

5/98

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique
Département de Métallurgique

Mémoire de fin d'études

*Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en
Génie Métallurgique*



Thème :

ETUDE TRIBOLOGIQUE D'UNE FONTE G.S.C TRAITÉE

Présenté par :

Mr Boudjema AMOKRANE

Proposé et dirigé par :
M^{er} E.SALHI

Maître de conférences à l'E.N.P

Septembre 1998

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique
Département de Métallurgie

Mémoire de fin d'études

*Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en
Génie Métallurgique*

Thème :



ETUDE TRIBOLOGIQUE D'UNE FONTE G.S.C TRAITÉE

Présenté par :

M^{er} Boudjema AMOKRANE

Proposé et dirigé par :
M^{er} E.SALHI

Maître de conférences à l'E.N.P

Septembre 1998

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce travail,

A la mémoire de mes très chers grands parents,

A ma très chère mère,

A mon cher père,

A mes frères et sœurs,

A tous mes amis de la section VÔ Viêt-nam

A tous mes amis.

BOUDJEMMA AMOKRANE ...

REMERCIEMENTS

LE TRAVAIL QUI FAIT L'OBJET DE CE MEMOIRE A ETE REALISE AU LABORATOIRE DE L'UNITE DE FONDERIE DE ROUBA , AINSI QUE DANS UN ATELIER PRIVE DE FABRICATION MECANIQUE.

J'ADRESSE MES SINCERES REMERCIEMENTS A MONSIEUR **E.SALHI** , D'AVOIR ENCADRER CE TRAVAIL ET AUSSI POUR CES PRECIEUX CONSEILS QUI M'ONT GUIDES TOUT AU LONG DE LA REALISATION DE CE PROJET.

JE TIENS A REMERCIER MONSIEUR **L.SAI** , CADRE A L'U .F.R , POUR LE TEMPS PRECIEUX QUI M'A ACCORDE ET AUSSI POUR LES NOMBREUX OUVRAGES QUI M'A PROCURES.

JE REMERCIE AUSSI TOUTE L'EQUIPE DU LABORATOIRE DE L'U.F.R , EN PARTICULIER MONSIEUR **BELKACEMI** ,MONSIEUR **ZOUIEDE** ET MONSIEUR **MAZARI** POUR LEURS AIDES INDISPENSABLES.

MES VIFS REMERCIEMENTS VONT EGALEMENT A MONSIEUR **K.SOUIDANI** DE M'AVOIR ACCEPTER AU SEIN DE SON ATELIER ET D'AVOIR MIS A MA DISPOSITION TOUS SES EQUIPEMENTS.

MONSIEUR **M.BEGRICHE** EST FORTEMENT REMERCIE POUR SON AIDE CONSTANTE , QU'IL TROUVE ICI MA GRATITUDE LA PLUS PRONONCEE.

JE TIENS A ASSURER DE MA PROFONDE RECONNAISSANCE MON AMI **A.S.ADAMOU** POUR LA DISPONIBILITE QU'IL A TOUJOURS TEMOIGNE, POUR LES NOMBREUSES DISCUSSIONS QUE NOUS AVONS ECHANGEES.

A.ADDAD EST FORTEMENT REMERCIE POUR SES DIVERSES SUGGESTIONS ET DE SON BON HUMEUR ...

ENFIN ,JE NE SAURAI OUBLIER DANS MES REMERCIEMENTS LES ENSEIGNANTS , POUR LEUR PRESENCE APPRECIEE DANS LE JURY.

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

SOMMAIRE

SOMMAIRE

I.1 Généralités bibliographiques sur les fontes	3
I.1.1 Définition des fontes	3
I.1.2 Les types de fontes	3
I.1.3 Composition chimique	4
I.1.4 Les constituants et les phases de la fonte grise	5
I.1.5 Traitements thermiques	5
I.1.6 Caractéristiques mécaniques de la fonte	8
I.2 Frottement et usure	9
I.2.1 Introduction	9
I.2.2 Frottement à sec	9
I.2.3 Usure	11
I.2.3.1 Usure adhésive	11
I.2.3.2 Usure abrasive	13
I.2.3.3 Usure corrosive	14
I.2.3.4 Usure par fatigue	14
I.2.3.5 Conséquences de l'usure	15
I.2.3.6 Influence de la charge sur l'usure	18
I.2.3.7 Influence de la vitesse sur l'usure	19
II.1 Elaboration des fontes GSC	20
II.2 Analyse chimique	21
II.3 Préparation des échantillons à PUF	22
II.4 Micrographie	24
II.5 Four de traitement	24
II.6 Essai de dureté	25
II.7 Mesure des rugosités et présentation des profils de surface	25
II.8 Dispositif expérimental de l'essai d'usure	30

III.1 Caractérisation de l'état brut de coulée	35
III.1.1 Analyse chimique	35
III.1.2 Observation micrographique	36
III.2 Traitements thermiques	39
III.2.1 Traitement thermique de la fonte G.S.C	39
III.2.1.1 Traitement de perlitisation	39
III.2.1.2 Traitement de ferritisation	40
III.2.2 Traitement thermique de la fonte G.S.A	40
III.2.3 Observation métallographique après traitement	42
III.3 Profilométrie avant l'essai d'usure	46
III.3.1 Notation des échantillons	47
III.3.2 Profilométrie avant essais tribologiques	47
III.4 Essais tribologiques	50
III.4.1 Choix des paramètres étudiés	50
III.4.2 Influence de la durée de l'essai sur l'usure à différentes charges	51
III.4.3 Influence de la vitesse sur l'usure	60
III.5 Profilométrie après essais tribologiques	62
III.6 Essai de dureté	65
III.7 Discussion	68
Conclusion générale	70
Références bibliographiques	71

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'industrie moderne de la métallurgie réclame des matériaux et des alliages, dont les caractéristiques, doivent répondre aux exigences, toujours croissantes de cette dernière. C'est dans cette optique, que les chercheurs et les ingénieurs, essayent d'augmenter la durée d'utilisation de ces matériaux, en leur conférant une plus grande résistance aux différentes sollicitations de l'environnement, dans lequel évoluera le comportement de la pièce en question.

Parmi les phénomènes qui réduisent la durée de vie des pièces, on distinguera l'usure et les frottements.

La résistance à ces deux phénomènes n'est guère intrinsèque au matériau, mais plutôt de ce qu'on appelle les caractéristiques du "Tribosystème".

On désigne par le terme 'Tribosystème', les matériaux en contact, ainsi que tous les paramètres du milieu environnant.

L'usure et le frottement sont respectivement, les causes de la perte d'énergie et de la perte de masse dans le système considéré, ce qui justifie l'importance que portent les chercheurs sur cette discipline appelée "Tribologie".

L'objet de ce travail, consiste à étudier la tenue à l'usure de la nuance de fonte G.S.A qui subit au préalable de multiples traitements, entre autres ceux du recuit de ferritisation et du recuit de perlitisation ainsi que la variation des différents paramètres de la sollicitation en usure, tel que : la charge, la vitesse et la durée de la sollicitation.

Notre travail est scindé en trois chapitres :

- Dans un premier lieu, nous plaçons l'étude dans son contexte général, en évoquant brièvement des notions de base concernant les fontes, et en particulier les

-

fontes grises, suivie d'une présentation des principaux mécanismes d'usures, ainsi qu'un bref aperçu sur les phénomènes du frottement.

- Dans un deuxième chapitre, nous présentons les techniques expérimentales entreprises pour la réalisation de ce projet.
- En dernier lieu, on a consacré un chapitre, pour les résultats obtenus ainsi que des interprétations et des discussions qui en découlent.

Bien évidemment, cette étude sera clôturée par une conclusion générale et des recommandations.

PREMIER CHAPITRE
LES FONTES ET L'USURE

Les fontes et l'usure

I.1 Généralités bibliographiques sur les fontes

I.1.1 Définition des fontes

Les alliages de fer contenant plus de **2,1%** de carbone , sont appelés des fontes . Le carbone abaisse le point de fusion du fer , un acier à moyenne teneur en carbone fond à 1500°C alors qu'une fonte à **4%** de carbone fond à **1160°C** seulement , d'où leur nom [1]. Les fontes peuvent être fondues dans des fours très primitifs et coulées sous des géométries complexes . Cependant , les techniques de production et de mise en forme de la fonte ont beaucoup évoluées de nos jours et leur domaine d'utilisation s'est élargit considérablement .

I.1.2 Les types de fontes

On peut citer trois types de fontes qui sont :

- **Fontes blanches** : elles sont constituées de perlite , de lédéburite et de cémentite secondaire .Elles sont caractérisées par une faible teneur en silicium et une teneur élevée de manganèse [2]. En ce qui concerne leur utilisation , elles occupent un créneau restreint dans la gamme des fontes ordinaires à cause de leur fragilité .
- **Fontes malléables** : elles s'obtiennent par traitement thermique à partir des fontes blanches elles sont constituées de perlite ,de cémentite secondaire ,de lédéburite et du graphite nodulaire [3].

On trouve deux groupes de fontes malléables , l'un appelé Fontes malléables à cœur noir , obtenues par un recuit de graphitisation , ces fontes sont généralement dites américaines. L'autre groupe , c'est les fonte malléables à cœur blanc , obtenues par une décarburation , elles sont dites européennes .

- **Fontes grises** : elles représentent la majeure partie des fontes utilisées ; c'est des alliages Fe-C-Si qui contiennent des impuretés inévitables tel que Mn, P et S [4,5].

Dans la structure de ces fontes, la plus grande partie du carbone, se trouve sous la forme de graphite, c'est une caractéristique particulière de ces fontes qui détermine de nombreuses propriétés. Le silicium intervient dans les fontes grises comme élément graphitisant. La matrice comprend soit la perlite, soit la ferrite, soit une matrice ferrito-perlitique.

1.1.3 Composition chimique

Il y a cinq éléments qui interviennent dans la composition chimique d'une fonte grise classique, ce sont : le carbone, le silicium, le soufre, le manganèse et le phosphore.

