétés physiques et mécanique de plusieurs matériaux.

2.1.2 Propriétés mécaniques.

Nous citons quelques essais qui sont en relation directe avec l'usure.

2.1.2.a Essai de traction.

L'essai de de traction permet de déterminer les différents paramètres qui caractérisent la résistance mécanique des métaux en appliquant une charge croissante aux deux extrémités d'une éprouvette.

Parmi ces caractéristiques il y'a la résistance à la rupture. Plus cette dernière est grande plus la dureté est élevée et la résistance à l'usure importante.

2.1.2.b Essai de dureté.

L'essai de de dureté a pour but de déterminer la résistance qu'un matériau oppose à la pénétration d'un corps plus dur. De ce fait, il présente une grande importance dans l'étude de l'usure.

On peut déjà dire que plus la dureté est élevée plus la résistance d'un matériau à l'abrasion est grande.

Pour mesurer la dureté, plusieurs méthodes sont établies, par exemple la dureté Brinell (HB) se mesure par enfoncement d'une bille en acier dans le métal.

Si F est la force appliquée; S la surface de l'empreinte, le rapport $\frac{F}{S}$ donne la dureté HB en (daN/mm²).

- Différence de dureté entre deux surfaces en contact.

La différence de dureté entre deux surface peut-être grande ou négligible.

geable.

- Dans le glissement on recherche dans la majorité des cas une grande différence de dureté.

- Dans le roulement on utilise des matériaux de dureté voisine

- Dans les moteurs on rencontre :

- des chemises dures (fonte nitrurée) et des segments tendres en fonte grise.

- des chemises tendres en fonte, et en alliages légers et des segments durs.

- des chemises dures, des segments durs.

- Limite de l'intérêt de la dureté.

Plus une surface est dure, plus elle résiste à l'abrasion et au rodage. Mais en pratique, il convient que son fini soit d'autant plus poussé qu'elle est dure.

Il a été constaté qu'il y avait une dureté optimale pour certains organes où l'on recherche une grande dureté pour résister à l'usure adhésive et à l'abrasion et de bonnes caractéristiques élastiques et une résistance à la fatigue pour supporter les charges importantes auxquelles ils sont soumis.

Par contre dans les outils la dureté croissante à haute température va de pair avec la fragilité.

2.1.2.c Essai de résilience.

La résilience caractérise la fragilité d'un métal. On la mesure à l'aide d'un mouton pendule qui vient rompre un échantillon de métal.

Plus la résilience est grande, la dureté et la résistance à l'usure dimi-

nent.

2.1.3 Propriétés physiques.

Certaines caractéristiques physiques des matériaux employés, en particulier le système cristallin et la conductibilité thermique ont une influence sur les usures qui peuvent avoir lieu.

2.1.3.1 Compatibilité - système cristallin.

Quand deux matériaux frottent l'un contre l'autre, une abrasion poussée de l'un par l'autre est déconseillée, donc la dureté et la rugosité devraient être bien étudiées cela d'une part, d'autre part il faut que la structure soit hétérogène et fine afin qu'il n'y ait pas possibilité de solubilité réciproque. Autrement dit le premier point dont on doit tenir compte lors du choix d'un couple de matériaux est leur compatibilité, c'est-à-dire la tendance qu'ils auront à se souder aux cours des contacts en charge.

De ce fait certaines structures sont recherchées et d'autres sont rejetées tout dépend de l'emploi prévu. Pour les métaux ferreux on rencontre les structures suivantes

- L'austénite :

Solution solide de carbone dans le fer n'est stable qu'à hautes températures. Lors d'une trempe, il peut rester après refroidissement une quantité d'austénite dite - austénite résiduelle - .

L'austénite dans certains aciers alliés par exemple est désirable puisqu'elle apporte une grande résistance à la corrosion et aux températures élevées, mais en général, elle est à éviter car elle engendre plusieurs inconvénients :

- Elle diminue la dureté et par conséquent influe sur la résistance à l'

usure

- Elle diminue aussi la résistance à la fatigue et augmente la tendance à la soudure et au grippage.

- La perlite, la bainite

Ce sont des structures recherchées, surtout quand elles sont à grains fins.

- La martensite

Solution solide sursaturée de carbone dans le fer, stable à froid. C'est une bonne structure très demandée, elle apporte une grande dureté et une grande résistance à l'usure.

Cette structure est souvent employée pour la construction des pièces de frottement.

2.1.3.b Conductibilité thermique

La conductibilité thermique joue un rôle important dans l'évacuation de la chaleur produite pendant le mouvement.

Plus la conductibilité thermique est faible plus il y'a condensation des calories et élévation de température. Donc la dureté diminue et la résistance à l'usure aussi.

2.1.3.c Caractéristiques d'une surface métallique

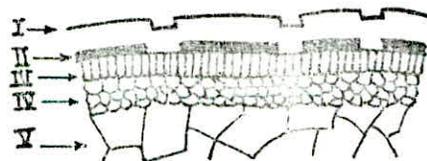
- Structure d'une surface

En observant la coupe schématique (figure 1) d'un métal on peut distinguer de l'extérieur vers l'intérieur :

I - film contaminant

II - gaz adsorbé

III - film d'oxyde



fig(1)

IV - métal écroui

V - métal en cours d'écrouissage.

Écrouissage

L'écrouissage est la déformation plastique que subit un métal soumis à une contrainte supérieure à sa limite d'élasticité.

Pendant l'écrouissage la structure cristalline du métal est détruite, il se produit des glissements dans les plans réticulaires, des rotations et des écrasement de grains

La structure nouvelle des couches superficielles conduit à une dureté plus grande et à une grande résistance à l'usure.

- Fini des surfaces

Une surface réelle n'est jamais parfaite, elle présente toujours des défauts géométriques (forme + rugosité) dus au manque de précision, aux aspérités des outils d'usinage et aux abrasifs présents dans le liquide de coupe.

2.1.4 Traitements de surface

Ces traitements jouent le rôle d'une gaine qui protège le métal contre l'usure et d'autres avaries.

Souvent les caractéristiques recherchées d'après ces traitements sont classées dans l'ordre suivant :

- 1° - La dureté ; la résistance à l'usure.
- 2° - La résistance au grippage ; la résistance aux contraintes de charge et à la fatigue.
- 3° - La résistance à la corrosion atmosphérique, saline, ...etc.

2.1.4.2 Opérations physique et mécanique

1° - Opérations mécaniques

On rencontre le brunissage, galetage et polissage par bande sans fin. Ces opérations destinées à polir les surfaces usurées, ont aussi une action favorable sur le durcissement.

Nous citons comme exemple :

Le brunissage

Le brunissage est réalisé par des broches qui peuvent être montées sur machines à outils (tours ; fraiseuse ; ...etc). Les outils de ces dernières sont substitués par exemple par des billes en acier très dur. En faisant déplacer ces billes sur la surface de la pièce on obtient, non seulement un bon poli, mais aussi un bon accroissement de la dureté superficielle et une bonne résistance à l'usure.

2° Opérations physiques

Parmi ces opérations on a :

La trempe superficielle :

Ce mode de trempe consiste à chauffer uniquement la pellicule superficielle et refroidir brutalement à l'eau ou à l'air la pièce.

La trempe superficielle peut se faire sur des aciers alliés ou non et sur les fontes. Mais dans tous les cas la structure du métal doit être fine et homogène.

L'épaisseur durcie est très mince elle va de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres et cela selon les caractéristiques et les besoins.

2.1.4.b Opérations chimiques :

On retrouve la lubrification liquide, l'oxydation, et d'autres opérations.

- La lubrification liquide :

On rencontre des huiles qui réagissent physiquement ou chimiquement sur les sur

faces et réduisent de ce fait l'usure adhésive. D'autres additifs anti-usures sont employés pour réduire l'usure adhésive dans le cas d'une charge élevée ou sous grande pression.

- Oxydation :

Le film d'oxyde qui recouvre les métaux utilisés en mécanique joue un grand rôle dans le frottement sec ou lubrifié et dans l'usure. Pour cela plusieurs traitements sont établis afin de former ce film d'oxyde protecteur tel que le traitement ferrox qui engendre une pellicule d'oxyde Fe_3O_4 .

2.1.4.c Opérations de diffusion

Le but de ces opérations est de faire diffuser dans la surface de la pièce un ou plusieurs éléments extérieurs. Pour clarifier ce dire on cite quelques exemples.

- La cementation.

La cementation est une opération de durcissement superficiel par accroissement de la teneur en carbone suivie de trempe.

Le principe de la cementation est d'incorporer à la surface d'un acier doux une quantité suffisante de carbone pour lui donner les propriétés d'un acier dur, tout en maintenant l'intérieur du métal. Ainsi on se retrouve avec un métal qui a une âme résiliente et une couche superficielle présentant à la fois une grande dureté et une bonne résistance à l'usure.

- La nitruration.

La nitruration consiste à durcir superficiellement un métal par absorption d'azote. Elle se distingue de la cementation par l'absence de tout traitement thermique ultérieur.

La couche superficielle formée présente une excellente résistance à l'usure et au grippage, supérieure à celle d'une couche cémentée.

- La carbonituration.

La carbonituration est une diffusion à la fois de carbone et d'azote dans le fer γ et est suivie d'une trempe. L'opération chimique se fait en atmosphère gazeuse ($CO + H_2 + N_2$).

L'opération de carbonituration est plus rapide que la cementation car la vitesse de diffusion du carbone est presque doublée par la présence de l'azote.

La couche carbonitrurée contient, après trempe de l'austénite résiduelle, celle-ci pouvant se transformer en martensite sous l'effet de déformations plastiques, ainsi la résistance à l'usure et à la fatigue sont améliorées.

2.1.4.d Opérations de revêtement.

Sur les pièces devant subir une très forte abrasion, dans le matériel de travaux publics par exemple, on dépose parfois une couche plus ou moins épaisse, d'un matériau très dur.

Les techniques employées sont diverses telles que :

- fusion et soudure sur la surface.
- Projection et fusion au chalumeau ou au four.
- Projection par plasma.

Remarque : Cette technique de revêtement est aussi utilisée pour redonner les dimensions initiales à une pièce trop usée.

2.2 Conditions opératoires

2.2.1 Charge.

C'est la résultante des projections sur la normale, en chaque point de contact des actions de contact.

Appliquées avant ou après le début du glissement, elles peuvent, pendant une

expérience prendre une valeur constante ou varier de façon progressive.

Elle est de l'ordre de $10^6 N$ dans certains mécanismes horlogers, mais peut atteindre $10^6 N$ dans le cas de certains éléments de l'industrie routière.

Les spécialistes de l'abrasion admettent qu'en général l'usure par abrasion croît proportionnellement à la charge appliquée.

2.2.2 Vitesse

Pendant le frottement à sec, il y a accrochage entre les aspérités, il s'en suit

- Un dégagement de chaleur
- Une détérioration de la couche superficielle d'oxyde.

Si la vitesse de déplacement est faible ;

- Les calories peuvent s'évacuer dans la masse.
- Le film d'oxyde a le temps de se former
- L'usure est faible.

Si la vitesse de déplacement est élevée ;

- Les calories s'accumulent, la température s'élève.
- Le film d'oxyde n'a pas le temps de se former, il y aura contact métal sur métal
- L'usure est importante.

2.2.3 Température.

Quand deux surfaces frottent, l'énergie fournie pour vaincre la résistance due au frottement se dégrade en chaleur.

- Facteurs influant sur la température de fonctionnement ;

1. Température ambiante :

Toute augmentation de la température ambiante se reporte intégralement sur la température de fonctionnement.

2. Facteurs qui causent la production des calories ;

- Le coef de frottement qui dépend de la nature et de l'état des surfaces en contact.

- La vitesse de déplacement.

- La charge appliquée sur les surfaces.

3. Facteurs qui permettent l'évacuation des calories .

- Caractéristiques des matériaux

- Le type , la quantité et le débit du lubrifiant .

En résumé , la température a pour conséquence d'augmenter l'usure.

2.2.4 Temps de fonctionnement .

Le temps de fonctionnement est un paramètre important dans l'usure des pièces, pour cela chaque constructeur prévoit pour sa machine ou pour un de ses organes un temps de fonctionnement déterminé.

- Dans l'usure légère par frottement qui se produit pendant le rodage , la perte de matériau diminue au cours du temps et tend vers zéro .

- Dans l'usure par abrasion , des particules dures en nombre constant arrachent des quantités constantes de matière au cours du temps.

- Dans l'usure grave par frottement (type grippage) la quantité de matériau enlevée est une fonction exponentielle du temps.

Les trois cas cités ci-dessus sont représentés par la figure(2)

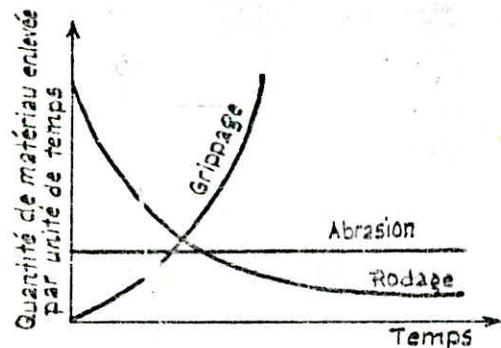


fig (2)

En ce qui concerne le facteur frottement et lubrification, il y'a toute une science qui est mise au point, pour cela on s'est restreint à la citation seulement de ce facteur.

Chapitre 3

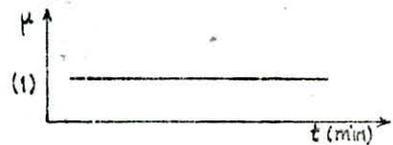
Effets observables

3.1 Résistance au déplacement.

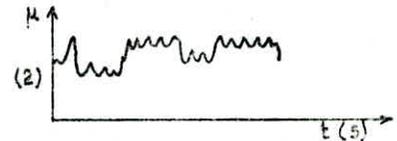
Dans le cas du glissement, les forces de frottement sont traduites par le coefficient de frottement, (μ).

Trois types de variation du coefficient de frottement en fonction du temps sont envisagés.

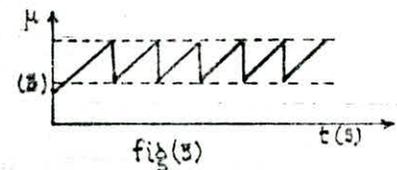
1^o Le coefficient de frottement garde une valeur constante au cours du temps et les destructions superficielles sont faibles, voir figure(3.1).



2^o Le coefficient de frottement évolue au cours du temps d'une manière aléatoire et les destructions sont importantes, voir figure(3.2).



3^o Le coefficient de frottement évolue d'une manière oscillatoire, voir figure(3.3).



3.2 Vibrations.

Les vibrations qui apparaissent au cours du contact sont liées d'une manière intime au phénomène de frottement. Elles correspondent aux variations de la force de frottement.

3.3 Phénomène thermique.

La température de la zone de contact est la somme de :

- La température ambiante
- L'accroissement de la température moyenne dans la masse.
- La température éclair qui correspond à un accroissement brutal de la température en un point de la surface en mouvement.

3.4 Transformations géométriques.

sous l'effet de la charge et du frottement, les aspérités microgéométriques des surfaces des corps en contact sont le siège de déformations élastiques ou plastiques.

On assiste, soit une amélioration de la surface (rodage), soit à une apparition de rayures et même de fissures.

3.5 Transformations mécanique et chimique.

Les contraintes et les cycles thermiques, ont pour effet de transformer les matériaux et plus particulièrement les couches superficielles. On observe des oxydations, des changements de compositions chimiques, des destructions de grains, des écrouissage et d'autres.

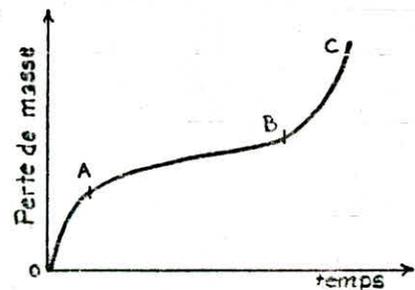
3.6 Variation de masse.

Le tracé de la courbe qui représente la perte de masse en fonction du temps (figure 4) fait apparaître trois parties distinctes.

OA - La période pendant laquelle l'usure est rapide appelé rodage.

AB - correspond à l'utilisation normale de la machine.

BC - apparaît au bout d'un certain temps de fonctionnement et qui conduit généralement à la destruction des éléments de la machine.



fig(4): perte de masse en fonction du temps pour un organe de machine.

Chapitre 4

Principaux types d'usure.

Plusieurs types d'usure sont définis. Dans notre présente étude nous nous limitons à donner une définition de chaque type. Cependant nous mettrons l'accent sur l'usure abrasive qui est le thème de notre projet.

4.1 Usure adhésive.

La manifestation première de l'usure adhésive est le transfert du matériau d'une des surfaces frottantes sur la surface du corps antagoniste.

Le remède qui peut-être apporté à ce type d'usure est de choisir des matériaux naturellement insolubles, de régler la charge et la vitesse pour être en régime d'usure modéré et utiliser un lubrifiant efficace.

4.2 Usure érosive.

L'érosion est un processus qui consiste à ronger une surface. Les causes de l'érosion peuvent être multiples :

- érosion par cavitation
- érosion chimique
- érosion électrique
- érosion par un fluide
- érosion par rabotage
- érosion par impact.

Pour lutter contre l'usure érosive il faut accroître la dureté des matériaux et dans le cas de l'érosion par fluide, il faut filtrer les fluides porteurs pour éliminer les particules de grande taille.