- **Carbone** : C'est un élément graphitisant. A la température ambiante, le carbone se trouve en solution dans la ferrite, soit à l'état combiné Fe_3C , soit sous forme de graphite. Le carbone est un élément qui améliore la coulabilité, et diminue les défauts de retassure. Sa teneur est généralement fixée entre 3,2 et 4 % dans les fontes grises.
- **Silicium** : c'est un élément graphitisant de base, il élargit la bande de solidification et la bande triphasée, c'est un élément alphagène, donc favorise la formation de la ferrite, il déplace aussi le point eutectique vers la gauche.
- **Soufre** : C'est une impureté qui altère les propriétés mécaniques et la coulabilité de la fonte, il ralentit sensiblement la graphitisation et provoque le grossissement des lamelles de graphite, c'est pourquoi sa teneur doit être ramenée à 0,010 %.
- **Manganèse** : C'est un élément carburigène, donc pour éviter la formation de la fonte blanche ou truitée dans les parties minces de la pièce, il faut diminuer sa teneur. Toutefois aux teneurs habituelles dans les fontes ordinaires (0,4% à 0,8 % de Mn) son *action anti-graphitisante* est peu sensible.
- **Phosphore** : Sa teneur dans la fonte grise ne dépasse pas généralement 0,2%. Le phosphore augmente la coulabilité, abaisse les propriétés mécaniques de la fonte, fragilise les joints de grains, ce qui provoquerait des ruptures intergranulaires.

I.1.4 Les constituants et les phases de la fonte grise

- **Graphite** : C'est un corps stable qui ne se dissocie qu'à 3650°C , c'est le constituant qui conditionne en grande partie les propriétés mécaniques des fontes en fonction de sa forme , sa dimension , sa répartition et l'abondance .
- **Ferrite** : C'est une solution solide d'insertion composée d'une teneur en carbone inférieure à 0,005% , qui se logent au hasard au milieu des sites *tétraédriques et octaédriques* . Les propriétés de la ferrite dépendent de la taille du grain mais aussi de la qualité des éléments qui peuvent se trouver en solution de substitution .

A titre d'exemple , le **tableau I.1** mets en évidence l'influence du silicium sur les propriétés mécaniques :

	Rm (N/mm²)	HB
Ferrite (acier doux)	275	75
Ferrite à 2 %Si	309	88
Ferrite à 3% Si	530	150

Tableau I.1 : Influence du silicium sur les caractéristiques mécaniques

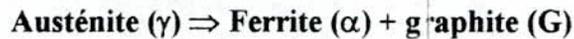
- **Perlite** : C'est un constituant des couches juxtaposées de ferrite et de carbure de fer très dur . Cette morphologie structurale se présente sous forme de lamelles, plus la distance interlamellaire est faible, plus la dureté, la charge de rupture et la limite élastique sont élevées .Pour ce qui est de la résistance et l'allongement, il a été constaté qu'ils diminuent .

I.1.5 Traitements thermiques

La structure et les propriétés désirées des fontes grises sont souvent obtenues à l'état brut de coulée. Cependant ,il existe toujours des fonderies qui continuent à pratiquer le recuit . Quand il y a des carbures ou uniquement une matrice perlitique , ce traitement de recuit a un caractère correctif nécessaire pour la diminution de la dureté . Parmi les traitements de recuit , il existe :

• **Recuit de ferritisation** : utilisé pour obtenir une matrice ferritique, on aura donc un abaissement de la dureté et une plasticité maximale [6].

•.1) **Recuit de ferritisation directe** : Il consiste en un maintien dans la bande triphasée entre A_{1min} et A_{1max} , ce qui provoque la transformation de l'austénite en ferrite suivant la réaction [6] :



Le cycle consiste en un chauffage jusqu'à une température comprise entre A_{1min} et A_{1max} , puis d'un refroidissement lent, dans le four jusqu'à une température inférieure à A_{1min} suivi d'un refroidissement à l'air libre jusqu'à la température ambiante (**figure I.1**).

Ce traitement de ferritisation peut être précédé par une austénitisation et ceci afin de décomposer les carbures secondaires :



Puis dans la bande triphasée :



Ce cycle est représenté sur la **figure I.2** :

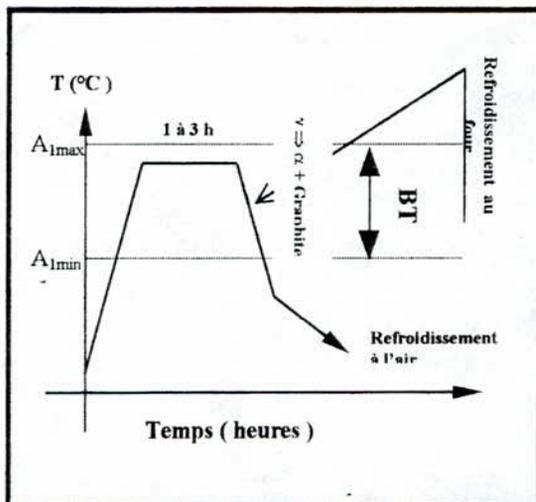


Figure I.1 : Cycle de ferritisation directe sans austénitisation

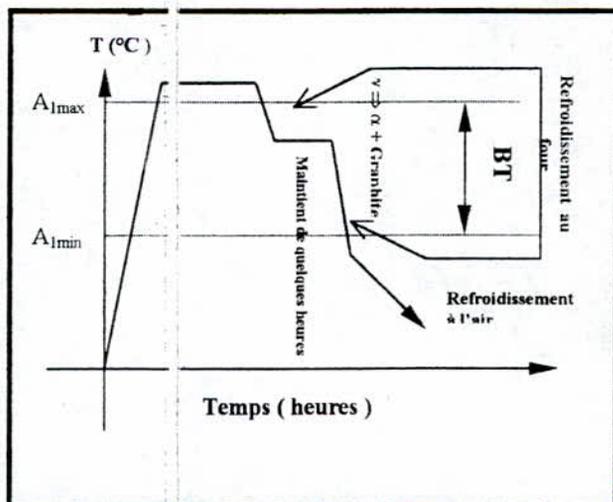


Figure I.2 : Cycle de ferritisation directe avec austénitisation

•.2) **Recuit de ferritisation indirecte** : Ce recuit se fait par un maintien de quelques heures à une température de quelques degrés au dessous de A_{1min} , le refroidissement se fait à l'air libre (**figure I.3**) .

On peut procéder à cette ferritisation par une austénitisation complète de ceci , s'il existe des carbures secondaires (**figure I.4**) .

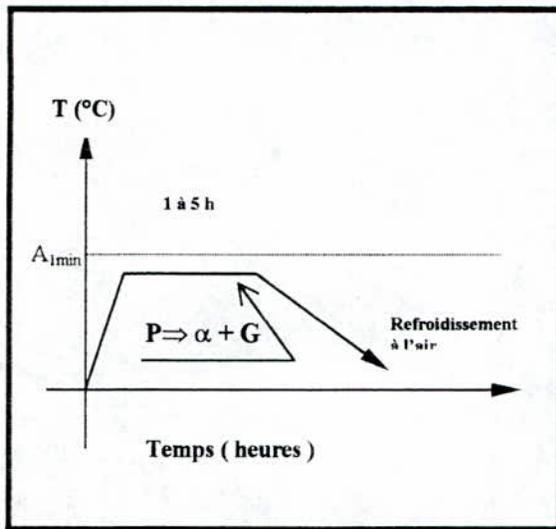


Figure I.3 : Cycle de ferritisation indirecte sans austénitisation

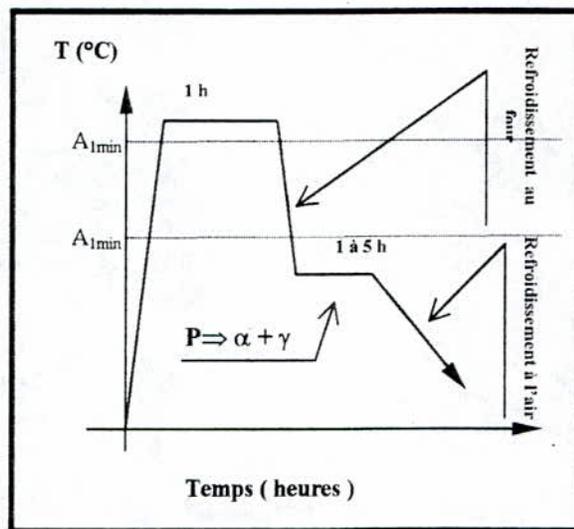


Figure I.4 : Cycle de ferritisation indirecte avec austénitisation

• **Recuit de perlitisation** : Ce recuit a pour but , contrairement au traitement de recuit de ferritisation l'obtention d'une résistance plus élevée à la traction et une plus grande dureté . Ce traitement thermique se fait par un maintien à une température de 840 °C à 860 °C suivi d'un refroidissement à l'air libre (**figure I.5**) . Dans le cas où il existe des carbures ,un recuit de malléabilisation de haute température à 900 °C est nécessaire [2] (**figure I-6**).

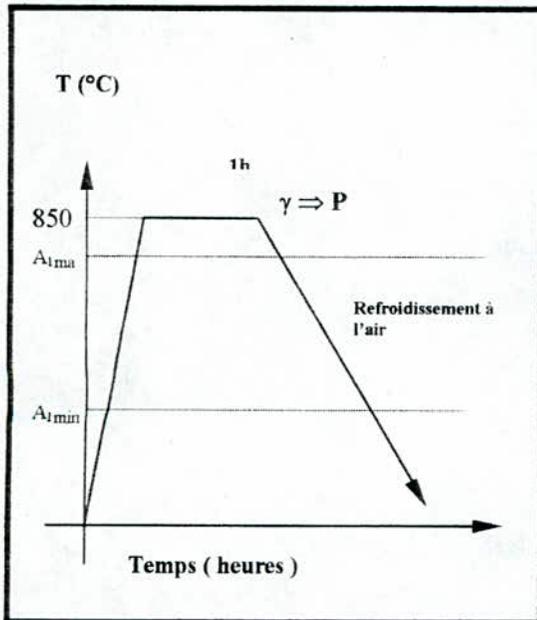


Figure 1.5 : Cycle de perlitisation

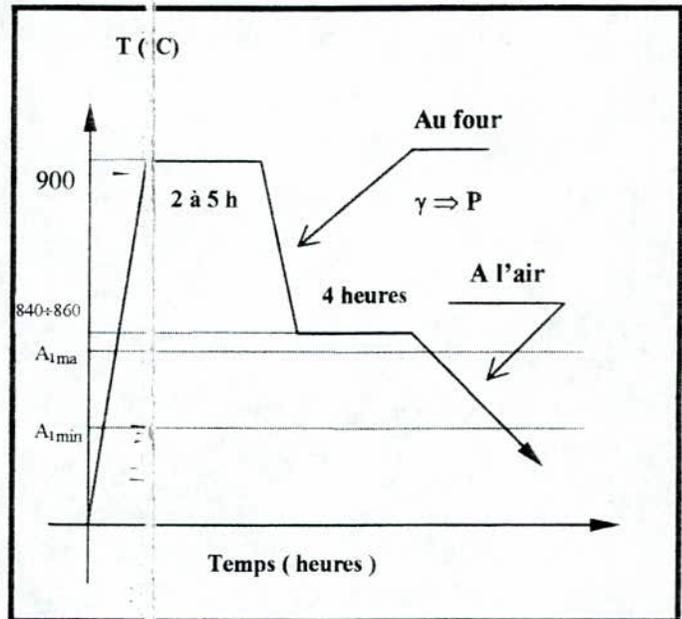


Figure 1.6 : Cycle de perlitisation précédé d'un recuit de malléabilisation

1.1.6 Caractéristiques mécaniques de la fonte

Ces caractéristiques mécaniques et notamment la résistance à la traction n'ont cessé de s'améliorer, toutefois l'allongement et la charge à la rupture restent très faibles en raison de la morphologie du graphite.

On a la résistance à la traction des fontes grises non alliées s'échelonne pour l'ensemble des structures d'une fonte grise de 100 à 400 MPa.

En ce qui concerne la dureté Brinell (HB) des fontes grises, elle est mesurée suivant la norme NF A 03-201.

La dureté des fontes alliées varie dans les proportions très importantes en fonction de la structure (tableau L2) :

Structure	Dureté HB	Observation
Fonte blanche	400 à 550	<i>varie suivant la teneur en carbone</i>
Fonte grise perlitique	170 à 270	<i>varie suivant la finesse de la perlite</i>
Fonte grise ferritique	100 à 150	
Fonte grise bainitique	300 à 400	
Fonte grise martensitique	400 à 500	

Tableau L.2 : Dureté des fontes en fonction de leurs structures

I.2 Frottement et usure

I.2.1 Introduction

Tout mouvement entre deux objets en contact est freiné par une résistance qui limite toutes les formes connues de mouvement est appelé frottement . Comme les deux solides sont en contact , et que ce dernier peut durer dans le temps , on pourra observer une détérioration des surfaces en contact . Cependant , les mécanismes de détérioration de ces surfaces sont souvent de nature très complexes . Deux types de classification ont été énumérées : l'un en fonction du mouvement relatif de base entre les deux solides , c'est à dire glissement , roulement , impact et oscillatoire , l'autre selon les mécanismes d'usure ; ce type de détérioration (usure) sera ultérieurement détaillé .

Les tribologistes apprennent à leurs dépens , que le domaine de la tribologie est interdisciplinaire et fait appel à plusieurs sciences et techniques associées au problème de surface en mouvement .

Dans ce qui va suivre , on détaillera les deux phénomènes ainsi que les différents facteurs qui nous permettront une meilleure approche.

I.2.2 Frottement à sec

Les surfaces réelles ne sont jamais parfaitement lisses . Elles comportent des irrégularités , des aspérités .Le schéma de la **figure I.7** est représentatif de l'état de surface obtenu après une opération d'usinage assez soignée comme le tournage avec des faibles passes . Même si le matériau est poli soigneusement , des aspérités subsistent .

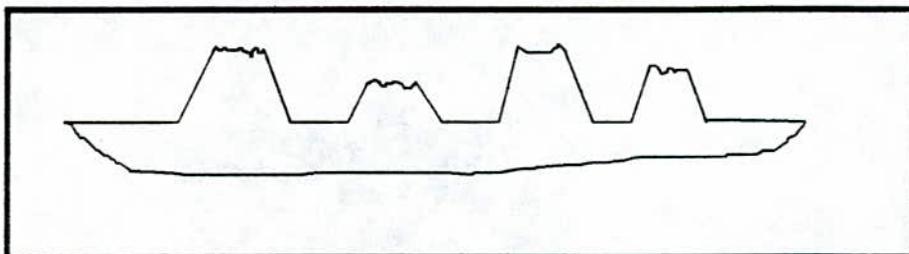


Figure I.7 : Schéma montrant la rugosité d'une surface usinée.

Lors de l'application d'une charge normale "P", le contact s'établit par l'intermédiaire de ces aspérités en un ensemble de zones discrètes. Il se forme ainsi une aire réelle de contact A_r , fraction de l'aire apparente de contact A_a . Cette aire réelle A_r est reliée à la microgéométrie des aspérités.

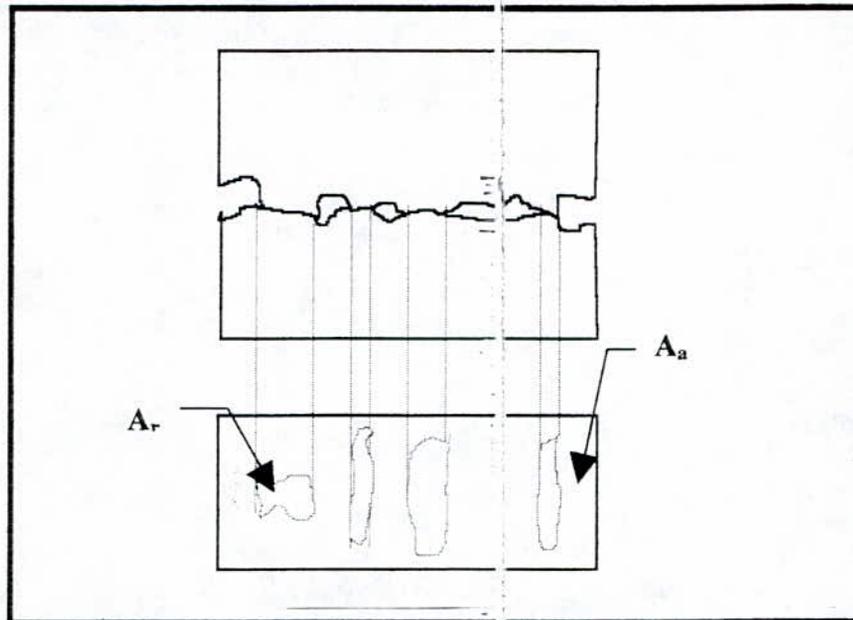


Figure I.8 : Aire apparente A_a et réelle A_r de deux corps réels en contact.

Dans le frottement à sec, on admet que ce sont, au début les aspérités qui créent les forces de frottements, par la suite, le nivellement des surfaces se produisant progressivement. Ce sont également les produits résultants qui agissent par abrasion. Dans le frottement à sec, la force de frottement "F" est proportionnelle à la surface et à la pression unitaire, donc proportionnelle à la charge "P" qui presse les surfaces de contact :

$$F = f * P \Rightarrow f = F / P \quad \text{I.1}$$

"f" est le coefficient de frottement indépendant de la grandeur de la surface.

Selon F.P.BOWDEN [7], dans le frottement à sec, la surface réelle de contact ne présente qu'une portion infime de la surface géométrique. Le contact et la charge appliquée se faisant

par les sommets des aspérités (comme mentionné précédemment) , cette surface réelle de contact est de l'ordre du *dixième de millième* de la surface apparente . Cette surface réelle de contact varie peu avec l'état de surface , mais dépend de la charge au frottement qui permet de niveler les aspérités dans le métal le plus mou qui se traduit par une diminution du coefficient de frottement . Dans le frottement à sec , la température de contact peut atteindre une valeur considérable . Cette température est seulement atteinte à la surface , et la masse reste sensiblement froide d'après **BOWDEN** [7] , ces températures de contact dépendent également de la charge ainsi que de la vitesse .

I.2.3 Usure

L'usure est la perte de masse lors du contact de matière solide subit par une surface frottante. Elle est généralement dommageable , mais peut aussi être bénéfique , par exemple lors du *rodage* [8] .

L'usure est un phénomène complexe , vu le nombre de paramètres qui interviennent en même temps si bien qu'il est impossible de dissocier un paramètre pour l'étudier à part.

C'est en outre un phénomène qui fait intervenir à la fois la mécanique et les propriétés des matériaux.

De nombreuses classifications d'usure existent depuis longtemps [9,10] , les principales sont :

- a – l'usure adhésive.**
- b – l'usure abrasive.**
- c – l'usure corrosive.**
- d – l'usure par fatigue.**

A cela , s'ajoutent des formes secondaires d'usure :

L'usure par délamination , usure par cavitation , usure d'origine électrique etc.....

I.2.3.1 Usure adhésive

La théorie de l'usure adhésive s'est développée dans les années cinquante avec les travaux de **BOWDEN** et **TABOR** [11]. L'usure adhésive est le type d'usure le plus fondamental, elle est due au cisaillement par frottement des microsoudures ou jonctions qui se

forment entre deux aspérités en contact direct et qui sont rompues dans la zone la plus faible, celles-ci entraînent un transfert du matériau le plus mou vers la surface la plus dure.

En effet, sous l'effet des mécanismes de déformations élastique ou plastique des aspérités, les aires des microcontacts sont plus ou moins étendues. Il y a alors contact intime des surfaces avec action des forces d'attraction moléculaire à travers l'interaction. Ces liaisons à l'interface sont à l'origine de la formation adhésive, responsable de l'adhésion des surfaces.