4.3 Usure par fatigue

Des charges trop fortes peuvent détériorer les surfaces. On peut observer des déformations plastiques sur les métaux ductiles et des cassures sur des métaux

fragiles.

4.4 Usure corrosive.

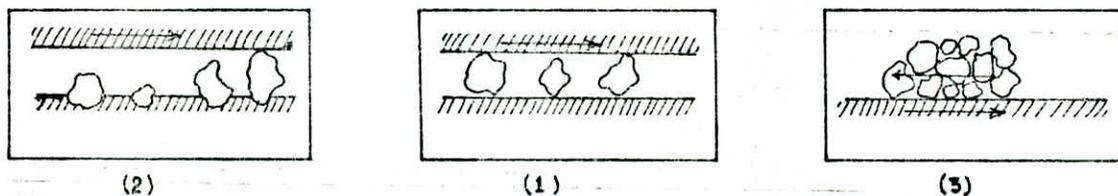
Elle se définit comme un processus d'usure dominé par une réaction chimique ou électrochimique avec le milieu environnant. Cette forme d'usure devient importante surtout aux températures élevées et dans des atmosphères humides.

4.5 Usure abrasive

4.5.1 Définition:

L'usure abrasive est définie comme étant l'usure par déplacement de matière produite par des particules dures. Ces dernières peuvent se trouver entre les deux surfaces et l'abrasion est dite alors à 3 corps figure(5.1), ou encastrées dans l'une des surfaces et on aura une abrasion à deux corps figure(5.2).

Remarque: Dans l'abrasion à deux corps on rencontre aussi un autre mode où les particules abrasives sont libres. figure(5.3)



fig(5)

L'usure abrasive se manifeste par des polissages, des griffures et des arrachements de copeaux.

4.5.2 Mécanisme de l'abrasion

Quand une aspérité ou une particule dure appuie sur une surface plus tendre plusieurs phénomènes peuvent se produire.

a- La surface tendre se déforme élastiquement si la charge appliquée est faible.

b- La surface tendre se déforme plastiquement, c'est-à-dire un sillon est creusé

si la charge appliquée est élevée.

c. un copeau peut être enlevé à la surface tendre.

d. Sur les matériaux fragiles, la rzyure peut provoquer un éffrittement.

4.5.3 Facteurs influant sur l'abrasion.

4.5.3.a Paramètres du milieu.

Le milieu n'est pas déterminé par le corps abrasif seulement, mais aussi par l'ambiance (sèche; humide; corrosive) et la température. Ces paramètres peuvent moduler ou amplifier l'effet de l'abrasion.

4.5.3.b Granulométrie et forme de l'abrasif.

La granulométrie des particules influe considérablement sur l'usure. Généralement on assiste à une croissance rapide de l'usure avec le diamètre de la particule. Une fois aux environs de 100 μ m (valeur critique) il y'a stabilisation.

En outre la forme de la particule additionnée à sa dureté accentue l'effet d'usure. La résistance à la rupture favorise l'arrondissement de la particule et par suite atténue ses effets ou, au contraire crée de nouvelles arêtes vives qui aggravent ses effets.

La figure(6) montre l'évolution du volume d'usure en fonction du diamètre moyen des particules abrasives, pour quelques métaux (acier; cu, Al).

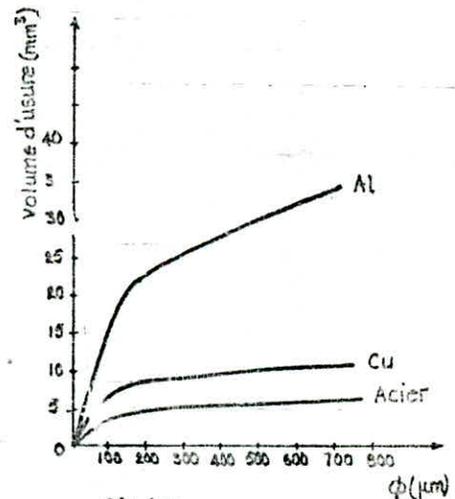


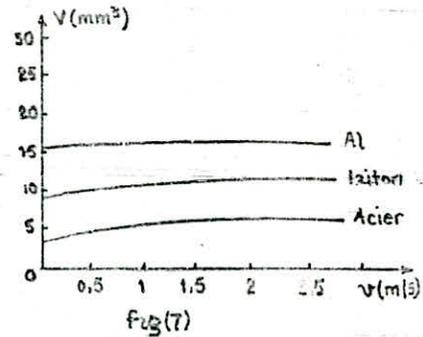
fig (6)

4.5.3.c Charge.

Pour un grand nombre de matériaux, il a été démontré que la perte de masse est une fonction linéaire croissante de la charge.

4.5.3.d La vitesse.

L'usure abrasive augmente avec la vitesse de l'abrasion, et cela est dû à la diminution des caractéristique mécaniques par suite de l'échauffement provenant de l'accroissement de la vitesse. La figure(7) montre comment varie le volume d'usure abrasive en fonction de la vitesse.



4.5.3.e Nature des matériaux.

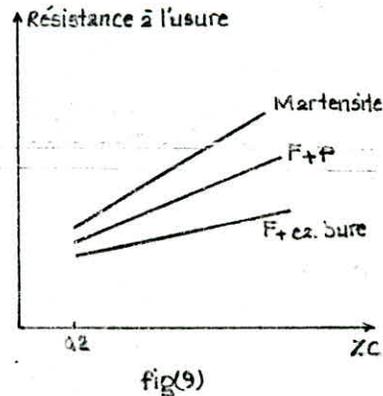
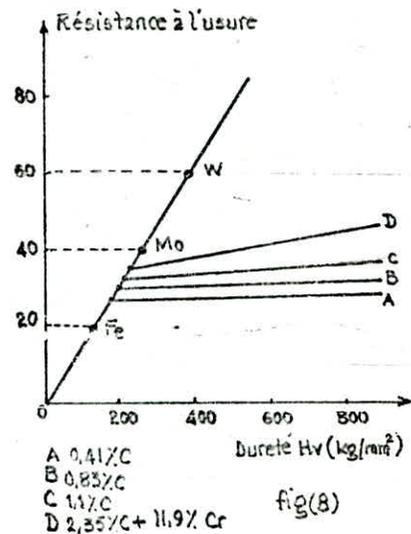
La résistance à l'usure abrasive augmente linéairement avec la dureté figure(8). Par conséquent les paramètres dont il faut tenir compte sont, la dureté et la microstructure des matériaux. Pour les métaux purs l'usure est inversement proportionnelle à leur dureté.

Par contre dans le cas des alliages la situation est plus complexe. A titre d'exemple la résistance à l'abrasion des aciers dépend ;

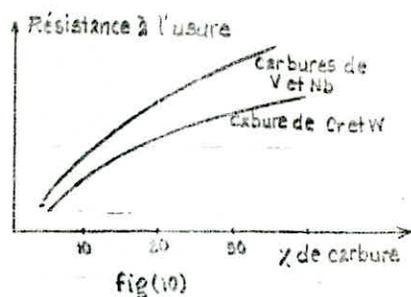
- 1°. de la dureté du matériau
- 2°. de la micro structure de l'acier.

Résultats :

- Pour une même dureté, la résistance à l'usure augmente avec le pourcentage en carbone ; figure(9)
- S'il y'a égalité en pourcentage de carbone, la structure martensitique est celle qui résiste mieux à l'usure abrasive.
- La proportion et la nature des carbures



présents dans les métaux jouent un rôle important dans leurs résistance à l'abrasion, dans certains cas elle augmente avec le pourcentage de carbures, figure(10).

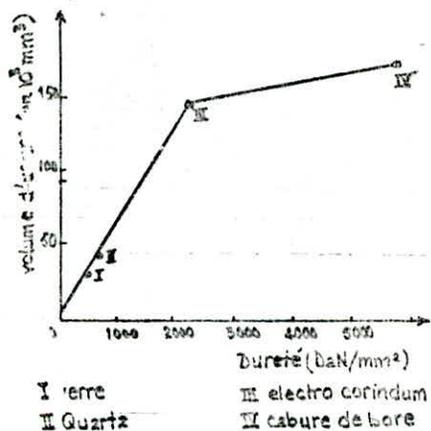


De ce fait le classement des matériaux par ordre de résistance décroissante à l'usure abrasive est comme suit :

- Fonte blanche nitrurée.
- Fonte blanche à haute teneur en Cr.
- Les aciers Hadfield, ces aciers austénitique forme une couche martensitique par écrouissage.
- Aciers martensitiques.
- Aciers bainitique.

4.5.3.f Dureté de l'abrasif

Elle nous informe sur l'aptitude physique de la particule abrasive à rayer un matériau plus tendre. La figure(11) nous montre l'évolution de la perte de masse en fonction de la dureté de l'abrasif.



Tant que la dureté de l'abrasif est inférieure ou égale à celle de la pièce abrasée, la perte de masse est très faible, dans ce cas les qualités coupantes de l'abrasif disparaissent rapidement. Quand la dureté croît d'une valeur égale ou supérieure à celle de la pièce, l'usure est grande. Enfin, à partir d'un certain seuil (environ 2300 daN/mm²) la perte de masse devient indépendante de la dureté de l'abrasif, on a donc stabilisation.

Les matériaux abrasifs fréquemment utilisés sont donnés par le tableau(1).

Matériau	Composition	Dureté (dan/mm ²)
Diamant	C	8000
Carbure de bore	B ₄ C	2750
Carbure au silicium	SiC	2500
Carbure de Titane	TiC	2450
Corindon, alumine	Al ₂ O ₃	2100
Carbure de zirconium	ZrC	2100
Carbure de tungstène	WC	1900
Garnet	Al ₂ O ₃ .3FeO.3SiO ₂	1350
Zircone	ZrO ₂	1150
Quartz, silice, sable	SiO ₂	800
Verre	silicate	500

Tableau (1) Matériaux utilisés comme abrasifs.

4.5.4 Abrasion en circuit ouvert et fermé.

En circuit ouvert les particules abrasives se renouvellent à chaque instant c'est-à-dire qu'il y'a conservation de la dureté et de la forme. Donc le taux d'usure reste presque constant pendant un long usage.

Dans un circuit fermé c'est le contraire qui se produit, les particules abrasives s'écrouissent, et après plusieurs passages elles perdent leur forme et s'arrondissent, par conséquent la perte de masse est réduite au cours du temps.

4.5.5 Exemples de pièces et machines qui fonctionnent à la condition abrasive.

Nous citons tout d'abord le cas où l'usure abrasive est remarquable, c'est-à-dire les particules sont de dimensions importantes et chacune laissera lors de son passage une trace bien marquée.

- Engins de travaux public.
- Machines utilisées dans les travaux miniers
 - Excavateurs
 - Marteaux piqueurs
 - convoyeurs
 - broyeurs
- Laminoires (usure abrasive latérale) dans l'industrie métallurgique.

Comme deuxième exemple, le cas où les particules sont de faibles dimensions, la surface endommagée conserve un certain fini ;

- Roulement
- Engrenage
- Paliers lisses

4.5.6 Exemples de machine de mesure de l'usure abrasive (Abrasomètres).

Plusieurs dispositifs sont mis au point pour mesurer l'usure, nous nous contenterons d'énoncer quelques modèles.

Modèle ①

Ce modèle est constitué d'un disque qui porte des rainures à sa périphérie, son mouvement de rotation est assuré par un moteur électrique.

Cet abrasomètre, travaille en circuit fermé.

Le disque est mis en mouvement dans un abaque remplie de matière abrasive, et chaque rainure (poche) prélève une cer-

taine quantité d'abrasif qui viendra s'infiltrer entre l'échantillon plaqué à la surface latérale du disque et produit ainsi l'usure.

La figure (12) schématise un tel dispositif.

Inconvénient de la méthode :

L'inconvénient de cette méthode est que le contact (abrasif-échantillon) n'est pas permanent, ce qui provoque une discontinuité de l'usure dans le temps cela d'une part, d'autre part la granulométrie des particules abrasives varie, ce qui conduit à des résultats médiocres.

Modèle ②

Ce modèle est composé d'un disque de faible épaisseur qui porte sur sa périphérie des échantillons disposés d'une manière régulière figure (13). Le mouvement est un mouvement de rotation.

Une fois en marche, et à tour de rôle chaque échantillon vient frotter contre

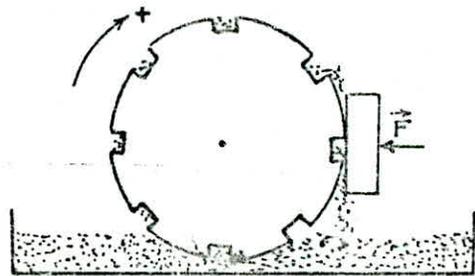
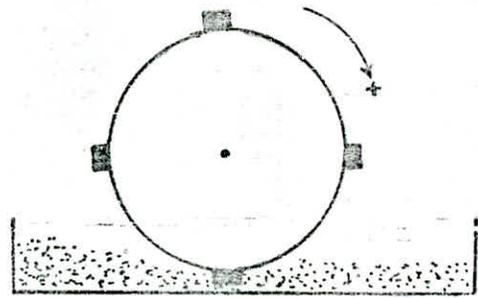


fig (12)

Les particules abrasives, comme le montre le schéma, ainsi l'usure est produit.

Inconvénient de la méthode.

À la suite de plusieurs passages la granulométrie des grains abrasifs change et l'usure diminue au cours du temps, en outre la charge appliquée ne peut être variée.

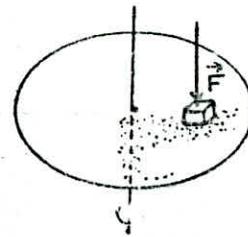


fig(13)

Modèle ③

Ce modèle est constitué d'un disque qui tourne autour d'un axe vertical, et qui porte sur sa surface supérieure un disque abrasif, l'échantillon rentre en contact par l'intermédiaire d'une charge appliquée figure(14).

Cette méthode aussi, présente l'inconvénient de la granulométrie



fig(14)

Modèle ④

Dispositif à cylindre exotché.

C'est un des plus anciens dispositifs, et celui qui a fourni le plus de données.

Le but de notre projet est de réaliser un tel dispositif, puis l'utiliser comme machine pour faire des essais d'usure.

La description et le mode de fonctionnement sont donnés ultérieurement.

Justification du choix de ce type de machine.

Nous avons choisi ce modèle, vu sa grande rentabilité que nous résumons dans les points suivants.

1°. Possibilité de faire varier des paramètres importants tels que:

a. temps ; b. vitesse ; c. charge.

2°. La machine travaille en circuit ouvert, c'est-à-dire qu'il y a un flux continu de matière abrasive et la granulométrie reste presque invariable.

3°. La surface de l'échantillon qui subit l'usure est grande.

4°. Possibilité de réunir plusieurs conditions rencontrées dans les machines existantes travaillant à la condition abrasive, dans nos essais par ce dispositif.

Deuxième partie

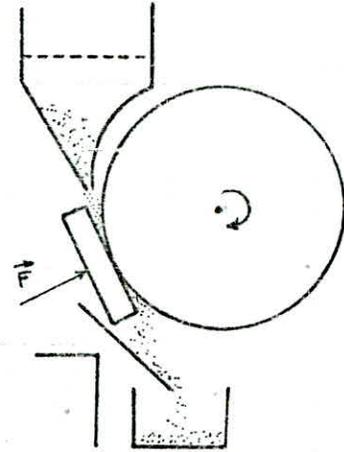
DESCRIPTION DE
LA MACHINE D'USURE

Chapitre 5

Description de la machine

5.1 Schema et principe de fonctionnement

Comme le montre la figure (15), l'organe essentiel de notre machine est le cylindre caoutchouté soumis à une rotation. Grâce à une charge P , l'échantillon entre en contact avec le cylindre. Entre les deux surfaces en contact il y'a écoulement de la matière abrasive qui provoque l'usure.



fig(15)

5.2 Constitution de la machine.

La machine comprend essentiellement les pièces suivantes :

- une carcasse (bâtî ; support de l'axe)
- un moteur électrique
- Un axe enrobé en caoutchouc muni d'une poulie.
- deux caches roulements
- un porte échantillon
- un réservoir
- accessoires.

5.2.1 Carcasse:

La carcasse est composée de :

2 profilés en acier de forme U-16, soudé en L voir planche(1) destinés à supporter le moteur, les plaques supportant l'axe les trous de ce montage sont illustrés par les planches (2) et(3).

2 plaques en acier l'une est soudée au bâtif l'autre est fixéé par des boulons. voir planches(4) et(5). Ces plaques ont pour rôle de porter, l'axe, le porte échantil

lon, le réservoir par le biais de tiges cylindriques

5.2.2 Moteur électrique.

Le moteur que nous avons adopté est à courant alternatif dont les caractéristiques sont :

- nombre de tours $N = 1450 \text{ tr/mn}$
- facteur de puissance $\cos\varphi = 0,7$
- rendement

5.2.3 Axe cylindrique :

L'axe est en acier mi-dur, il a été usiné aux ateliers du département génie-mécanique. Il est coté comme le montre la planche (6).

Pour la partie centrale de l'axe destinée à l'enrobage nous avons prévu un moulage afin que la matière en caoutchouc puisse bien tenir et afin d'éviter tout glissement.