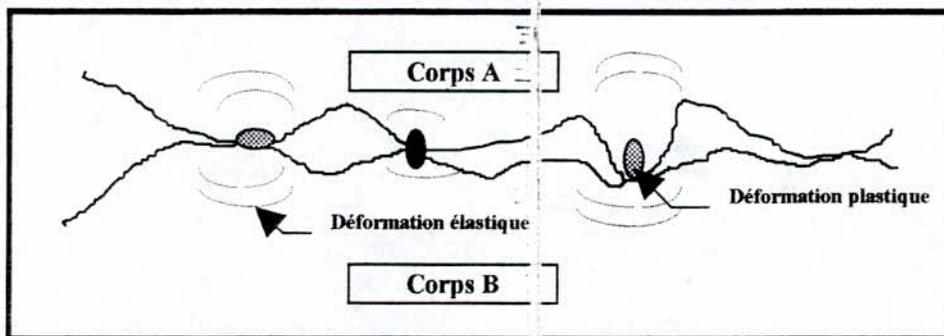


Figure I.9 : Contact de deux corps métalliques.

Le coefficient d'adhésion correspond au rapport entre la force d'adhésion qui se développe entre les surfaces en contact sous une charge normale et la force nécessaire pour séparer ces surfaces :

$$a_a = F_N / F_A$$

Ce coefficient dépend d'une part de la structure et de l'orientation cristallographique des matériaux.

C'est le nombre de systèmes de glissement susceptibles d'être activés par la charge normale qui détermine la déformation plastique et donc la dimension des jonctions où les forces d'adhésion se développent [12].

Plusieurs auteurs ont étudié les mécanismes de formation des débris et le transfert de matière dans le cas de l'usure adhésive.

SASADA [13], a proposé un modèle d'usure basé sur des observations au microscope électronique à balayage des surfaces usées et des débris d'usure.

Dans ce modèle , les débris d'usure sont formés à partir de petites particules produites par cisaillement des jonctions adhésives des aspérités des deux surfaces , ce qui provoque un grossissement des ces dernières par un processus d'accumulation, jusqu'à une taille considérable, puis se détache de la surface d'un choc contre une aspérité de la surface opposée.

I.2.3.2 Usure abrasive

L'usure abrasive se produit lorsque des particules dures rayent une surface . Ces particules peuvent être présentes dans l'interface ou faisant partie intégrante dans l'un des deux corps en présence.

L'usure abrasive pure est caractérisée par l'absence de jonction entre le premier et le deuxième corps et surtout par la formation des rayures sur les surfaces. Ces rayures peuvent être produites par deux mécanismes limites [14] :

- a) **Labourage** : accompagné de déformation plastique, qui dans le cas idéal, ne conduit pas à une perte de matière.
- b) **Micro-usinage** : avec la formation des copeaux. Le cas extrême est celui, où le volume de matière enlevée correspond à celui de la rayure.

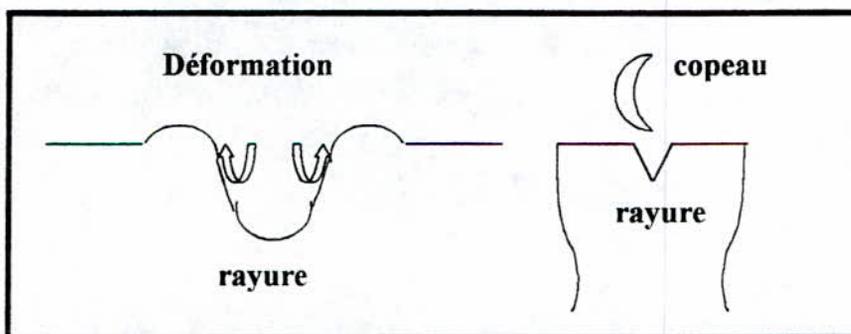


Figure I.10 : Mécanismes de formation d'une rayure sur une surface.

1.2.3.3 Usure corrosive

Ce type d'usure se distingue de l'usure abrasive et l'usure adhésive par le fait que dans le cas de l'usure corrosive, il y a d'abord corrosion de la surface : c'est à dire formation d'un composé sur la surface à partir des *agents corrosifs* contenus dans l'ambiance, après quoi, il y a enlèvement par frottement de ces composés.

Dans la plupart des cas, les produits de corrosion sont plus dures et plus fragiles que les surfaces qui leur ont donné naissance. Alors, le film formé résiste à l'usure tant qu'il sera de très faible épaisseur. Lorsqu'il atteindra une épaisseur critique, le processus d'arrachement par écaillage au frottement se déclenchera et ainsi de suite.

Une combinaison de l'usure abrasive et l'usure corrosive est possible dans la mesure où les composés de la corrosion agissent comme des particules abrasives [15].

1.2.3.4 Usure par fatigue

C'est le type d'usure qui survient après vieillissement par un mouvement cycloïde [16]. D'une façon générale, la manifestation de la fatigue mécanique superficielle est l'apparition de petites fissures ou fractures suivies de débris.

La fissure se développe perpendiculairement à la direction du glissement et prend une forme de 'U' dont la pointe est dirigée dans la direction du frottement [17].

Les fractures apparaissent soit en surface pour le cas des matériaux fragiles, où les contraintes de traction sont maximales, soit à l'intérieur pour les matériaux ductiles où les contraintes de cisaillement sont maximales [18] (voir la figure I.11).

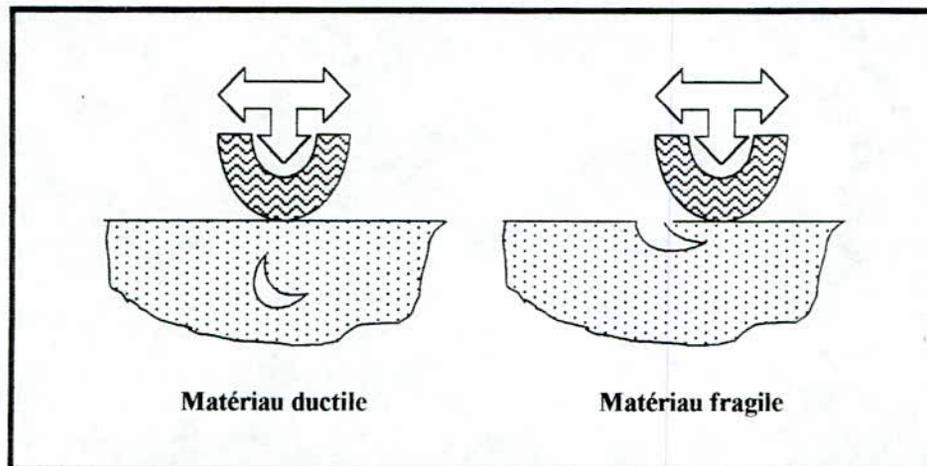


Figure I.11 : Zone d'initiation de la fissure de fatigue.

I.2.3.5 Conséquences de l'usure

I.2.3.5.1 Phénomènes thermiques

Nous avons dit auparavant que lorsqu'on a un mouvement de deux surfaces et selon la vitesse de ce mouvement, on observera un échauffement dans la zone de contact. Cet échauffement est due à l'accroissement considérable de la température dans cette zone. Cette température est la somme de la température ambiante et de deux termes, tous deux dérivés de la chaleur engendrée par le frottement.

Le premier terme est l'accroissement de la température moyenne dans la masse des échantillons, au dessus de la température ambiante. Ce terme est généralement faible devant le second qui est appelé température éclair. La température éclair correspond à un accroissement brutal de la température en un point de la surface en mouvement lorsqu'il est sollicité dans la zone de contact. Cette augmentation brutale provient du fait que toute l'énergie dégagée par le frottement se fait dans un volume de faible capacité thermique. Cette température peut atteindre la température de fusion du corps possédant la plus basse température de fusion.

I.2.3.5.2 Résistance au déplacement

Suivant le mode de mouvement des surfaces de contact, on mesure soit le couple de roulement, de pivotement ou les forces de frottement. Le cas le plus simple étant le glissement. Les forces de frottement sont généralement traduites en coefficients de frottement.

Selon ce coefficient est faible ou élevé , ou qu'il soit constant ou non , on distinguera trois cas :

- le coefficient de frottement faible ou élevé garde une valeur constante et on aura une destruction superficielle faible.
- le coefficient de frottement évolue de façon aléatoire , dans ce cas on assistera à une destruction superficielle importante.
- on distingue le coefficient de frottement dynamique et le coefficient de frottement statique. On assistera à un phénomène de glissement saccadé . Ce phénomène existe en raison de la différence entre les coefficients de frottement statique et dynamique et l'influence du temps de contact sur la force de frottement.

I.2.3.5.3 Variation de masse

Généralement , la perte de masse par usure est fonction du temps et suit l'allure décrite dans la **figure (I.12)** , sur cette figure , on peut distinguer , dans le cas d'un organe de machine , trois parties :

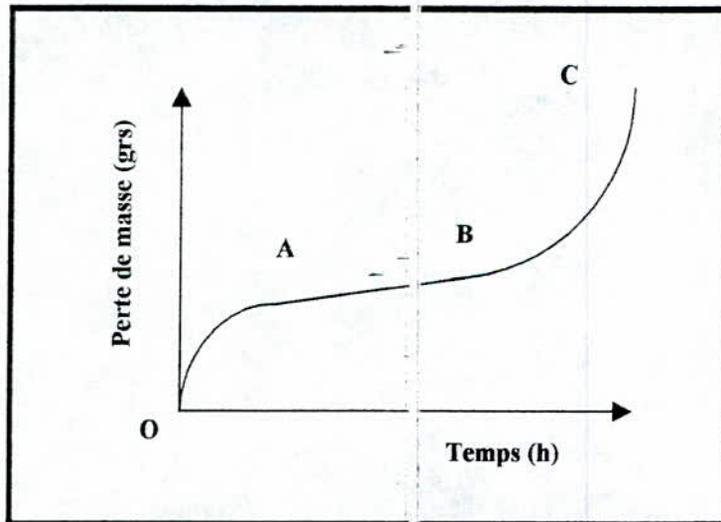


Figure I.12 : Perte de masse en fonction du temps pour un organe de machine.