L'enrobage de l'axe est réalisé par (ENPC) ex SONATRACH. voir planche (7)

• un deuxième axe de rechange est fabriqué, cette fois l'enrobage est fait par : Michelin (société mixte algéro-française)

Justification du choix de la matière en caoutchouc.

Après divers essais de quelques matériaux tels que matière plastique ; et mousse, la première était très dure et le contact ne se faisait qu'en un seul point, en ce qui concerne la deuxième elle était très molle, sa durée de vie était très brève. Après cela nous sommes parvenus au choix du caoutchouc qui a une durée de vie plus longue et une malléabilité convenable.

- Caractéristiques de la matière en caoutchouc.

Le laboratoire de l'ENPC nous a fourni les caractéristiques suivantes :

- Caoutchouc naturel.

- Couleur rouge (oxyde de Fer)
- viscosité Mooney 14
- pression 135 - 165 kg/cm²
- elongation 600 - 800 %
- dureté Shore 35
- densité (1,01 ± 0,05) g/cm³

Le mouvement de rotation de l'axe est transmis à l'aide d'une courroie et d'une poulie de diamètre 4 fois plus grand que celui de la poulie du moteur et cela afin de réduire la vitesse de rotation et éviter ainsi l'échauffement rapide de l'échantillon.

La poulie que porte l'axe est fabriqué en alliage d'aluminium pour réduire son inertie, elle est usiné aux ateliers du G.M. voir planche (8).

Le mouvement de rotation est facilité par deux roulements protégés par deux caches voir planches (9) et (10).

5.2.4 Porte échantillon :

Il est fabriqué en acier mi-dur par l'assemblage de trois parties, une partie portant la charge, un anneau pour pouvoir coulisser le long d'une tige et une troisième partie conçue pour l'échantillon voir planche (11)

• La tige est représentée sur la planche (12)

5.2.5 Le réservoir.

Le réservoir est fabriqué à partir d'une tôle en acier, il a la forme donnée par la planche (13). Pour filtrer et régler le débit de l'abrasif nous avons prévu un tamis et une glissière.

La partie inférieure du réservoir comporte une face courbée et une face inclinée

La courbure a été faite pour que le réservoir puisse épouser la forme cylindrique et ne pas gêner la rotation de l'axe, tandis que la pente a pour rôle d'accélérer le mouvement des particules abrasives.

L'orifice du réservoir débouche juste sur l'échantillon à une distance de 2mm.

Le réservoir peut se déplacer grâce à deux tiges cylindriques voir planche (14) pénétrant dans deux petites plaques soudées sur le réservoir voir planche (15).

5.2.6 Accessoires

- Cache courroie :

Pour raison de sécurité nous avons fabriqué un cache en tôle et grillage.

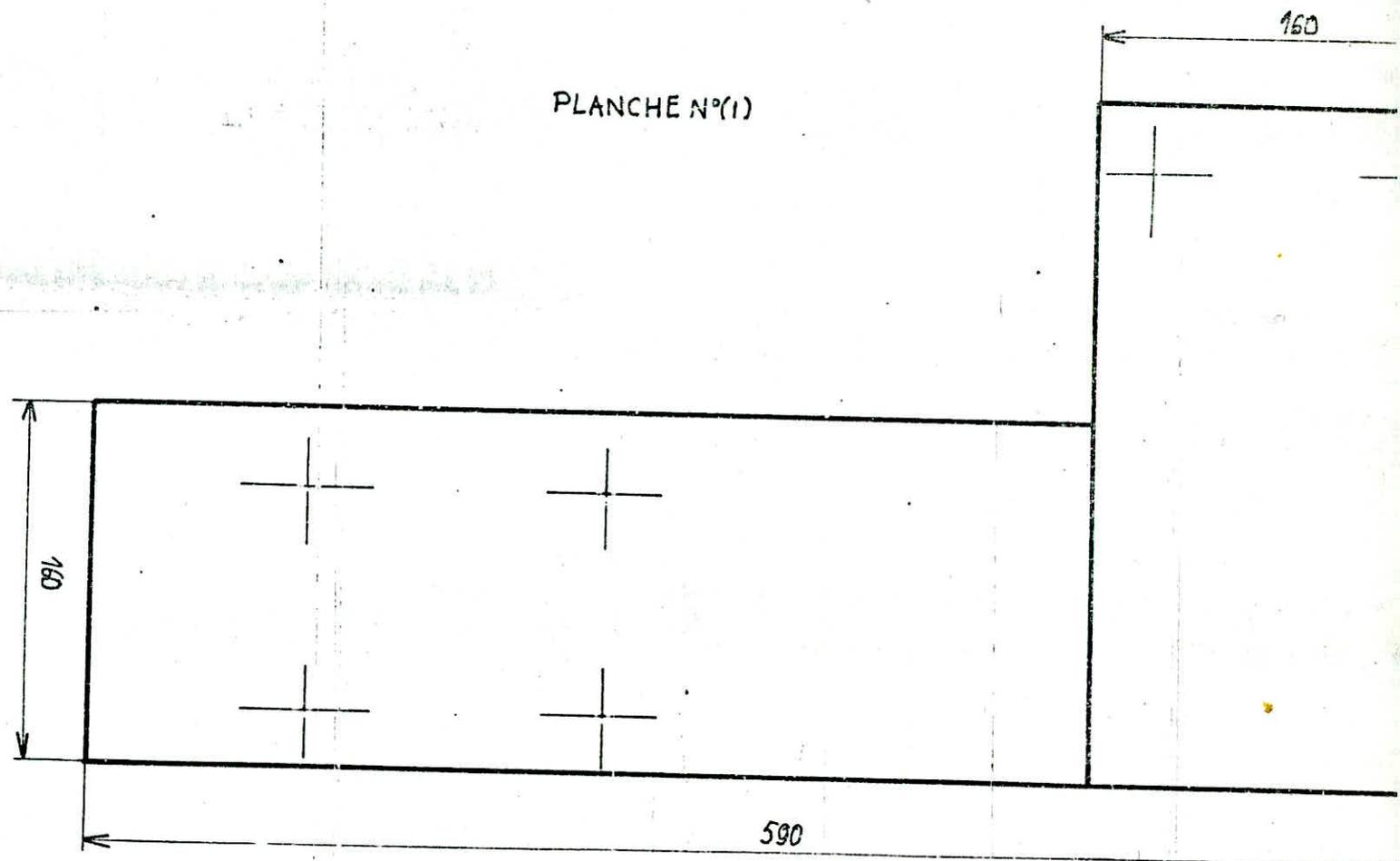
- pente d'évacuation :

La récupération de la matière abrasive se fait à l'aide d'une tôle située juste au dessous du cylindre caoutchouté et qui s'ouvre vers l'extérieur dans un récipient.

- Tôles en aluminium :

Pour éviter l'échappement des grains abrasifs de part et d'autre nous avons monté sur la machine des tôles en Al.

PLANCHE N°(1)



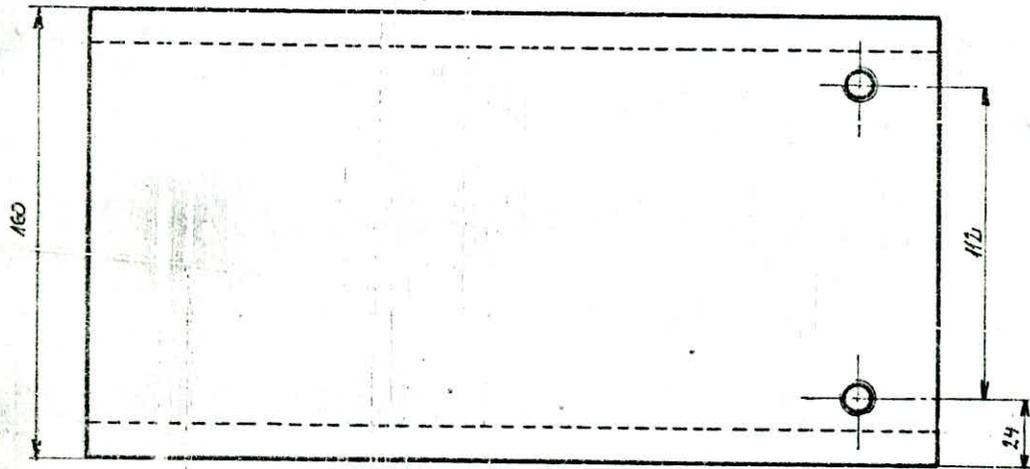
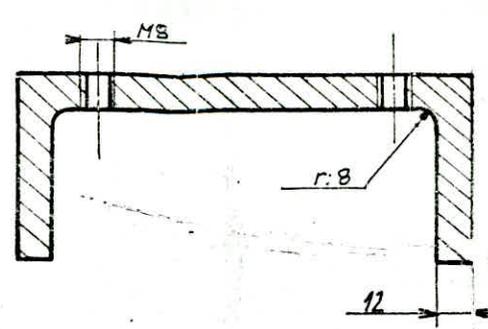
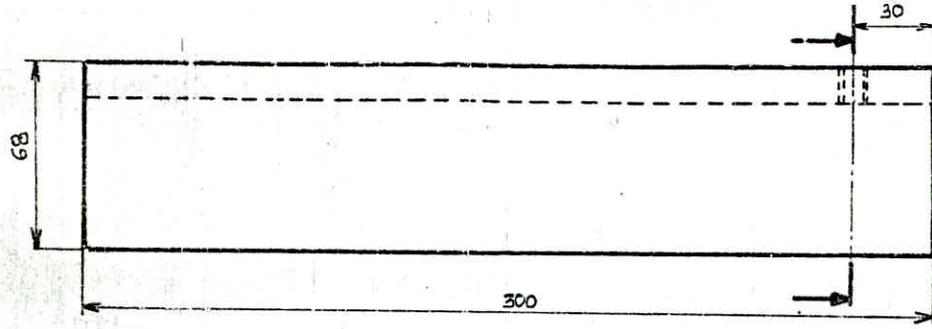


PLANCHE N°(2)

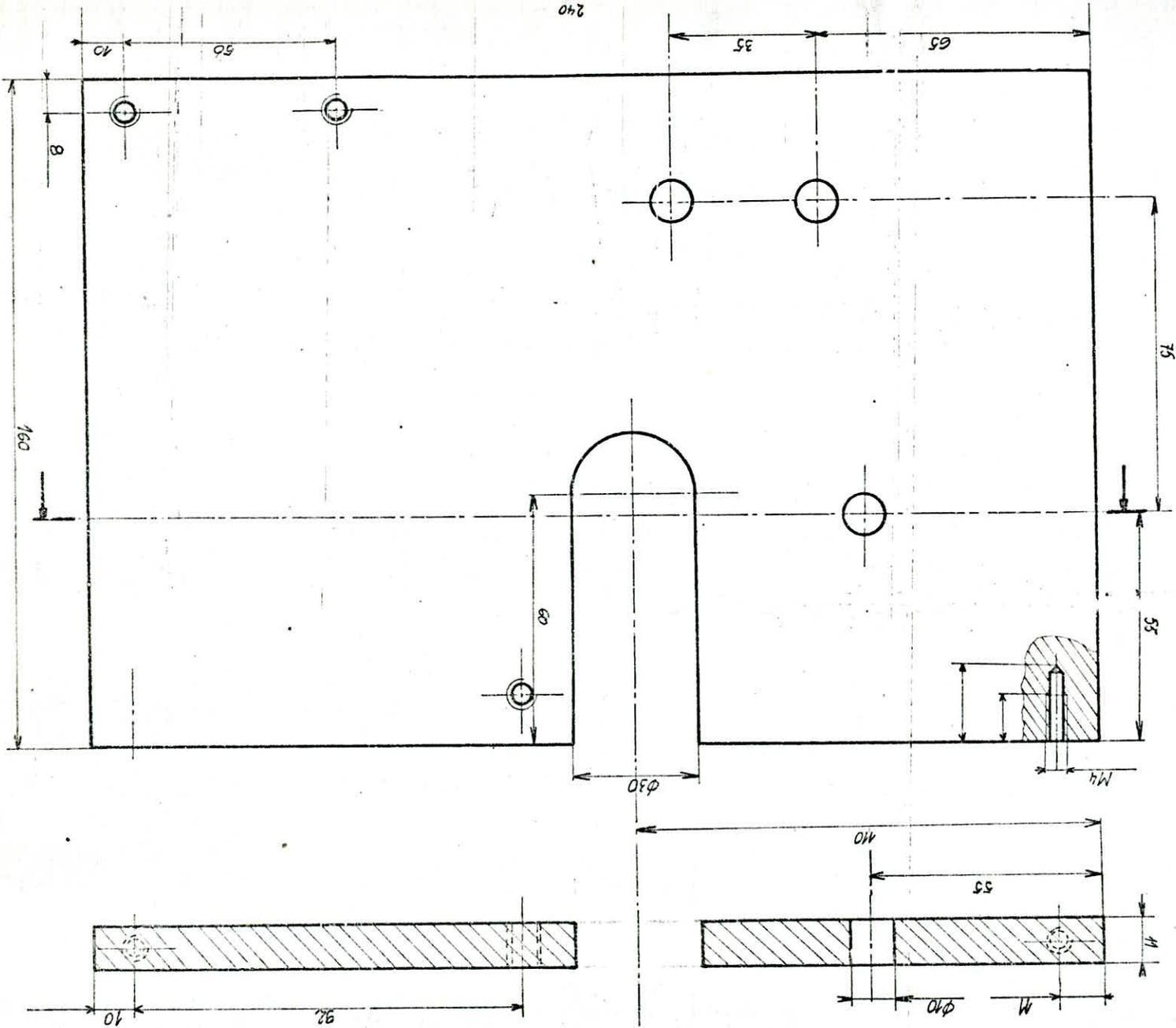


PLANCHE N°4)

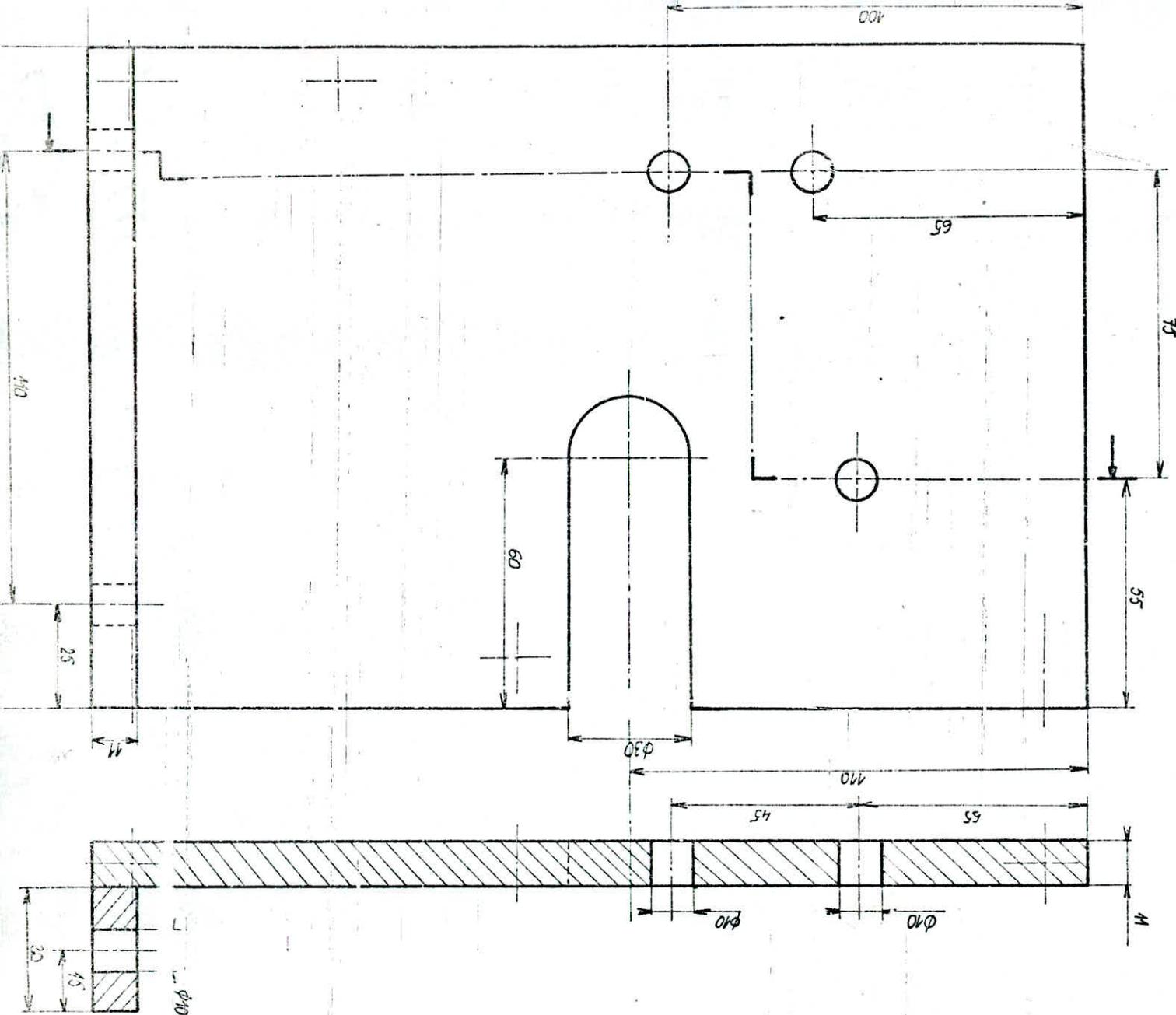
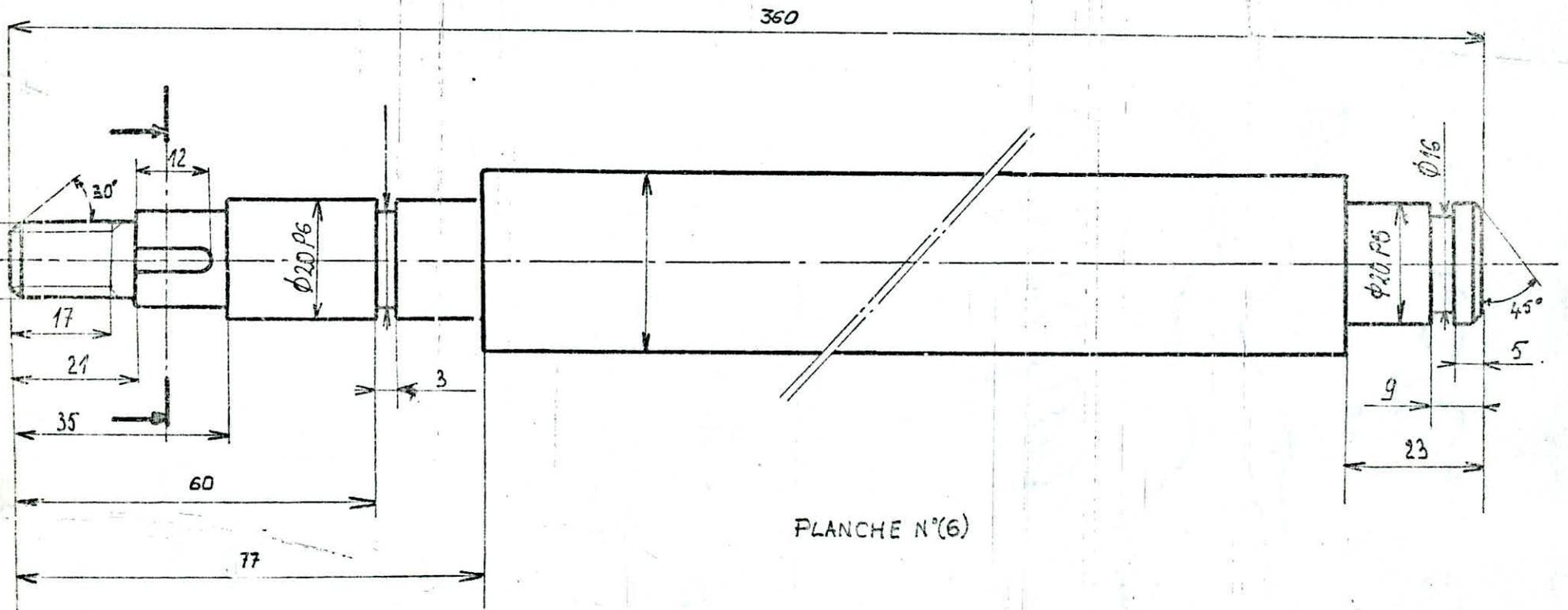
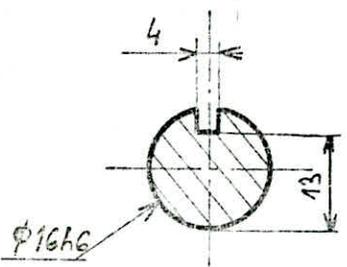