- **partie (OA)** pendant laquelle l'usure croit rapidement , ce stade est appelé '**Rodage**'.
- **partie (AB)** qui correspond à l'utilisation normale de la machine.
- **partie (BC)** qui correspond au stade final du fonctionnement de notre organe . Sous l'effet de l'augmentation des jeux et des efforts , on assistera à la dispersion des films lubrifiants et à la destruction de l'élément machine.

Généralement, la perte de masse peut être déterminée par mesures pondérables , par mesure dimensionnelles , ou bien , dans le cas d'utilisation d'un lubrifiant par la méthode d'étude de la pollution de celui-ci.

I.2.3.5.4 Transformations géométriques

Comme mentionné précédemment , les surfaces en contact contiennent des aspérités par lesquelles s'établit ce dernier. Sous l'effet de la charge et du frottement , les aspérités microgéométriques sont le siège de déformations élastiques ou plastiques.

Au cour du rodage (accroissement rapide de l'usure) on aura l'amélioration de l'état de la surface microgéométrique car les aspérités seront écrasées ou arrachées .Cependant , et dans certains cas où les débris ne sont pas évacués par exemple, il y a apparition de rayures ,et peut être même des fissures.

I.2.3.5.5 Transformation mécaniques et tribo-chimiques

Les surfaces en contact sont soumises à des contraintes mécaniques et thermiques , dues à la charge et aux changements rapides de températures .Ces contraintes ont pour effet de transformer les matériaux et plus particulièrement les couches superficielles puisque c'est elles qui sont sollicitées. On peut avoir en outre l'apparition de phases qu'il est impossible d'obtenir par d'autre procédés. On observe également des oxydations et des écrouissages.

1.2.3.6 Influence de la charge sur l'usure

a) Influence sur l'usure adhésive

En faisant augmenter la charge à partir de faibles valeurs, on observe fréquemment des variations très rapides du taux d'usure à partir de certaines charges [19].

Ces charges critiques, qui s'accompagnent de changements dans la taille des particules transférées qui sont dues à la destruction des surfaces sous l'augmentation des contraintes, ou à leurs transformations sous l'effet des échauffements superficiels. De nombreux essais ont montré que dans un grand nombre de cas, le volume enlevé 'V' est proportionnel à la charge 'P' et à la distance de glissement 'L' [19]; le volume est donné selon l'équation :

$$V = K * P * L = K_1 * \frac{P * L}{HB}$$

Où :

K, K₁: taux d'usure.

HB: dureté Brinell

D'après le seuil de la charge critique, on pourra distinguer deux modes d'usure, en dessous c'est l'usure modérée, en dessus, c'est l'usure sévère.

b) Influence sur l'usure abrasive

Plusieurs travaux ont été effectués dans ce sens, ont conduit à la même observation : la perte de masse est une fonction linéaire croissante avec la charge [19]. Cependant, pour les fortes charges, ce constat n'est plus valable car les particules abrasives s'enfoncent trop profondément dans le frotteur, ce qui entraîne la diminution de l'usure abrasive du frotteur.

I.2.3.7 Influence de la vitesse sur l'usure

I.2.3.7.a Influence sur l'usure adhésive

L'effet le plus important de la vitesse sur l'usure adhésive , est d'agir sur la température superficielle , la température maximale atteinte sera celle du métal qui a le plus bas point de fusion.

Cette augmentation de la température aura pour effet :

- création de points chauds qui permettent d'accroître la réactivité des surfaces et des produits d'usure vis à vis du milieu environnant et aussi favoriser les réactions d'oxydation qui peuvent se produire au cours des glissements dans l'air.
- favoriser par la température élevée , la diffusion d'une pièce dans l'autre et la formation d'alliages à l'interface.
- accroître l'importance des changements structuraux , du fait des chauffages et refroidissements rapides .
- produire à haute température , des fusions des zones superficielles.

I.2.3.7.b Influence sur l'usure abrasive

Dans l'usure abrasive , la vitesse a pour effet ,d'augmenter la perte de masse légèrement avec l'augmentation de celle-ci. Cet accroissement de la perte de masse est imputé à une baisse des caractéristiques mécaniques sous l'effet de l'échauffement.

DEUXIEME CHAPITRE
TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Techniques expérimentales

II.1 Elaboration des fontes :

Pour élaborer les deux nuances, G.S.C et G.S.A à l'état brut de coulée, l'unité de fonderie de Rouiba dispose de deux fours à arc, d'une capacité de 20 tonnes et trois fours à induction de 10 tonnes appelés "fours de maintien".

Le procédé d'élaboration se présente comme suit :

La fusion des matières se fait au four à arc.

Le lit de fusion est constitué de charges indiquées au tableau ci dessous :

Fonte FGS	Retour de fonderie (tonnes)	Fonte de 1 ^{ère} fusion (tonnes)	Tôle d'acier doux (tonnes)
		6.5	1.5

Tableau II.1 : Différents constituants du lit de fusion.

Après la fusion et le décrassage qui nécessitent une durée de deux heures, la fonte liquide est transférée par des poches aux fours de maintien dans lesquels s'effectuent les corrections pour les deux nuances, en carbone, en silicium et en manganèse. Les composants utilisés sont :

- graphite
- ferro-silicium (80 % de Si)
- Ferro-manganèse (60% de Mn)

Le **tableau II.2** montre les fourchettes de composition des fontes admises à l'U.F.R et les valeurs données dans ce tableau sont en pourcentage de poids. Notons que la dénomination G.S.A et G.S.C n'est qu'une normalisation interne aux unités UFR et pas normalisation internationale).

	C	Si	Mn	S	P	Mg	Cu	C _E
G.S.C	3,5 à 3,8	2,4 à 2,8	0,2 à 0,5	< 0,002	< 0,1	0,04	< 0,05	4,3 à 4,7
G.S.A	3,5 à 3,8	2.4 à 2.8	0.6 à 0.9	< 0.002	< 0.1	0.04	< 0.05	4.3 à 4.7

Tableau II.2 : Fourchette de composition des fontes admises à l'UFR.

II.2 Analyse chimique

Juste après la coulée de nos moules, on procède à la coulée d'une petite médaille de 4.5 cm de diamètre et de quelque millimètre d'épaisseur.

Cette médaille nous servira à l'analyse chimique de notre fonte.

L'appareil utilisé pour cet effet est le quantomètre à émission optique 34000 produits par la firme *Applied Reserches Laboratories* (**figure II.1**). Cette technique d'analyse quantitative s'effectue par bombardement de la médaille par un faisceau de rayon X. Ceci nous permet d'obtenir un spectre caractéristique des éléments. A travers l'intensité de ces spectres, le spectromètre relié à un logiciel donne les pourcentages de chaque élément.

Pour ce qui est de l'analyse chimique du carbone , elle s'effectue par un chauffage à 1200°C par induction de deux grammes de copeaux métalliques suivit d'un passage d'un flux d'oxygène permettant d'obtenir le dioxyde de carbone , après dosage de ce dernier, le taux de carbone est affiché.

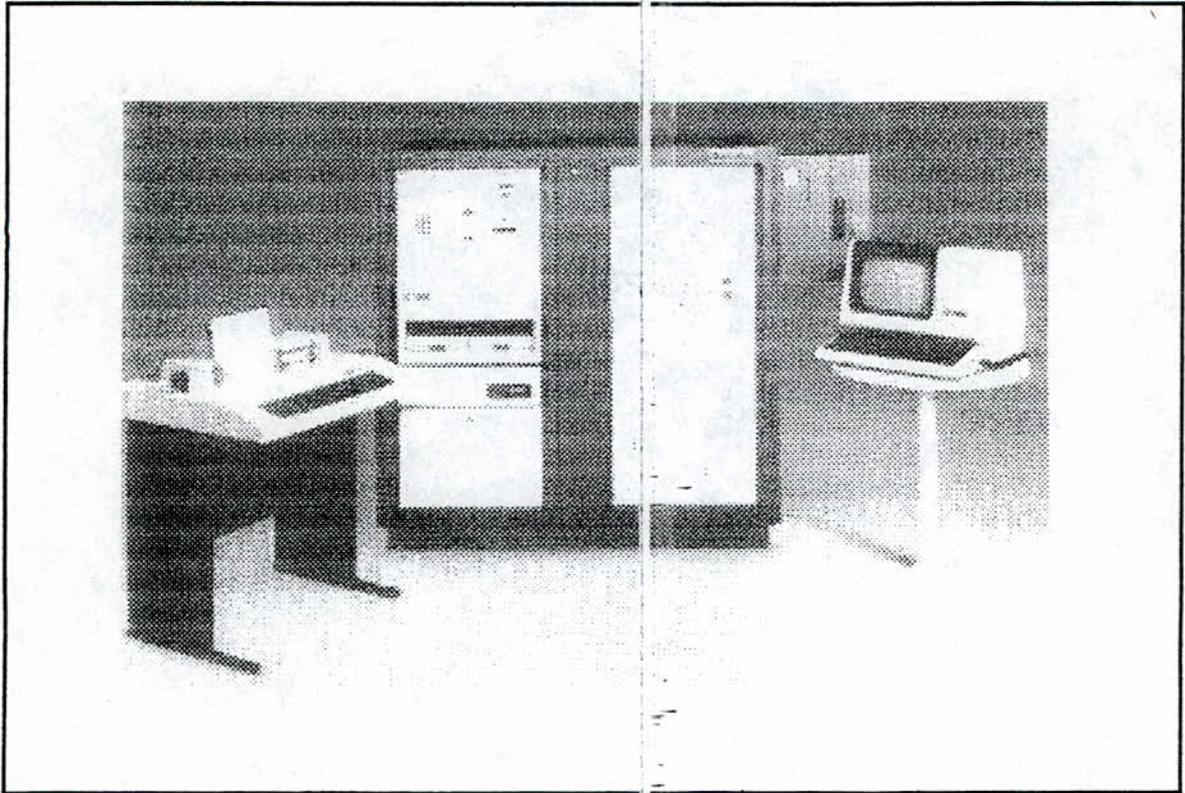


Figure II.1 : Quantomètre à émission optique 34000-ARL.

II.3 Préparation des échantillons à l'UFR

Pour les besoins de notre étude expérimentale sur l'usure, nous avons réalisé deux tôles épaisses en fonte G.S.C et deux cylindres creux en fonte G.S.A.

La confection et la coulée des moules sont effectuées à l'atelier de coulée de l'UFR, unité moulage main et la coulée à l'atelier de fusion à l'U.F.R. C'est à ce niveau que se fait la différence entre La G.S.A contient moins de Mn que la G.S.C.

Les dimensions des plaques et cylindres sont définies sur la figure suivante :

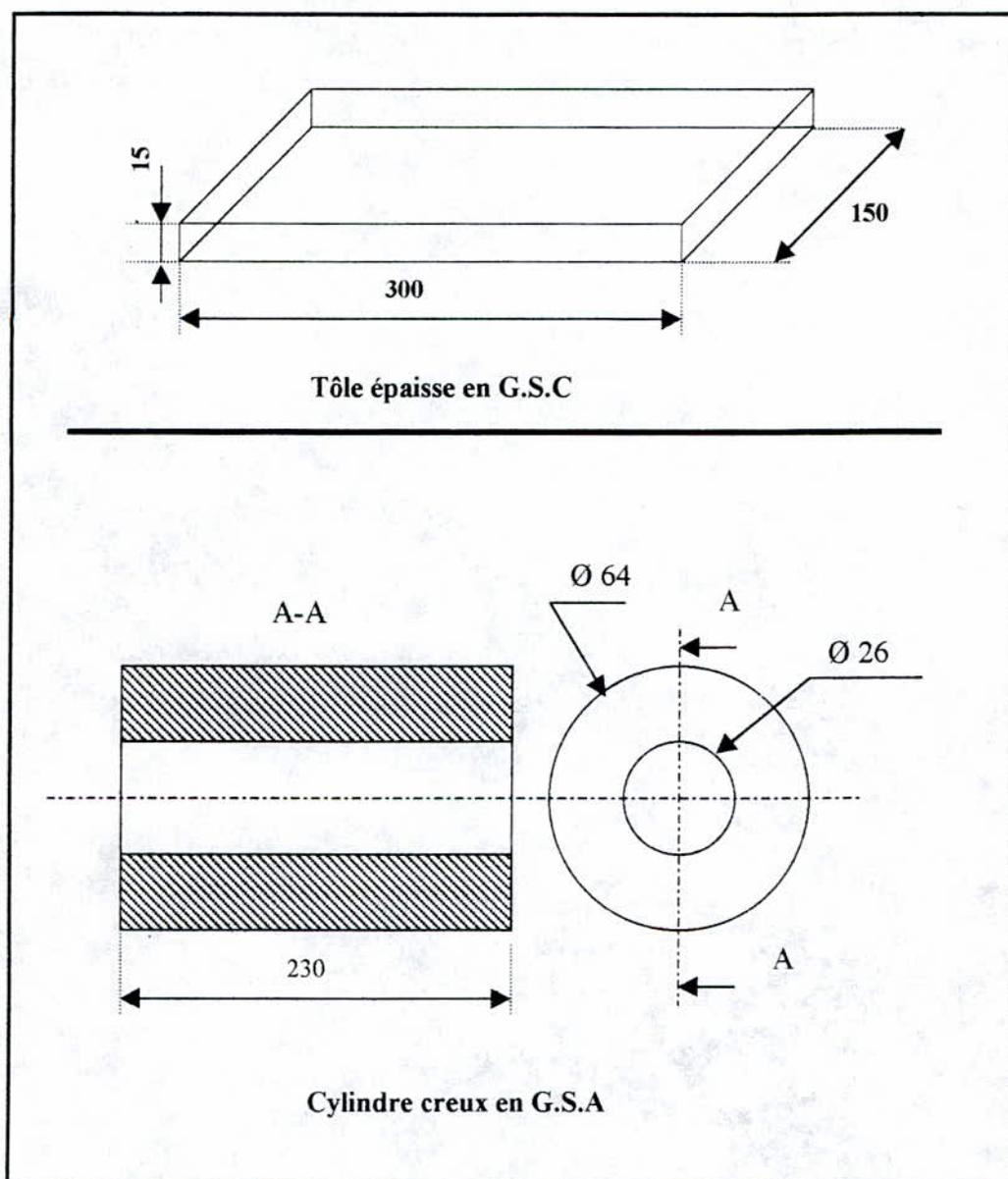


Figure II.2 : Dimensions des pièces brutes de coulées.

Après l'obtention des plaques et des cylindres, nous procédons au découpage de nos échantillons aux dimensions désirées ($18 \times 15 \times 23$)mm (**figure II.3**). Le découpage s'est fait dans le laboratoire de contrôle à l'aide d'une scie à ruban.

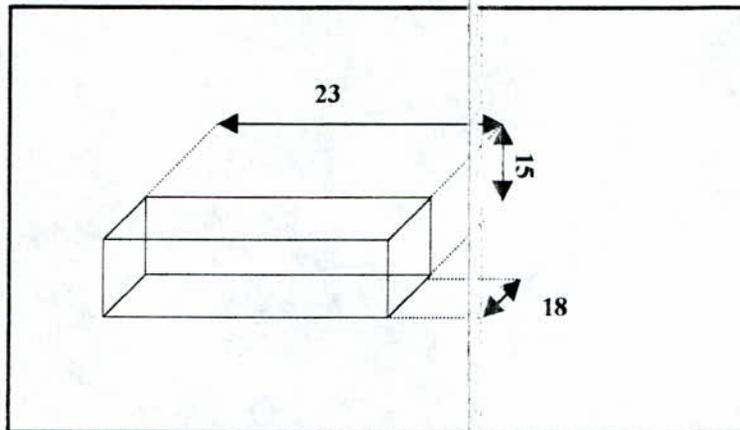


Figure II.3 : Echantillon après découpage.

II.4 Micrographie

Pour pouvoir observer les différentes structures des deux nuances avant et après traitement thermique, on procède premièrement à un surfacage sur une meule pour enlever la couche décarburée. On fait ensuite un polissage avec des papiers abrasifs dans l'ordre croissant (200, 400, 600, 800, 1000, 1200). Pour la finition, on utilise la pâte diamantée répartie à l'aide d'un feutre sur le disque.

Les différentes microstructures sont mises en évidence par attaque chimique au **Nital** (5% acide nitrique + 100 ml d'alcool méthylique). Les observations sont réalisées sur un microscope optique de marque "**Zeiss Axiovert 100 A**".

II.5 Four de traitement

Le four utilisé pour le traitement thermique est de la marque «**Sybron – Thermolyne**» pouvant atteindre une température de 1400°C et ayant les dimensions suivantes : (20 x 20 x 40) cm.

La tolérance de ce four est $\pm 5^{\circ}\text{C}$ qui peut être acceptable pour notre étude.

II.6 Essai de dureté

L'essai de la dureté Brinell consiste à imprimer dans les échantillons de différentes structures une bille en acier de diamètre 'D' sous une charge 'F' et à mesurer le diamètre de l'empreinte à l'aide d'une loupe.

La dureté est donnée par :

$$HB = \frac{0.102 \times 2 \times F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

d = diamètre moyen de l'empreinte en mm.

D = diamètre de la bille en mm.

F = la force appliquée en N.

La machine utilisée est de marque " **Wolpert** ".

II.7 Mesure des rugosités et présentation des profils de surface

Pour la mesure de la rugosité pour chaque échantillon, on a utilisé un "**Perthometer S6P**". Cet appareil, travaille sous une tension de 220 volts et une fréquence de 50 Hz.

L'exploitation de cet appareil est entièrement digitale, l'avantage de ce *perthometer*, c'est qu'il peut mémoriser le profil relevé et son archivage. Cet appareil offre les meilleures performances de mesures et la disposition la plus claire des commandes. Différents programmes relatifs à différents types de profils sont mémorisés dans ce perthometer, et après avoir choisit le profil désiré, on procède à la mesure.

Cet appareil consiste à explorer le relief de la surface grâce à un palpeur.

On se contentera dans ce qui suit, d'expliquer le profil qu'on a utilisé ainsi que les informations complémentaires relatives à ce dernier.

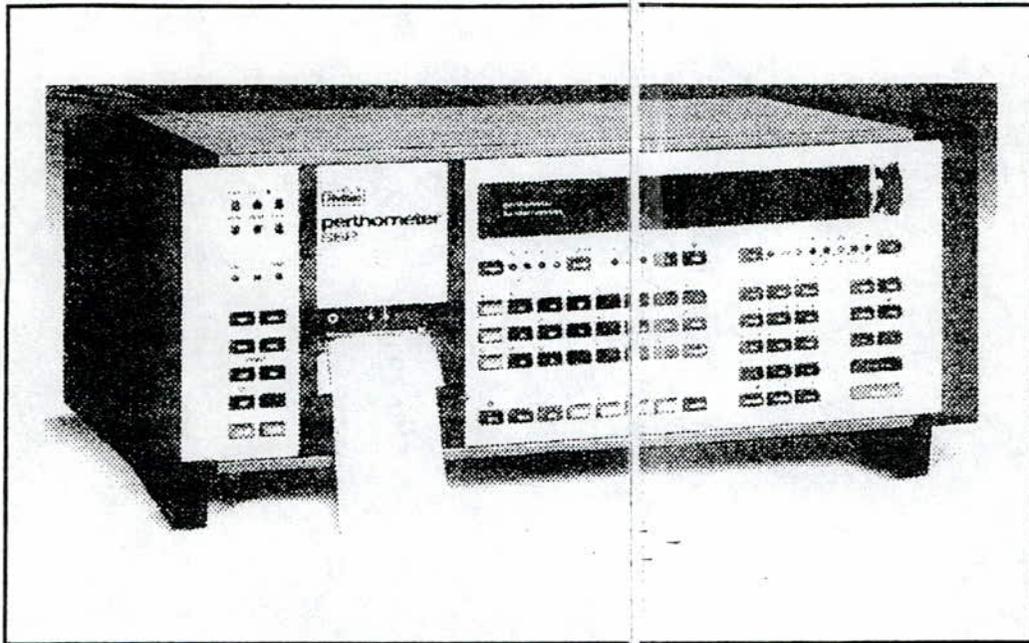


Figure II.4 : Perthometer S6P.