PLANCHE N°(5)



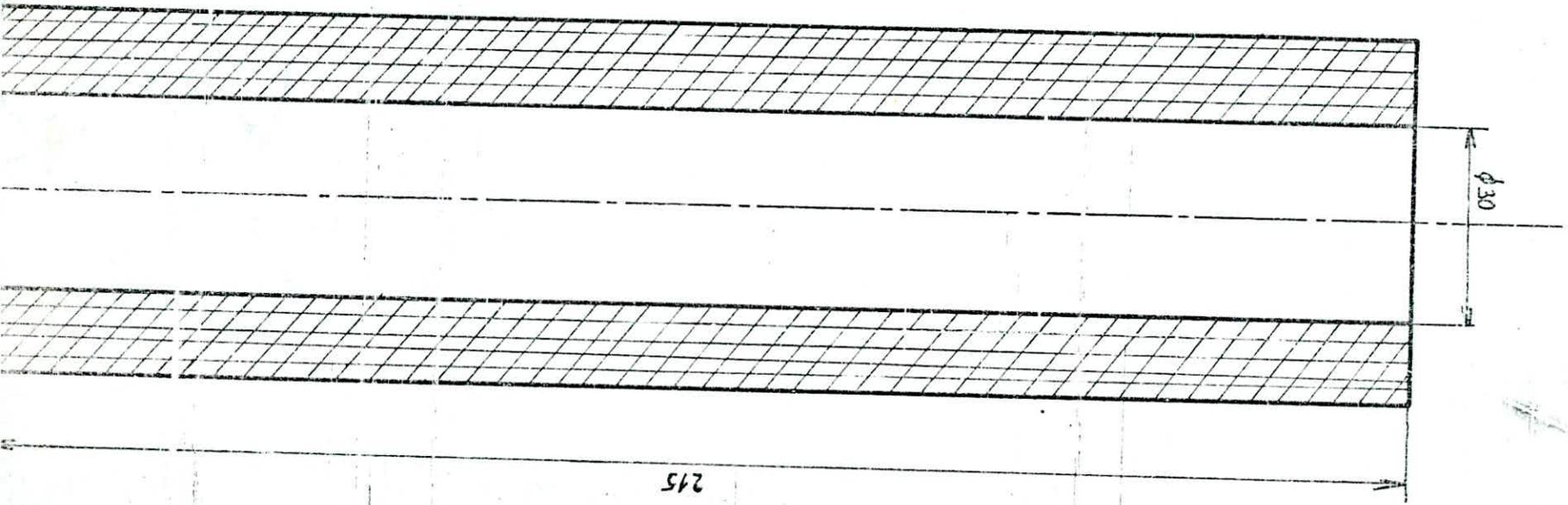


PLANCHE N°(7)

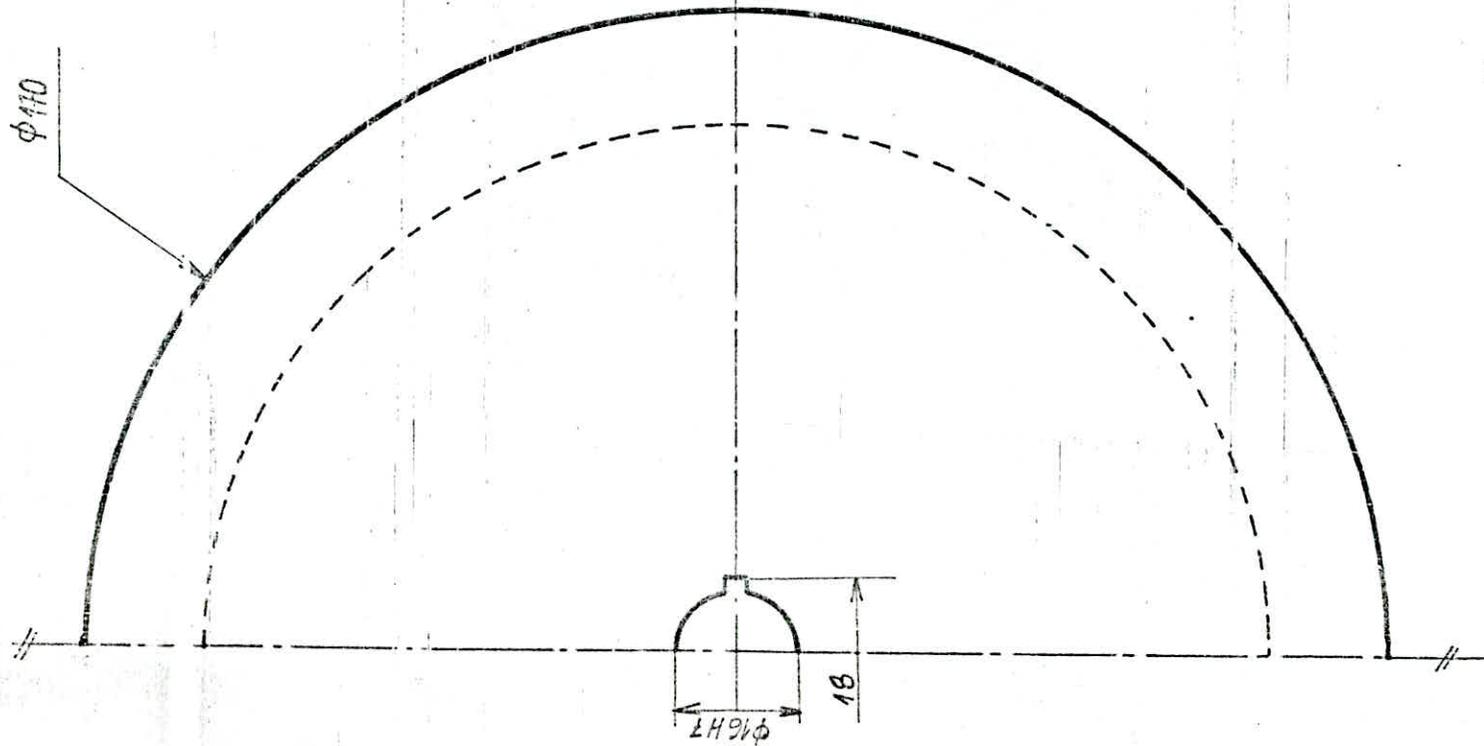
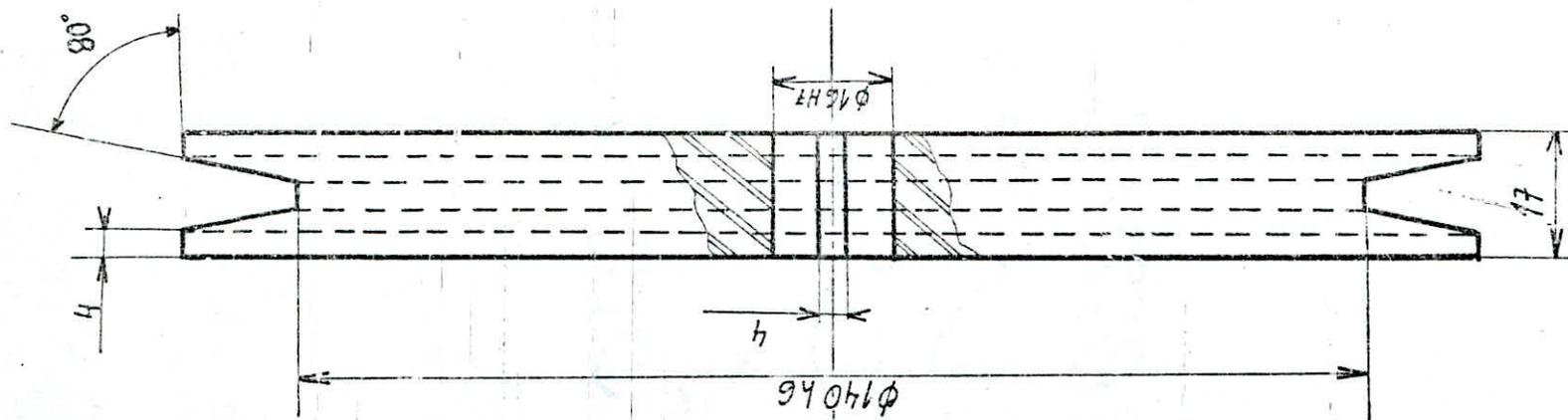


Planche N°(8)

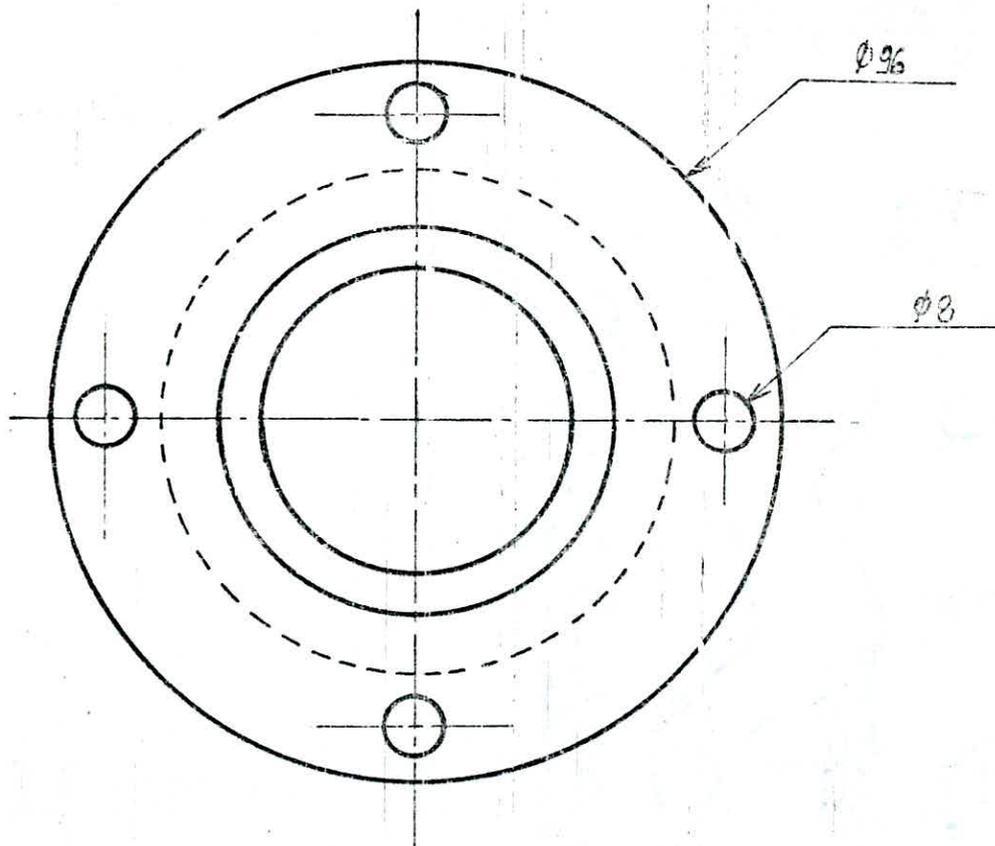
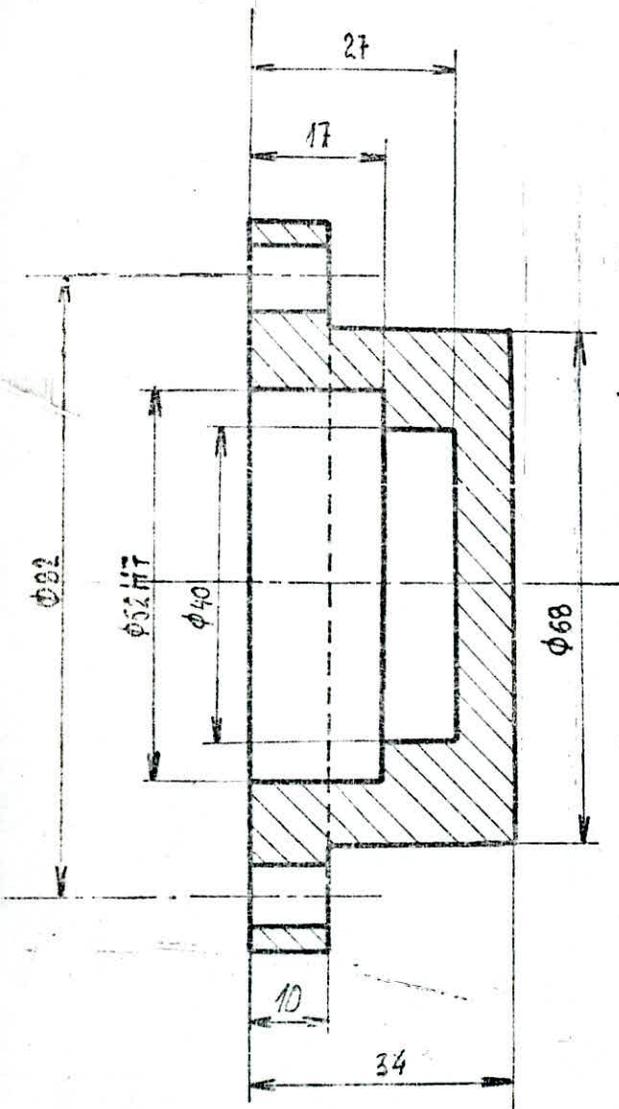
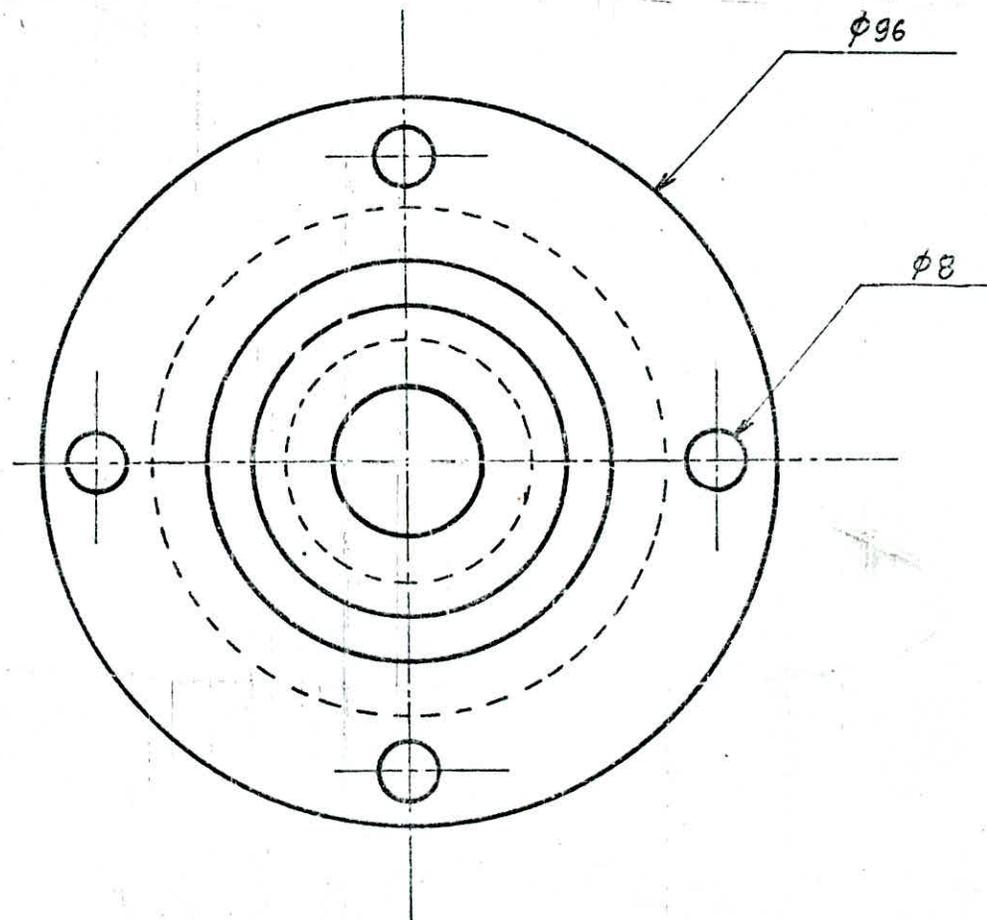
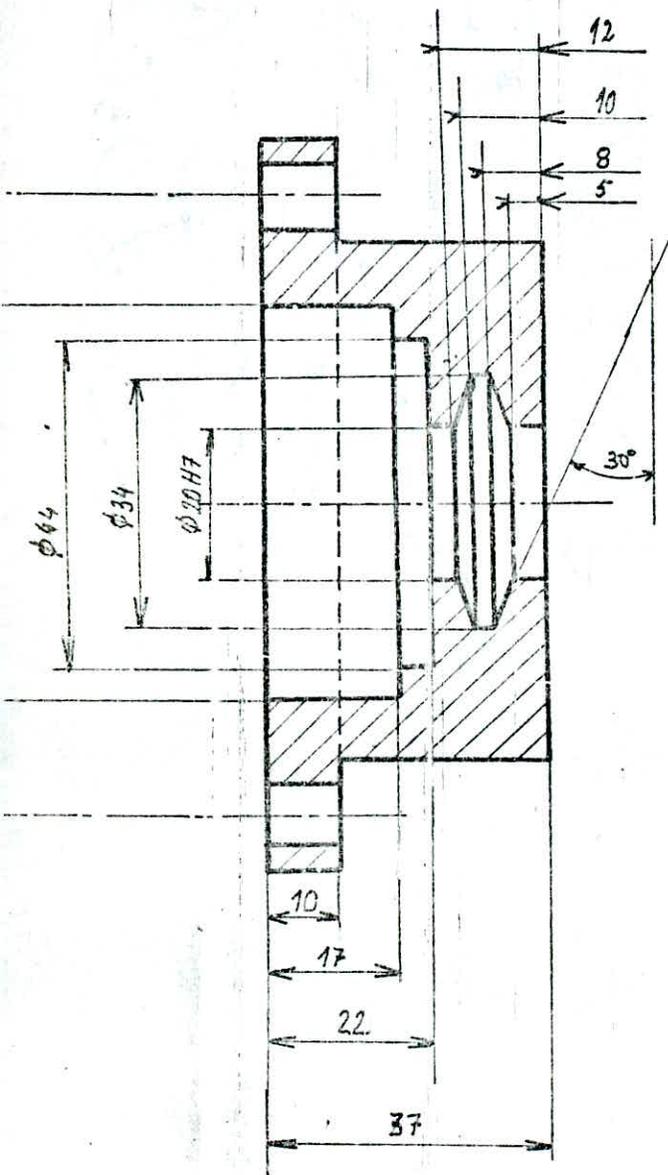


PLANCHE N°(9)



FLANCHE N°(10)

PLANCHE N°(11)

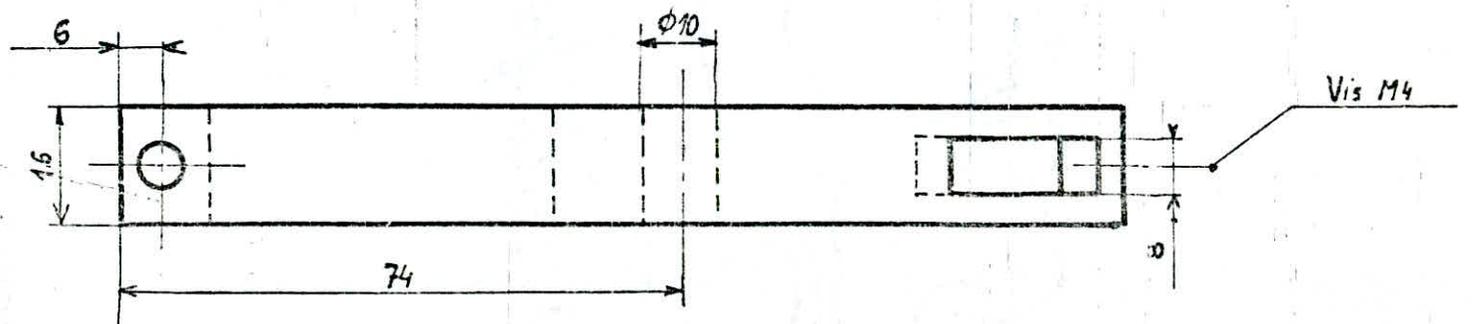
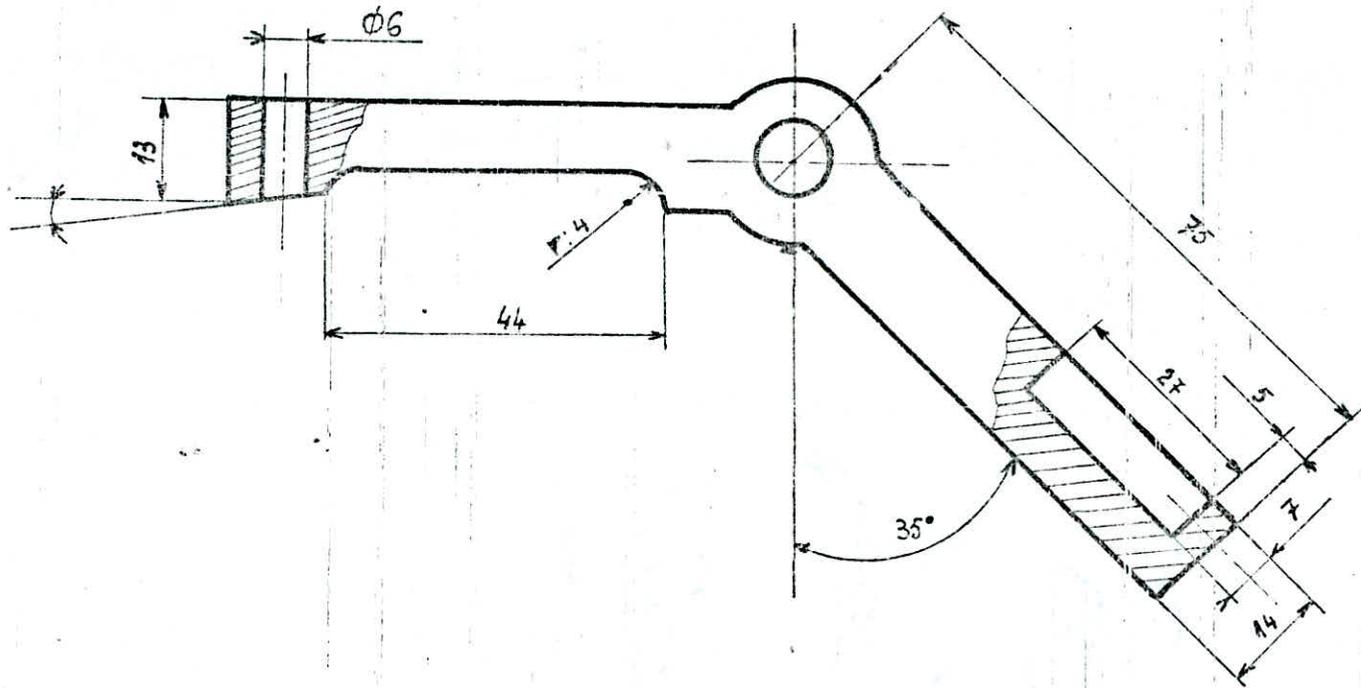


PLANCHE N°(12)

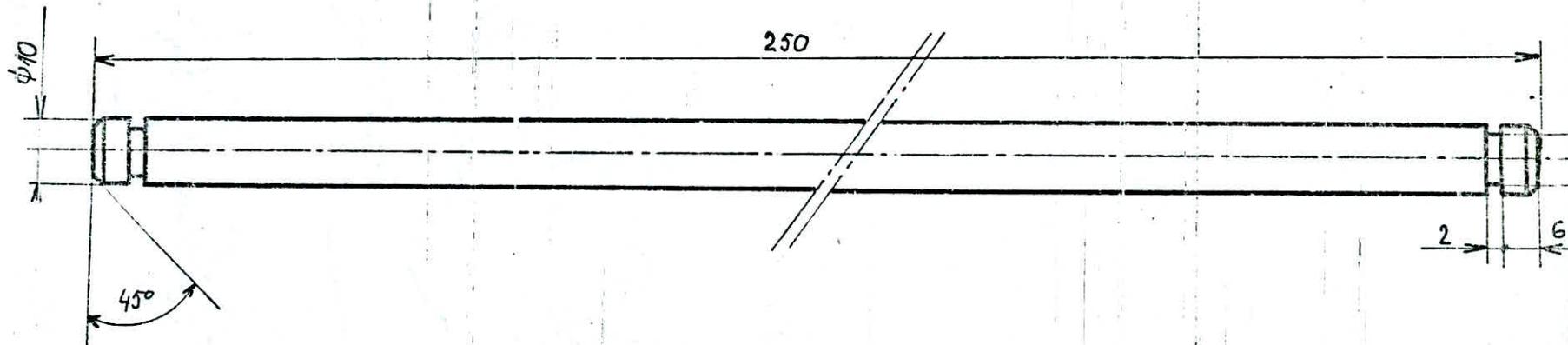


PLANCHE N°(13)

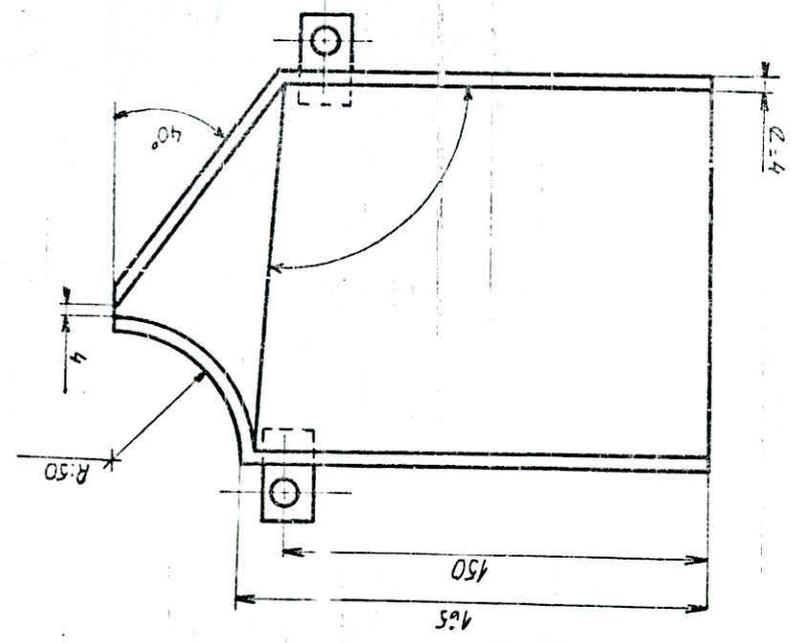
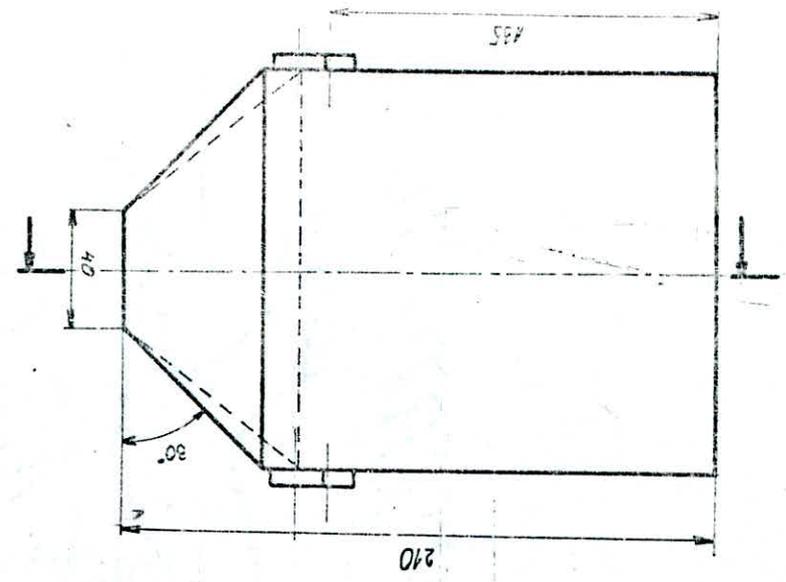
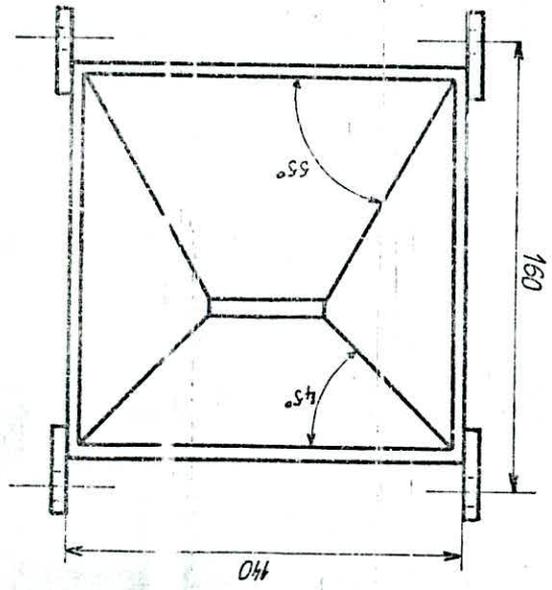


PLANCHE N°(14)

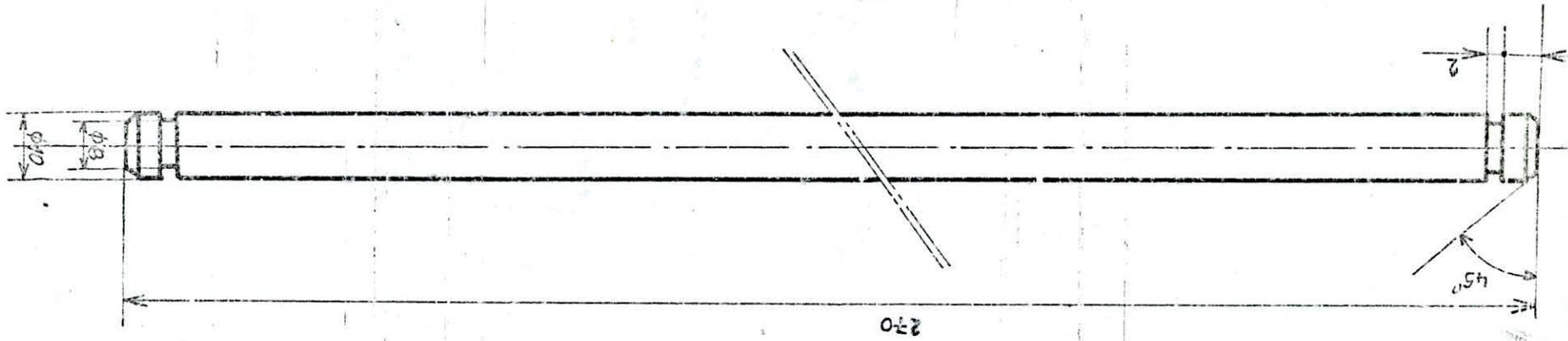


PLANCHE N°(15)