Le profil utilisé, est le profil de rugosité 'R', il montre toutes les variations du profil par rapport à la ligne médiane, comme montré sur la figure ci-dessous :

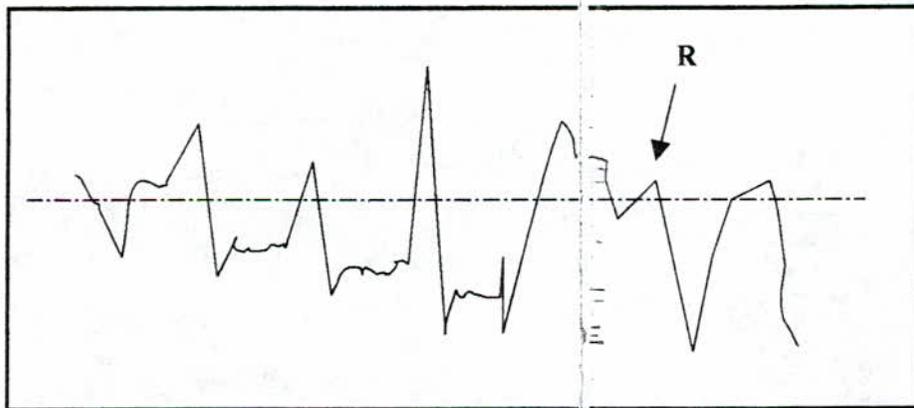


Figure II.5 : Profil de rugosité 'R'.

Pour ce profil, les informations complémentaires qu'on peut avoir sont :

$$R_a, R_T, R_z, R_{max}$$

- **Rugosité moyenne 'R_a'**

C'est la moyenne arithmétique de toutes les valeurs du profil de rugosité 'R', sur la longueur d'évaluation 'l_m', donnée par l'équation suivante :

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y| dx$$

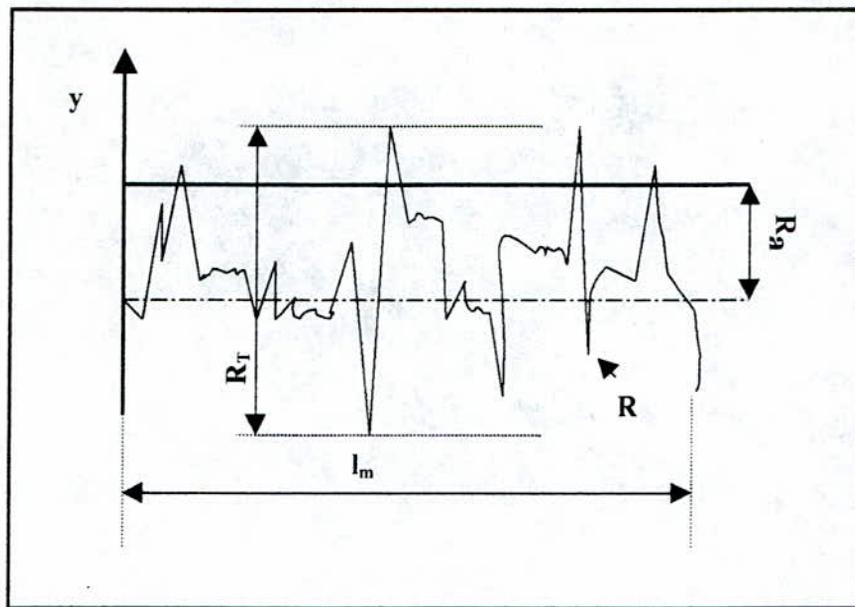


Figure II.6 : Schéma illustrant R_a et R_T.

- **Rugosité maximale 'R_T'**

C'est l'écart vertical entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil de rugosité 'R', sur la longueur totale d'évaluation l_m (voir la figure précédente).

- **Rugosité moyenne 'R_z'**

C'est la moyenne des profondeurs de rugosité de cinq zones d'évaluations successives 'l_e', on peut voir cela sur la figure ci-après :

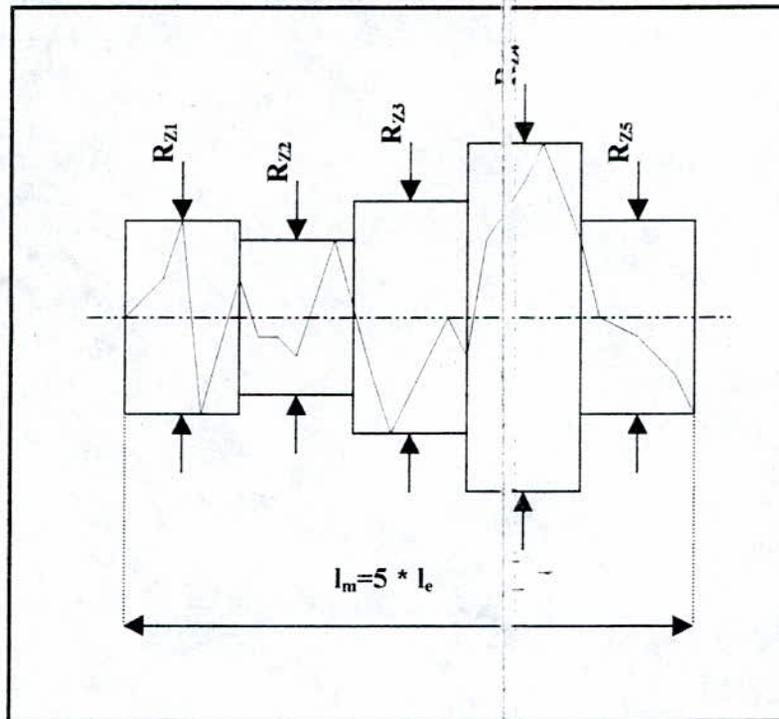


Figure II.7 : Rugosité moyenne R_z .

Cette rugosité est donnée par l'équation suivante :

$$R_z = \frac{1}{5} (R_{z_1} + R_{z_2} + R_{z_3} + R_{z_4} + R_{z_5})$$

- **Rugosité maximale ' R_{max} '**

C'est la plus grande rugosité isolée à l'intérieur de la longueur d'évaluation ' l_m ' par exemple, si on se réfère à la **figure II.7**, alors : $R_{max} = R_{z4}$.

A la fin de la mesure, nous aurons les résultats imprimés sur du papier aluminium. la disposition de ces résultats sera comme indiquée sur la figure suivante :

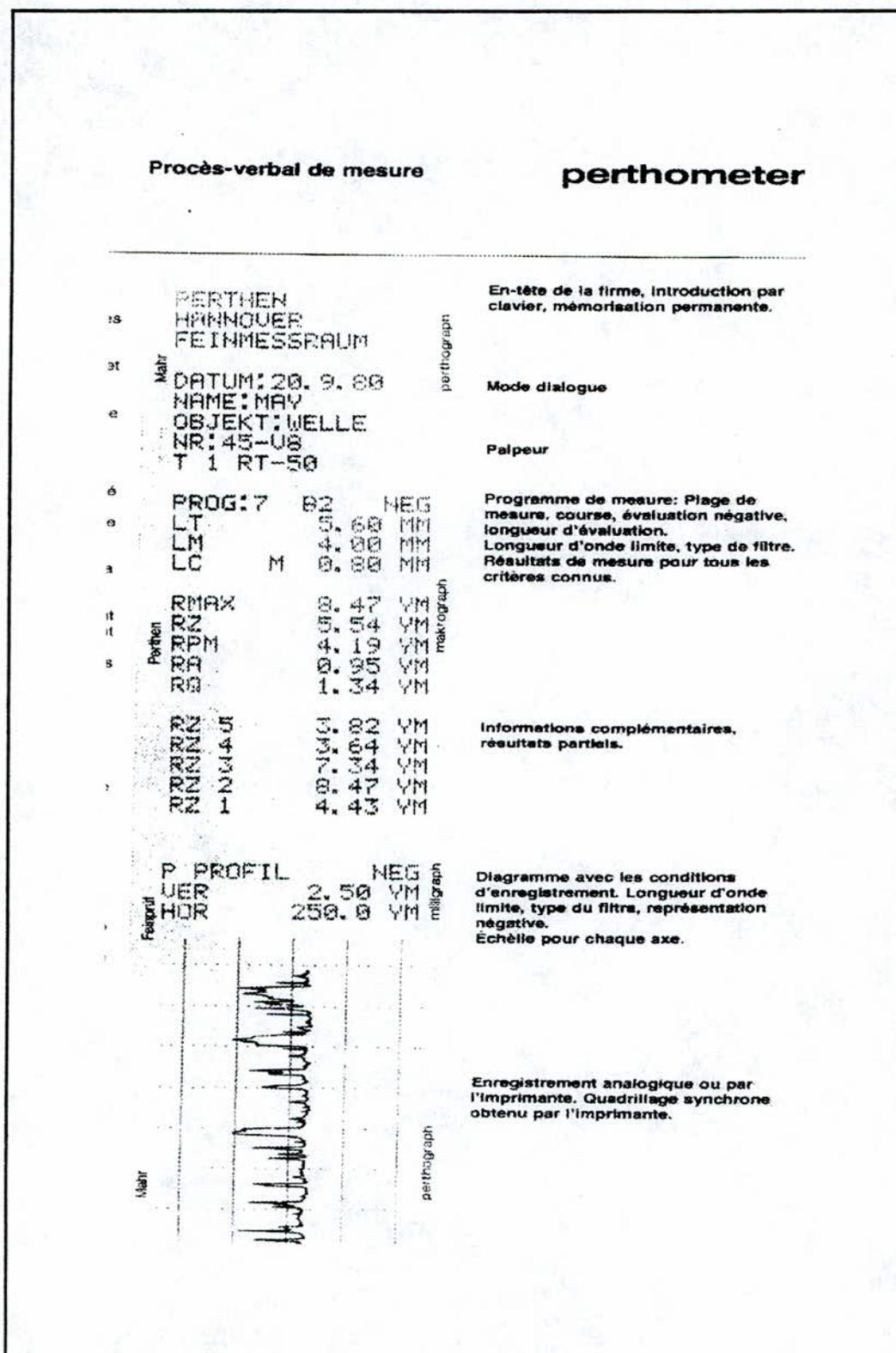


Figure II.8 : Exemple du procès verbal de mesure.