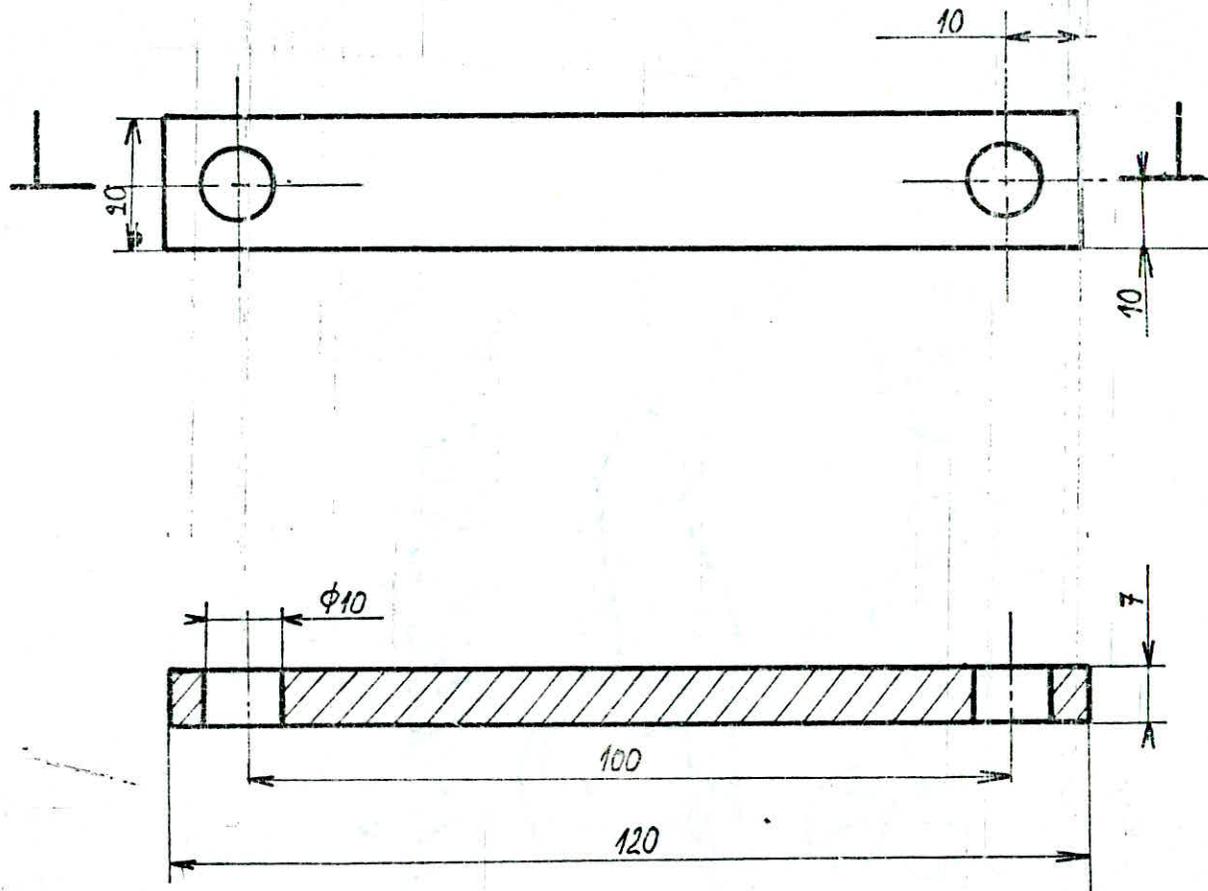
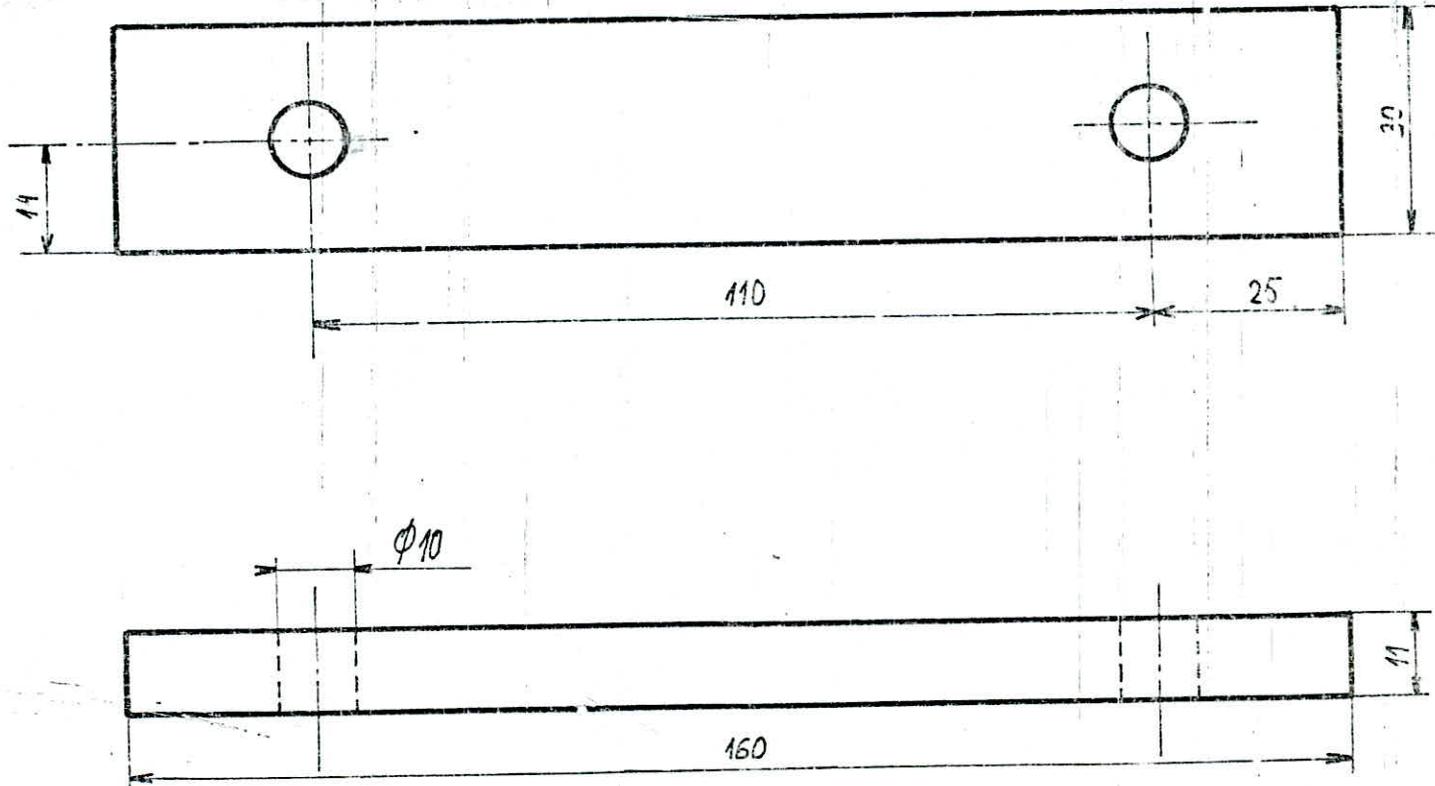


PLANCHE N° (16).

Cette planche montre les deux plaquettes supportant le réservoir.



Troisième partie

ESSAIS D'USURE

Chapitre 6

Theorie sur la fonte GS

6.1 Comparaison entre les fontes GL et les fontes GS.

Dans les fontes grises le graphite se présente sous forme de lamelles, appartenant au système cristallin hexagonal. Ces formes constituent des discontinuités de la matrice et sont à l'origine des ruptures par effet d'entaille et réduisent très sensiblement les propriétés mécaniques, donc l'inconvénient des fontes grises lamellaires réside dans leur fragilité et leur incapacité de supporter des déformations sans se rompre.

Mais cet effet nocif est d'autant moins sensible que les lamelles sont plus fines et mieux réparties.

Donc, il était évident pour les chercheurs, que s'ils arrivaient à obtenir des fontes où le graphite est aggloméré en nodules ou mieux encore en sphéroïdes cela permettrait d'améliorer les propriétés mécaniques de ces fontes. Ce n'est que depuis environ deux décennies que les fondeurs savent réaliser à la coulée, le graphite sous forme sphéroïdale.

Ce procédé est connu actuellement par la graphitisation en nodules, qui est obtenu par addition lors de la coulée, d'une certaine quantité de magnésium (Mg) et qui peut varier de $0,04 \pm 0,07\%$, puis on a précipitation par inoculation de silicium (Si) pour les sphéroïdes de graphite.

Bien que ces nouvelles fontes ont des caractéristiques mécaniques comparables à celles des aciers, elles conservent toujours les avantages que présente une fonte tels que : coulabilité, usinabilité, aptitude à amortir les vibrations et haute tenue à l'usure.

On note ici, que les fontes GS ont des propriétés mécaniques meilleures que les fontes usuelles.

En outre, la dureté et la résistance à l'usure des fontes GS peuvent être augmentées par des traitements de trempe.

Utilisation des fontes GS

Les fontes GS sont utilisées dans de nombreuses applications industrielles ; telles que : tuyaux ; portes de fours ; cylindre de laminoires, vilebrequins, culasses, pompes, valves, ... etc.

6.3 Composition des fontes GS :

On classe généralement les éléments constituant les fontes en deux catégories. Ceux dont la présence est normale jusqu'à une certaine teneur et on les appelle éléments habituels, et ceux qui résultent de l'addition au-dessus d'une certaine teneur, on les appelle, éléments spéciaux.

6.3.1 Elements habituels :

Ce sont, le carbone, le silicium, le manganèse, le soufre et le phosphore. Nous parlerons ici, seulement du rôle du Si et Mn.

1° Silicium.

Le silicium est un élément graphitisant, s'il est additionné en pourcentage élevé évite la formation de la fonte non sphéroïdale. Il accroît aussi la vitesse de diffusion du carbone dans l'austenite lors de la formation des sphéroïdes de graphite. Mais malheureusement, il diminue considérablement la résilience et pour compenser cet effet fragilisant il faut additionner du nickel (Ni).

2° Manganèse :

Le manganèse est un élément carburigène, blanchissant. Il joue un rôle de nitrurant.

Les nitrures étant stabilisateurs de carbures, donc ce sont des éléments

qui perturbent la graphitisation des sphéroïdes.

6.3.2 Éléments spéciaux :

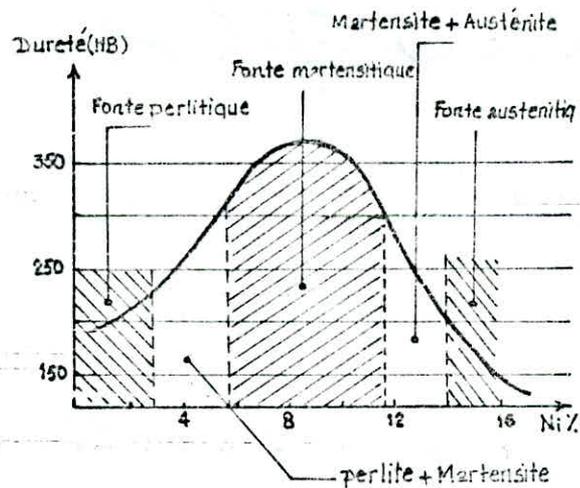
Ce sont, le Nickel, le chrome ; le Vanadium et le Molybdène .

Dans ce qui suit, nous ne parlerons que de l'influence et du rôle de Ni, de Cr et de (Ni-Cr) combinés, sur les propriétés mécaniques et les structures des fontes à graphite sphéroïdal, car par ce chapitre nous complétons notre réalisation par des essais d'usure sur des échantillons en fonte à graphite sphéroïdal allié au Ni-Cr.

Les fontes alliées au Ni, au Cr ou au Cr-Ni combinés sont appelées, fontes spéciales

1° Influence du Ni sur les propriétés mécaniques de la fonte .

Le nickel se comporte comme un graphitisant jusqu'à 3% environ et la fonte a une structure perlitique ; dissous dans la matrice, il augmente la dureté Brinell d'environ 30 points chaque fois que la teneur en nickel croît de 1%. Ensuite on voit apparaître de la martensite. À partir de 7% et jusqu'à 11%, la structure est entièrement martensitique; la dureté Brinell atteint 700 daN/mm² vers 9% puis diminue progressivement. À partir de 11% la martensite cède progressivement la place à l'austénite et la structure devient entièrement austénitique au dessus de 14% de Ni figure(16). Le nickel affine le grain et le graphite, ainsi que les carbures



fig(16).

dans le cas des fontes trempées. Il est couramment utilisé conjointement avec le chrome ; 3 parties de nickel pour une partie de chrome.

Commentaire :

- La dureté diminue quand le pourcentage de Ni augmente parce que il y'a formation de graphite ; ce dernière n'est pas dur donc la résistance à l'usure diminue.

- Le nickel abaisse la ligne de transformation A_3 , c'est-à-dire le %C se déplace vers la gauche, donc le %C diminue implique la dureté ainsi que la résistance à l'usure diminuent.

2^e Influence du chrome sur les propriétés mécaniques.

Le chrome stabilise la cémentite et l'austénite, donc il est blanchissant, désoxydant, durcisseur et augmente l'élasticité. Il est aussi un élément alpha-gène et carburi-gène, affine la structure perlitique, augmente la charge à la rupture, la résistance au choc et augmente la phase ferritique.

Il a été prouvé que le chrome provoque des carbures mixtes de fer et de chrome. Les carbures Cr_3C et $(FeCr)_3C$ apparaissent surtout dans la matrice perlitique tandis que le carbure CrC apparaît dans une phase martensitique et ledeburitique.

Le Cr peut transformer une forme perlitique en fonte ferritique. Pour compenser l'effet trempant du Cr il faut ajouter conjointement un élément graphitisant tels que le Ni ou le Si.

Le Cr donne aux fontes GS une résistance à la corrosion et à l'usure. Les fontes blanches au Cr ont une bonne tenue à l'abrasion, grâce à leur teneur importante en carbures, qui sont des carbures eutectiques. La matrice participe également à l'abrasion, mais sa tenue dépend de sa

structure.

Vu leurs grande résistance à la corrosion et à l'usure, les fontes GS au Cr trouvent différentes applications industrielles comme pour la fabrication:

- Des outils de travail à froid
- Des cylindres de laminaires
- Des boulets et couronnes de broyeurs
- Des corps de pompes à boue.

Enfin, elles trouvent leur application là où l'usure par abrasion est intense.

- Commentaire.

- le Cr élève la ligne de transformation A_3 , donc augmente le %C ce qui augmente la dureté et la résistance à l'usure par suit.

- On voit d'après ce qui a été dit ci-dessus, que le Cr joue le rôle inverse du Ni

3° Influence combinée du Cr-Ni sur la fonte GS

Plusieurs auteurs, ont confirmé l'effet de blanchissement du Cr en fonction de l'épaisseur de la fonte alliée au Ni.

Wallich a montré qu'une fonte à 3,7% de C et de 1,76% de Si résiste deux fois moins à l'usure que lorsqu'elle renferme 2% de Ni auxquels on ajoute 0,5% de Cr.

Les renseignements de base sur l'action des éléments Ni et Cr pris séparément sont importants à connaître.

Les fontes au Ni-Cr ou fontes blanches avec des % (Cr-Ni) les plus bas possible sont dures, résistent à l'usure, à la fatigue et à la flexion par choc.

Du point de vue applications, elles sont moins faciles à usiner que les

fontes grises.

Une fonte constituée de carbures de fer et de perlite a une dureté qui varie de 450 ÷ 580 HB, par contre une fonte aux carbures complexes et martensite sa dureté est comprise entre 650 et 725 HB.

Le tableau ci-dessous illustre quelques exemples de dureté

Element	Dureté HB
Fe ₃ C	800
Perlite	200 - 250
Carbure complexe	900
Martensite	630 - 650

Tableau(2)

Dans les fontes au carbone, le chrome élève les points de transformation A_{c1} et A_{c3} . Mais dans les fontes au Ni, l'effet du Cr est différent; si le point A_{c1} est encore légèrement élevé, le point A_{c3} semble plutôt un peu baissé.

On note aussi que le Cr ajouté à une fonte au Ni diminue beaucoup la vitesse de refroidissement nécessaire pour obtenir l'état martensitique. De ce fait, il élève la résistance à la traction et particulièrement après trempe, comme il améliore aussi la résistance à l'usure.

Principaux avantages des fontes au Cr-Ni.

Nous résumons quelque un dans ce qui suit:

- 1^o La résistance mécanique, la résistance à l'usure et la résilience sont élevées.
- 2^o Penetration profonde de trempe.
- 3^o Traitement thermique simplifié, il y a moins de risques de tûpures

et de déformation.

Remarques: Pour comparer l'action du Cr seul à l'action combinée du Ni-Cr, nous énonçons les résultats suivants:

	Fonte trempée non alliée	Fonte au Cr	Fonte au Ni-Cr
Dureté HB	440	444	453

Tableau (3)

Pour obtenir des fontes martensitiques dures, il faut éviter des excès de Ni qui stabilise l'austénite. En cas d'insuffisance de Ni, on a au contraire des constituants moins durs; perlite et troostite au lieu de la martensite.

Pour avoir une fonte dure et résistante, il faut équilibrer les constituants durs (carbures complexes) et la matrice (martensite).

Commentaire:

Une fonte GS au Ni-Cr présente une grande résistance à l'usure car, le chrome Cr en tant que carburigène, forme des carbures dont la nature dépend du % en Cr.

Un grand % en Cr conduit à la formation de carbures spéciaux Cr_3C très durs. Si le % en Cr est insuffisant, il y a formation de carbures complexes $(Fe, Cr)_3C$ moins durs que les premiers.

6.3.3 Propriétés d'une fonte martensitique.

Les propriétés d'une fonte martensitique sont déterminées par:

- La qualité, la répartition des carbures et leur quantité.
- L'élimination des structures à faible dureté (perlite, troostite).
- Le Cr seul, même à des teneurs allant jusqu'à 10% et plus, n'augmente pas beaucoup la dureté des fontes blanches, mais augmente la profondeur de

trappe. Au contraire en combinaison avec le Ni, le Cr permet de compenser l'effet graphitisant du Ni et la profondeur de trempe peut-être réglée.

Il faut aussi rappeler qu'en général, une fonte à haute teneur en carbone exige moins de Ni pour devenir martensitique qu'une fonte à basse teneur en carbone. Ceci résulte du fait que les carbures ne contiennent pas du Ni.

Si on a, à la fois beaucoup de carbone et beaucoup de nickel, cela empêche les carbures de se transformer entièrement en martensite. Donc la teneur en Ni est limitée.

Conclusion

Les fontes GS alliées au (Ni-Cr) (fontes blanches) ont une bonne résistance à l'usure par abrasion.

Chapitre 7

Essais d'usure.

7.1 Introduction :

Les essais d'usure sont faits à l'aide de la machine réalisée, sur des échantillons en fonte alliée au Ni-Cr avec différents pourcentages de Ni et de Cr. Avant d'entamer ces essais nous parlerons des points essentiels dont il faut tenir compte lors du choix d'un matériau.

1° La matrice la plus dure est la martensite, mais son inconvénient est qu'elle ne tient pas bien les carbures, pour cela il nous faut une matrice qui s'oppose à l'arrachement des carbures, donc la structure doit être hétérogène c'est-à-dire (Martensite + Austénite); la martensite est dure, et l'austénite tient fortement les carbures et se transforme au fur et à mesure en martensite de transformation.

2° La formation des carbures de Cr induit une résistance à l'usure importante.

3° La résistance à l'usure augmente avec l'augmentation du % en Cr.

4° Le graphite en tant que lubrifiant perd son effet quand le contact se fait entre solide et abrasif.

7.2 Calcul d'usure.

L'usure peut être évaluée de manières différentes; nous citons:

1° La quantité de matière perdue par unité de distance parcourue.

2° La quantité de matière perdue par unité de temps.

3° La quantité de matière perdue par tour ou oscillation.

Les résultats sont donnés sous forme de:

masse, volume, ou épaisseur.

Les échantillons que nous avons adopté sont en fonte GS allié au Ni-Cr, leurs dimensions sont données comme suit:

- Longueur 25 mm.
- largeur 10 mm.
- épaisseur 10 mm.

Certains de ces échantillons ont été usiné au ateliers du G.M.

Les échantillons destinés à subir l'essai d'usure sont notés de la manière suivante :

GSC : fonte à graphite sphéroïdal non allié.

A : fonte à graphite sphéroïdal allié au Ni-Cr (1,069%Ni ; 0,292%Cr).

C : fonte à graphite sphéroïdal allié au Ni-Cr (1,197%Ni ; 0,986%Cr).

H : fonte à graphite sphéroïdal allié au Ni-Cr (0,346%Ni ; 0,993%Cr).

Dans nos expériences ; la charge est fixée à 1kg et la vitesse à 362 tr/min .

- Mode opératoire .

On place l'échantillon sur le porte échantillon et on le fixe à l'aide d'une vis .

On met la charge en place , on règle la glissière du réservoir pour laisser tomber la matière abrasive qui est le carbure de silicium pour meule , ses caractéristiques sont données en annexe .

On met le moteur en marche et au même temps on déclenche le chronomètre .

La matière abrasive tombe sur l'échantillon et est maintenue un certain temps par la matière caoutchouc , ainsi l'usure a lieu .

7.3 Résultats .

1^o. Essai d'usure à l'état brut (sans traitement thermique) .

L'essai d'usure sur les 4 échantillons cités ci-dessus a donner les résultats regroupés dans le tableau(4) :

Echantillon	masse avant (g)	masse après (g)	Δm (g)
GSC	15,0400	14,7927	0,2473
A	18,8985	18,6718	0,2267
C	16,2189	16,0069	0,2120
H	15,9228	15,8225	0,1003

Tableau (4)

N.B : La pesée est avant et après usure sur une balance électronique.

2°- Essai d'usure des échantillons traités.

Avec les mêmes échantillons auxquels on fait subir les traitement thermique suivants :

Chauffage jusqu'à 870°C suivi d'une trempe à l'huile, puis un revenu à 200°C et enfin on fait l'essai d'usure.

Cette opération est répétée pour les températures de revenu suivantes : 300°C ; 400°C ; 500°C ; 600°C ; et 700°C.

On tient à signaler que le maintien après chauffage dure une heure et après revenu une demi heure.

Avant d'aborder les résultats obtenus, on tient à donner une théorie succincte sur la trempe et le revenu.

- Trempe :

Tremper une fonte, c'est le maintien à la température ordinaire dans un état hors d'équilibre.

Ce traitement est destiné à donner à la fonte des qualités de tenacité, d'usure et de dureté.

Tout chauffage au dessus de A_3 suivi d'un refroidissement est défini

comme une trempe.

Les constituants de trempe sont : La martensite ; la troostite, et

— Cycle thermique :

Le cycle thermique comporte trois étapes :

- 1^o Chauffage destiné à emmener la fonte à l'état austénitique (T_c de trempe)
- 2^o Maintien à cette température de façon à réaliser la mise en solution des carbures dans le fer γ , et l'homogénéisation de l'austénite.
- 3^o Refroidissement rapide par immersion dans un milieu qui convient.

— Revenu.

Définition :

La fonte trempée est souvent plus dur qu'il en faut et généralement très fragile pour qu'elle soit mise en service. Pour cela une trempe est habituellement suivie d'un revenu qui consiste en un chauffage au dessous de A_{c1} , suivi d'un refroidissement.

Le revenu réalise un compromis entre deux exigences contradictoires, diminution de la fragilité et élévation de dureté ; il augmente aussi l'allongement, surtout la résilience ; mais il diminue la dureté, la limite élastique et la résistance à la traction.

Le revenu provoque la disparition des contraintes propres (i.e. tensions internes).

But du revenu :

Le revenu atténue certains effets néfastes de trempe, en particulier la fragilité de la martensite. Comme il représente un début de retour à l'état d'équilibre. D'une manière plus précise, le but à atteindre est de réaliser un mail

leur compromis entre des caractéristiques mécaniques évoluant dans des sens opposés (fragilité ; dureté) et ceci en fonction de l'emploi prévu pour la pièce traitée. En plus il supprime complètement ou partiellement les contraintes internes dues à la trempe.

- Effets du revenu sur les caractéristiques mécaniques - Résumé -

- la dureté, la résistance à la rupture et la limite élastique diminuent.
- La résilience, l'allongement, et la striction augmentent

- Facteurs influençant le revenu.

- . Etat initial : Pour une même T° et un même temps de maintien, si l'état initial est dur, la dureté après revenu sera grande.
- . Température : La dureté après revenu diminue lorsque la température augmente.
- . Temps : Il agit dans le même sens que la température, c'est-à-dire la dureté diminue lorsque le temps augmente.

- Principaux revenus industriels

De 150°C à 220°C : La dureté est conservée intégralement ou presque, la résistance reste faible, les contraintes ont disparues d'où stabilité dimensionnelle. On a : Austénite résiduelle + martensite de revenu + Fe₃C.

De 275°C à 325°C : La résilience s'améliore, la dureté diminue faiblement d'où son application pour fabriquer les outils coupants.

La structure obtenue : austénite résiduelle + martensite de revenu + Fe₃C.

De 450°C à 550°C : Correspond à une meilleure limite élastique, utilisé pour la fabrication des ressort.

La structure obtenue : Troostite + Fe₃C.

De 600°C à 700°C : Revenu permettent d'obtenir une résilience maximale, appliqué

aux pièces dures de sécurité .

La structure obtenue : sorbite de revenu .

Conclusion :

Les meilleures caractéristiques sont celles données par les température comprise entre 500°C et 675°C .

La température de revenu est choisie de telle façon que le traitement augmente l'allongement et la résilience , sans trop diminuer la dureté et la résistance à la traction .

Les résultats des essais pour chaque température de revenu sont donnés par les tableaux (5) ,(6) ,(7) ,(8) ,(9) ,(10) .

Revenu à 200°C

	masse avant (g)	masse après (g)	Δm (g)
G.S.C	16,7756	16,5379	0,2377
A	13,2776	13,0743	0,2033
C	15,2379	15,0040	0,2339
H	17,6726	17,4691	0,2035

Revenu à 300°C

	masse avant (g)	masse après (g)	Δm (g)
G.S.C	16,2457	16,0051	0,2406
A	13,2559	12,8994	0,3565
C	15,0900	14,8670	0,2230
H	17,3780	17,1686	0,2094

Revenu à 400°C

	masse avant (g)	masse après (g)	Δm (g)
G.S.C	13,0232	12,7766	0,2466
A	18,6913	18,4578	0,2335
C	16,0083	15,7662	0,2421
H	15,1272	15,2452	0,1823

Revenu à 500°C

	masse avant (g)	masse après (g)	Δm (g)
G.S.S	12,8509	12,6012	0,2497
A	12,6172	12,3578	0,2594
C	13,3515	13,1139	0,2376
H	15,7652	15,5496	0,2156

Revenu à 600°C

	masse avant (g)	masse après (g)	Δm (g)
G.S.C	12,6347	12,3848	0,2499
A	12,3487	12,0329	0,3158
C	13,2004	12,9783	0,2221
H	15,5405	15,3515	0,1890

Revenu à 700°C

G.S.C	15,8457	15,4856	0,3601
A	16,0966	15,8727	0,2239
C	17,5410	17,3042	0,2368
H	16,7784	12,5875	0,1909

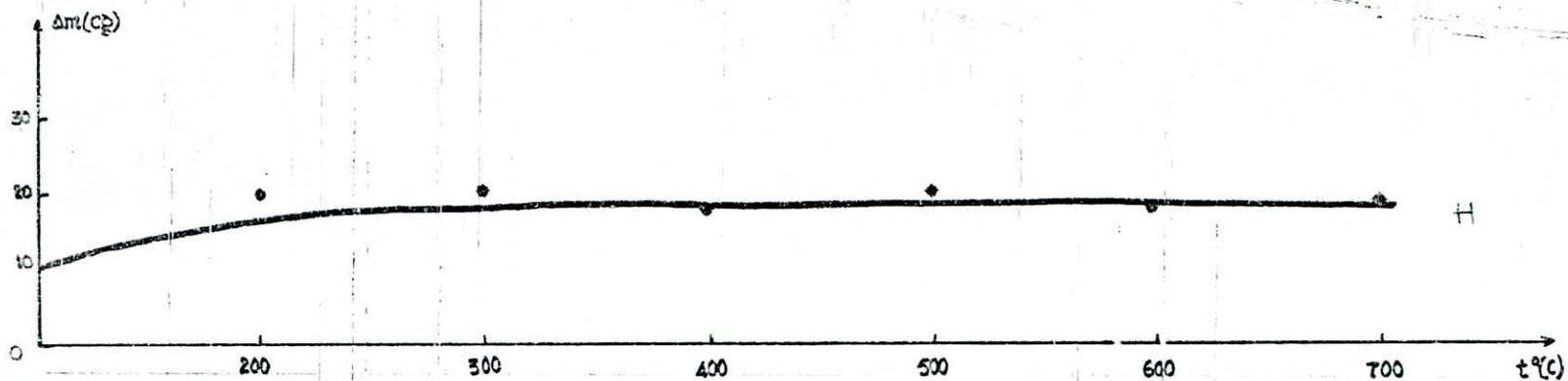
Pour mieux comprendre ces résultats et faire une comparaison, nous avons dressé les tableaux (11); (12); (13) et (14).

	t°C de revenu	Δm (g)
Fonte G.S.C non alliée	Brut sans T.T	0,2473
	200	0,2377
	300	0,2406
	400	0,2466
	500	0,2497
	600	0,2499
	700	0,3601

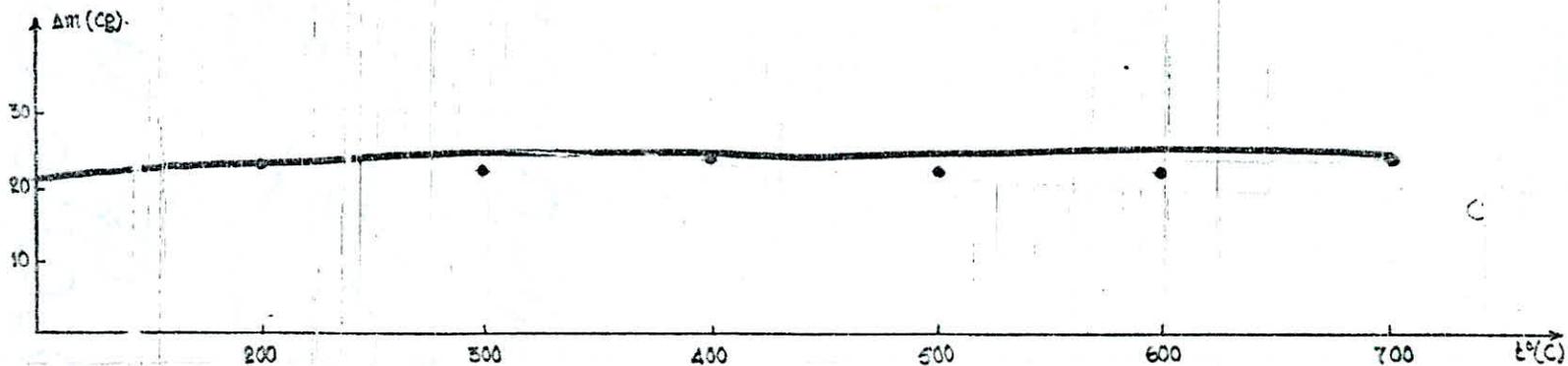
	t°C de revenu	Δm (g)
Fonte G.S.C alliée au (Ni-Cr) - A -	Brut sans T.T	0,2267
	200	0,2033
	300	0,3563
	400	0,2335
	500	0,2594
	600	0,3158
	700	0,2239

	t°C de revenu	Δm (g)
Fonte G.S.C alliée au (Ni-Cr) - C -	Brut sans T.T	0,2120
	200	0,2359
	300	0,2230
	400	0,2421
	500	0,2376
	600	0,2221
	700	0,2368

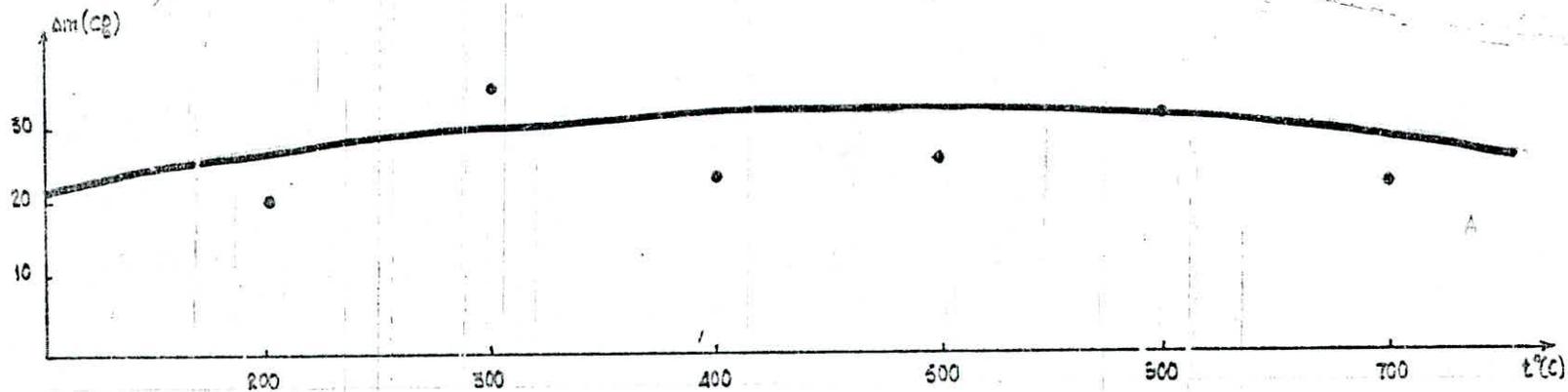
	t°C de revenu	Δm (g)
Fonte G.S.C alliée au (Ni-Cr) - H -	Brut sans T.T	0,1003
	200	0,2035
	300	0,2094
	400	0,1823
	500	0,2156
	600	0,1890
	700	0,1909



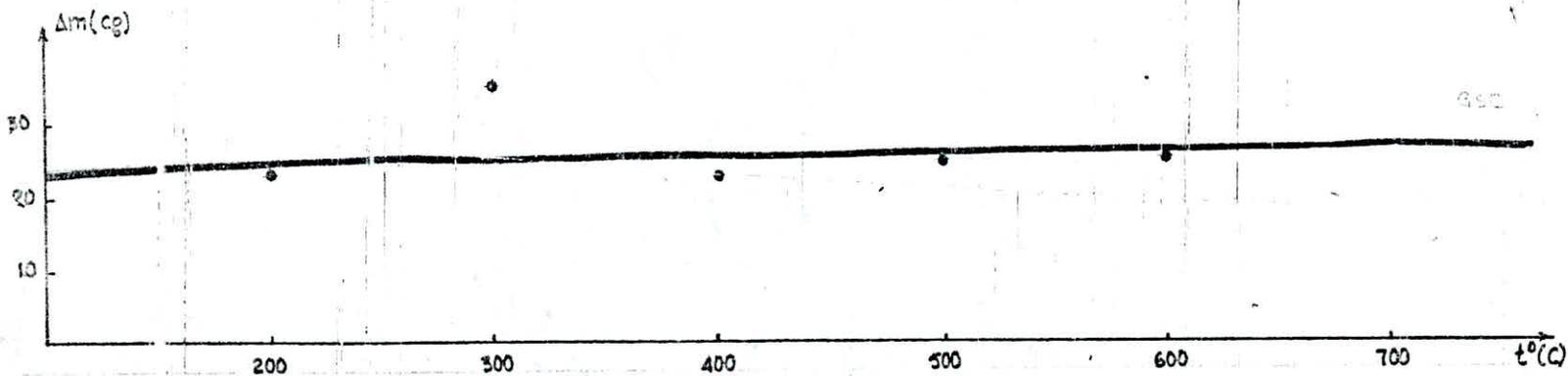
graphe donnant les variations $\Delta m = f(t^{\circ})$ pour la fonte (t.)



graphe donnant les variations $\Delta m = f(t^{\circ})$ pour la fonte (C)



graphe donnant les variations $\Delta m = f(t^\circ)$ pour la fonte (A)



graphe donnant les variations $\Delta m = f(t^\circ)$ pour la fonte (ASC)

7.4 Interpretation des résultats.

D'après les courbes tracées et qui représentent les variations (Δm) en fonction des températures de revenu, nous pourrions faire une comparaison de la résistance à l'usure entre une fonte ^{non} alliée et une alliée au Ni-Cr à différents pourcentages. Nous constatons que :

- La résistance à l'usure de la fonte G.S non alliée est presque constante pour les différentes températures de revenu.

- Pour la fonte C₁ (1,069% Ni ; 0,292% Cr) nous avons, une faible résistance à l'usure et cela est dû au faible pourcentage du Cr par rapport au pourcentage du Ni qui n'influe pas sur la résistance à l'usure, mais sur d'autres propriétés mécaniques (Résilience ; fragilité ; ... etc).

- Pour la fonte C₃ (1,197% Ni, 0,986% Cr), nous constatons qu'il n'y a pas une grande différence entre le % du Cr et celui du Ni, pour cela cette courbe se trouve juste au dessous de celle de la fonte G.S.C non alliée, donc la résistance à l'usure de la fonte C₃ a augmenté et la cause de cela est l'augmentation du % en Cr.

- Pour la fonte C₇ (0,346% Ni ; 0,983% Cr), le pourcentage du chrome est augmenté, la résistance à l'usure aussi, par contre nous voyons que le % du Ni est diminué ce qui engendre la diminution de certaines propriétés mécaniques.

- Remarque :

Dans les domaines pratiques (industriels), il ne suffit pas d'augmenter la résistance à l'usure en augmentant le % du Cr, mais il faut prendre en considération les autres propriétés mécaniques.

Comme par exemple dans le cas des pièces travaillant dans des conditions où il faut une grande tenue à l'usure, mais parallèlement il faut une

bonne résistance au choc, dans ce cas il faut faire un choix de matériaux bien soigné.

7.5. Conclusion

Nous pouvons d'après ces essais que la résistance à l'usure augmente avec l'augmentation du taux de Cr.

Parmi les 4 échantillons sur lesquels nos essais ont été menés, nous remarquons que la fonte C₃ (1,197% Ni ; 0,986% Cr) est celle qui présente les meilleures caractéristiques, d'une part le % en Cr lui a conféré une bonne résistance à l'usure, d'autre part le % en Ni lui a donné une bonne résistance au choc.

ANNEXES

Annexe(1)

Caracteristiques de l'abrasif utilisé dans nos essais

Nom : Carbure de silicium pour meules.

Composition chimique:

SiC	= 99,2 ÷ 99,6 %
SiO ₂ + Si métallique	= 0,5% max
C libre	= 0,15% max
Fe ₂ O ₃	= 0,1% max
Al ₂ O ₃	= 0,15% max
Fe dissous	= 0,05% max

Perte à la potasse bouillante = 0,5 % max.

Caracteristiques générales:

Excessivement dur, très tranchant et friable.

Couleur d'origine :

vert foncé à vert clair selon la taille des grains.

Couleur après cuisson:

Vert intense

Structure cristalline

α-SiC classe hexagonale et rhomboédrique du S.H.

Forme des grains:

Cubique arêtes vives.

Dureté Hv

en moyenne 2800 N/mm².

BIBLIOGRAPHIE

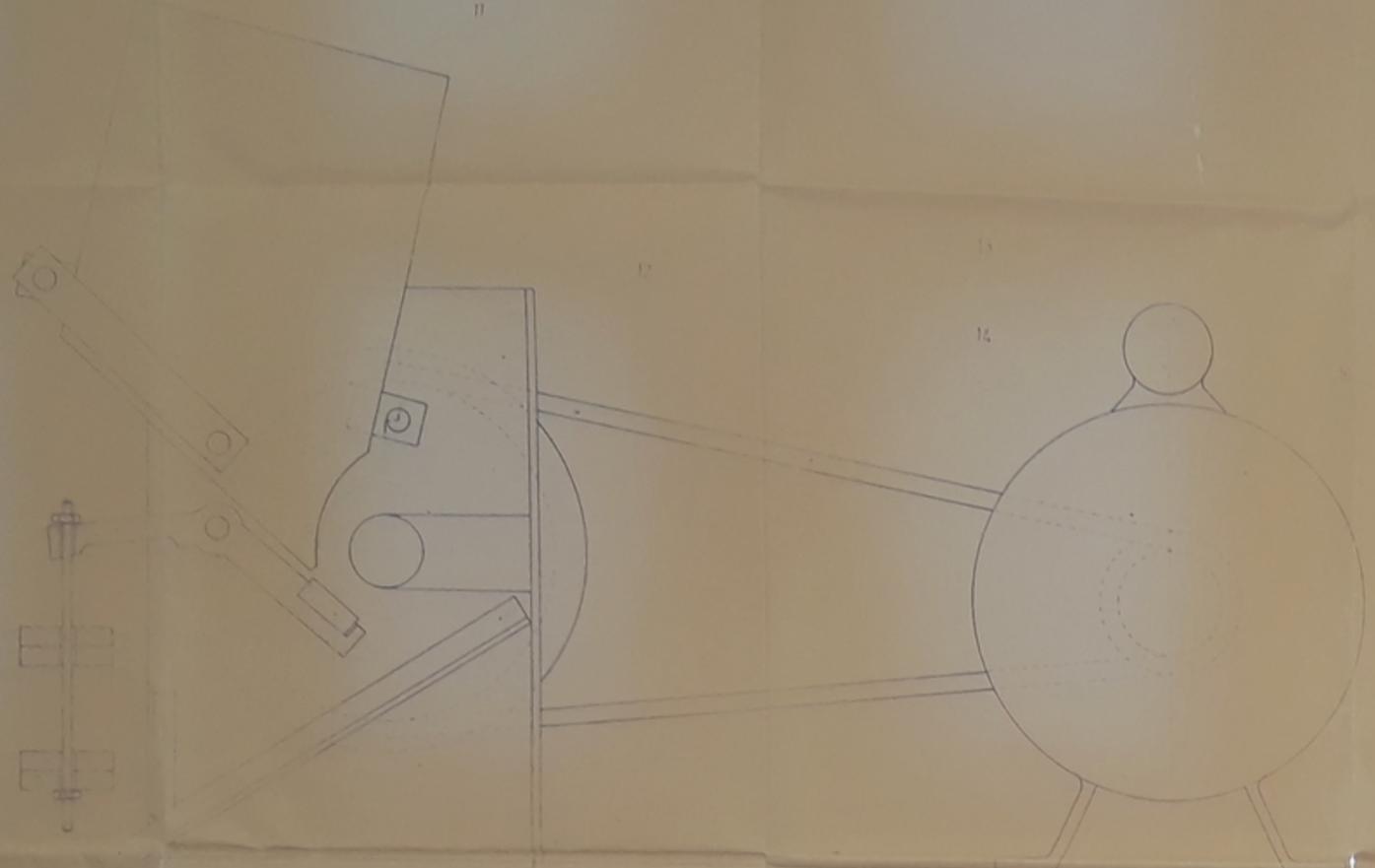
- ROOS _ précis de métallurgie
- BAIN-PAXTON _ les éléments d'addition dans l'acier .
- CHAUSSIN et HILLY _ Métallurgie Tome(1) .
- LAKHTINE _ Metallographie et traitement thermique des métaux .
- BOUJOLIX et RENOUX _ Métallurgie classe terminal
- CHUSSIN et HILLY _ cours de métallurgie _ Terminale _
- Technique de l'ingénieur (partie usure) _ de mécanique _
- Technique de l'ingénieur _ Métallurgie _
- LIGNON et MAILLEBEAU _ Métaux ferreux fascicule n° 9 .
- Revue de Fonderie M2 .
- JEAN DEHRS _ Usure Avancée, corrosion .
- These : DJIDJELI
- Thèse de Docteur ingénieur : Structures métallurgiques et caractérisation de l'abrasion des fontes blanches au chrome
 étudié par : José
- Encyclopedie des sciences industrielles _ QUILLET _
- JJ. CAUBET _ Théorie et pratiques industrielles du frottement .

Légende

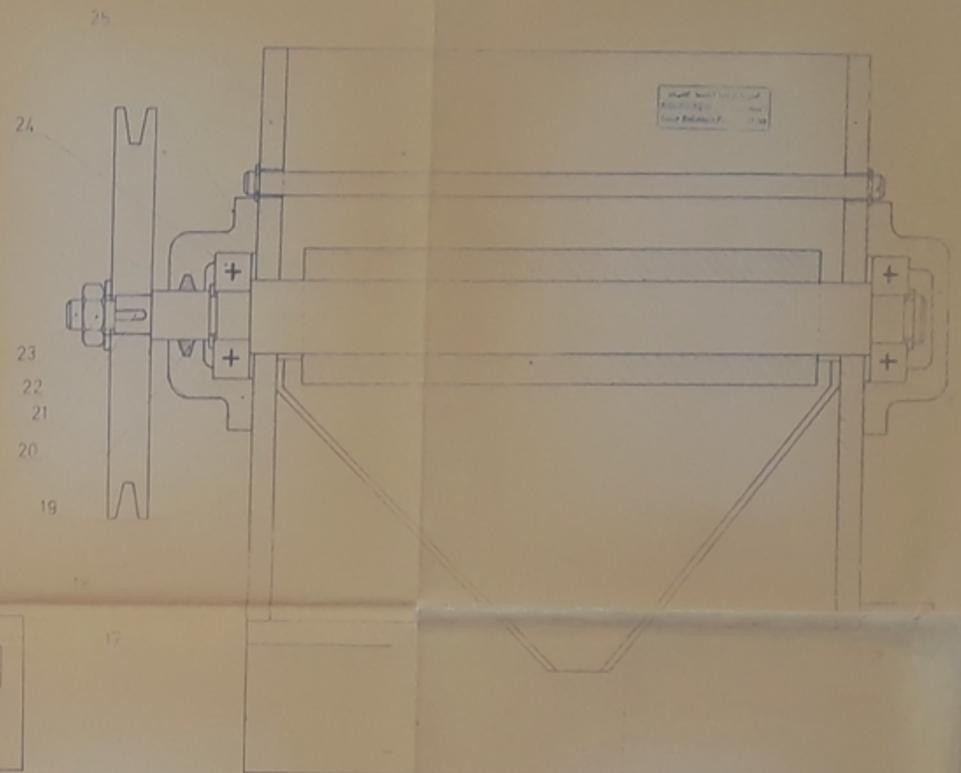
Rep	Nombre	Designation	matière.
1	1	échantillon	Fonte
2	4	vis CM4x9/9	
3	1	bati.	acier
4	1	perce d'évacuation	acier
5	1	Tôle protectrice	Aluminium.
6	1	goujon M4 136	Acier
7	2	Ecrou M4 Hm.	
8	10	poids	acier
9	1	porte échantillon	acier
10	2	support de tiges	Alliage de cu.
11	1	Reservoir	acier
12	4	vis CM 4 9/9 .	
13	2	vis CM 4 9/9 .	
14	1	courroie.	
15	1	Moteur	
16	1	Interrupteur	plastique
17	1	enrobage	caoutchouc.
18	1	couvercle	
19	1	joint à feutre.	
20	1	clavette	
21	1	Rondelle	
22	1	Ecrou M12 H.	
23	1	Axe	Acier
24	2	Roulement	Acier
25	4	vis CM 8x9/9	
26	1	plaque fixe (support)	Acier
27	1	plaque mobile réglable	Acier
28	2	Rondelle	
29	1	tige	Acier
30	2	Rondelle	
31	1	caxe roulement	Acier
32	1	plaque de réglage et fixation	Acier
33	2	vis M4	
34	4	plaque supportant le réservoir	Acier
35	2	support tige	
36	4	vis (fixe moteur) M8.12	
37	4	vis	
38	2	vis CM4x9/9.	
39	1	bati.	
40	1	tige.	

A

11

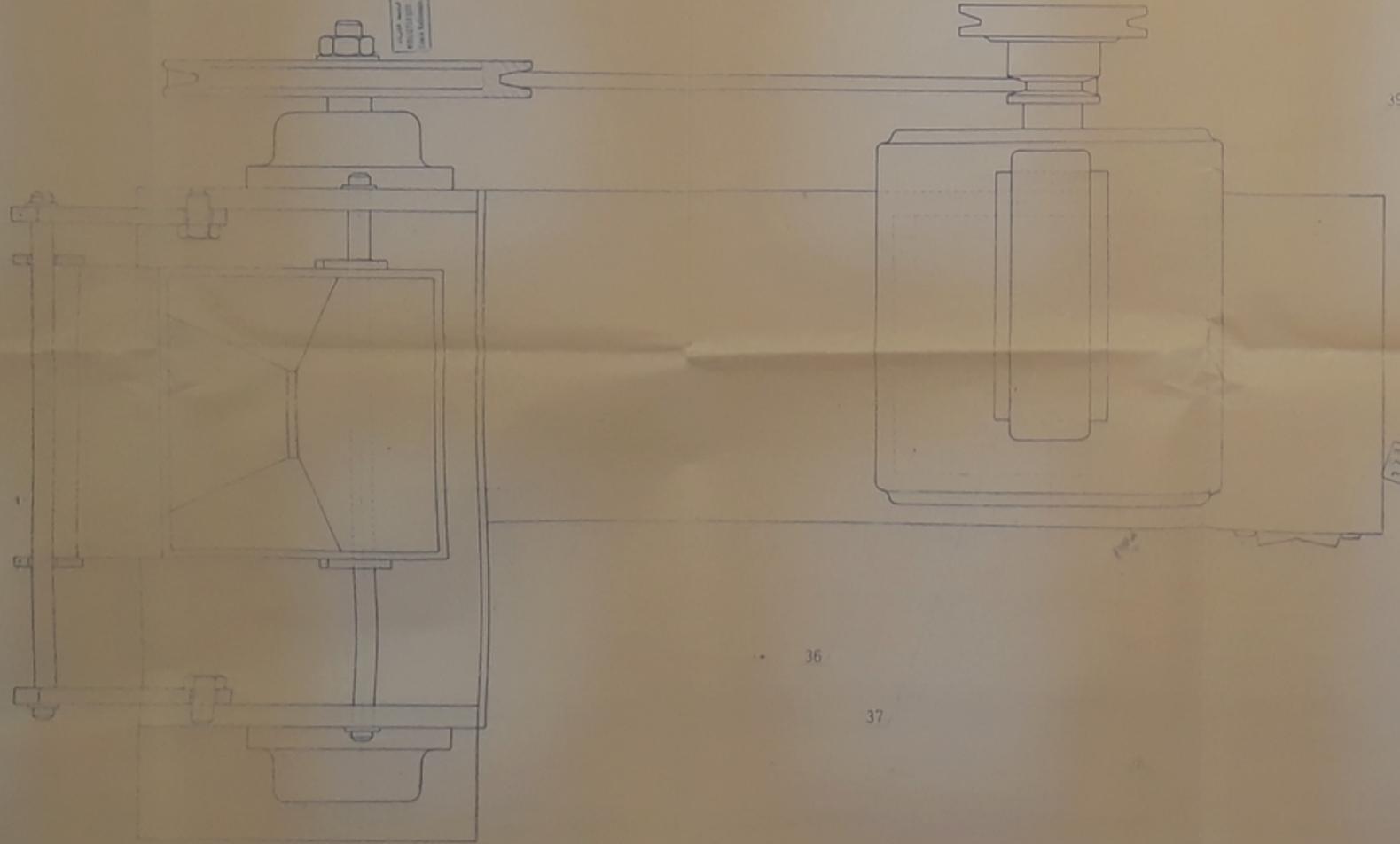


AA



A

40
35



39

APPAREIL D'USURE

MAISON
ANCIENNE