II.8 Dispositif expérimental de l'essai d'usure

La machine sur laquelle nous avons effectué nos essais d'usure, possède une avance certaine en matière de simplicité et de commodité de fonctionnement. En effet on a effectué des modifications sur un tour à chariotier.

- **Fiche technique du tour :**

TOUR A CHARIOTER ET FILETER H. ERNAULT-SOMUA CHOLET 435	
Vocation	Chariotage et filetage
Diamètre maxi au-dessus du banc	435 mm
Distance entre pointes	1000 mm
Vitesses de broche (trs/mn)	32 jusqu'à 1600
Puissance du moteur	7,5 kW

Sur la machine, on fait monter un arbre, sur lequel est fixé le cylindre en G.S.A traité. Ce dernier, a été le siège d'une liaison complète (arbre / cylindre) : pour éradiquer le degré de liberté de rotation, on avait recours à un clavetage, tandis que pour les translations axiales, elles sont éliminées grâce à des vis de pression, du type H₂ (*hexagonal creux*). Evidemment, les quatre degrés de liberté, sont éliminés grâce à la pénétration cylindrique (**figure II.9**). L'arbre est fixé, grâce à un montage mixte, c'est à dire d'un côté sur le mandrin, pour assurer son entraînement en rotation, de l'autre coté avec la poulie mobile. Grâce à une pénétration conique, et un montage serré, les problèmes de flexion de l'arbre sont évités et les conditions de travail sont sécurisées.

La principale modification, portait essentiellement, sur le porte – outil. En effet, le porte – outil, nous servira de porte échantillon, c'est à dire qu'il fixe les échantillons qui feront l'objet de la sollicitation en usure.

Pour l'application de la charge, on a opté pour un système hydraulique, qui consiste en un cylindre étanche, constitué de deux pistons, dont leurs limites, constituent la chambre qui contient de l'air compressé issu d'un compresseur dont les deux pistons (**figure II.10**) sont prolongés par :

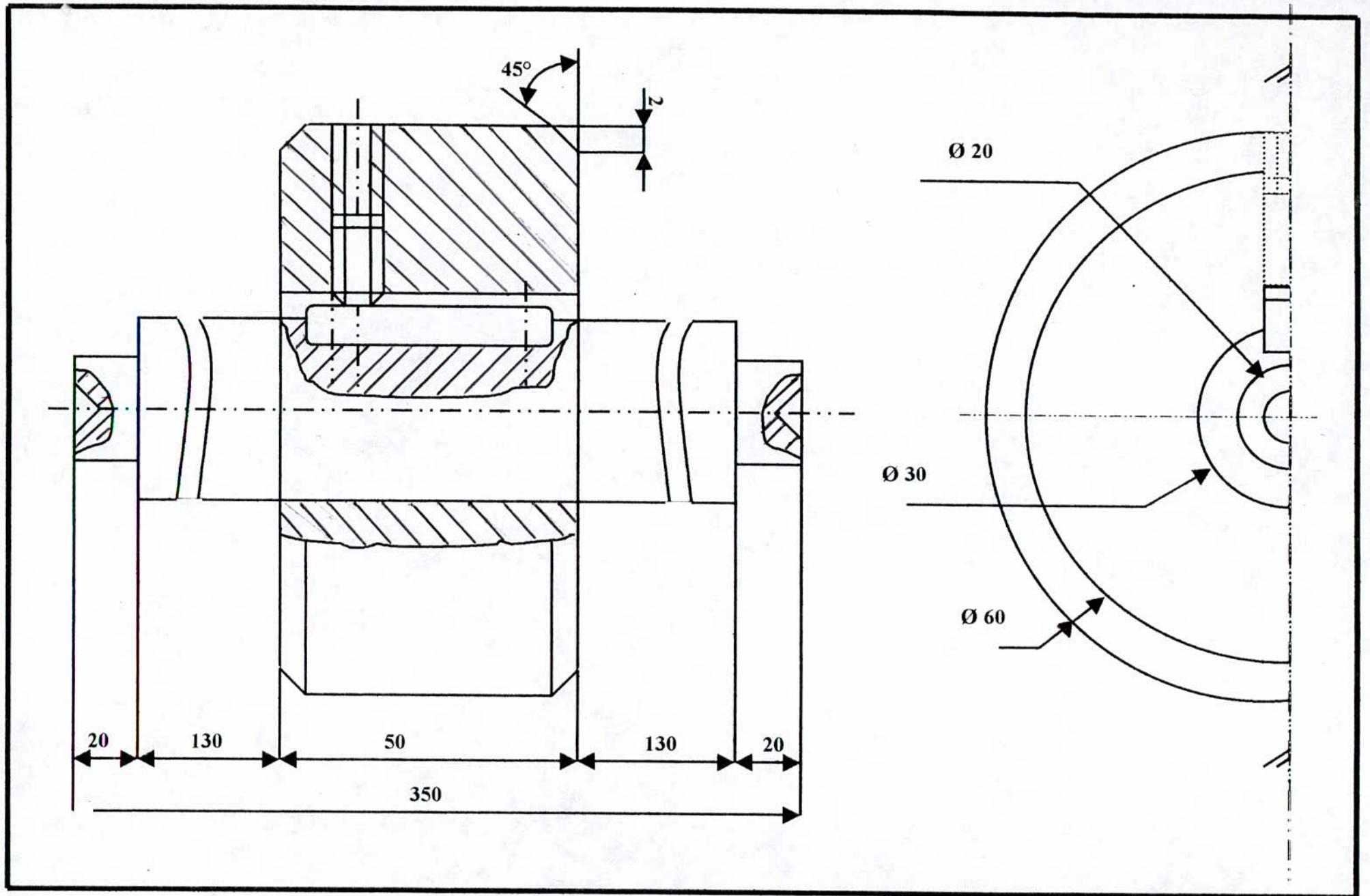


Figure II.09 : Arbre en liaison complète avec le cylindre .

- Une manivelle, qui servira pour l'annulation de la charge, en faisant tourner la manivelle, de telle sorte à faire inclure un trou communiquant à l'extérieur, au niveau de la chambre de compression. Le guidage en translation, est assuré par un système vis-écrou.
- Un disque, qui transmet la charge au porte - échantillon, qui, à son tour la transmettra à l'échantillon (qui est solidaire avec ce premier comme le montre la **figure II.11**).

Le porte - outil, était en liaison complète avec un guidage en translation par une glissière, ainsi que des boulons : en absence de ces derniers, le porte - outil (qui sera un porte - échantillon), pourra coulisser et guidé en translation. Le système hydraulique sera par contre, fixé dans la même glissière, et agit sur le porte - échantillon.

L'air comprimé sera introduit (par un compresseur) à travers un trou. A proximité du trou d'introduction d'air, un manomètre est fixé, afin de pouvoir régler la charge désirée.

Notons que le système hydraulique, nous offre une simplicité pour les manipulations et aussi uniformiser l'effort.

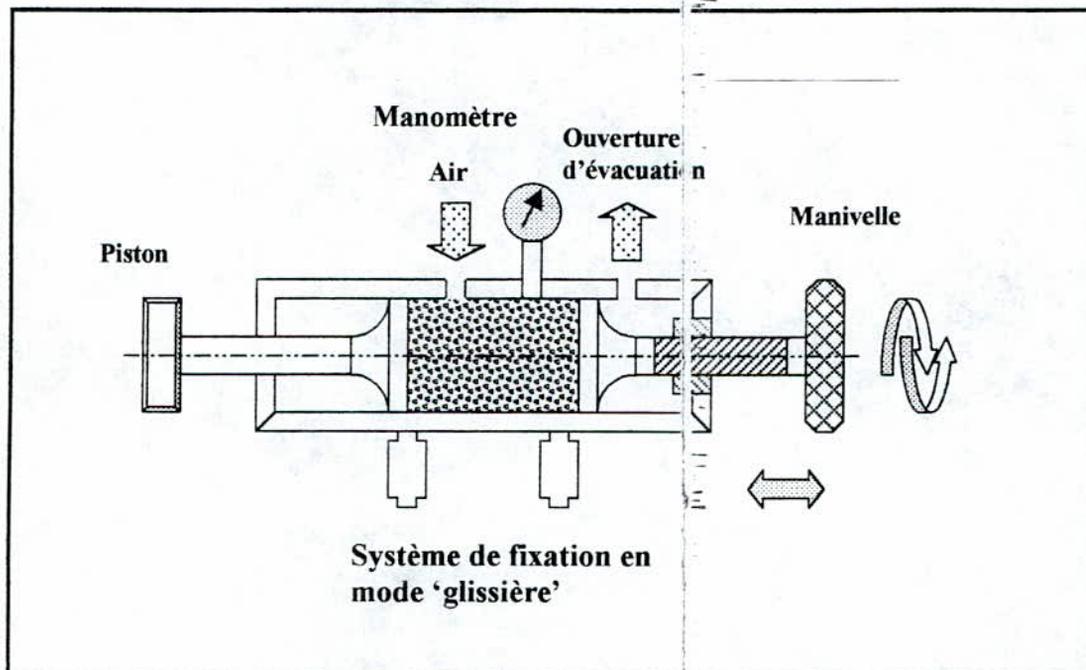


Figure II.10 : schéma du système hydraulique.

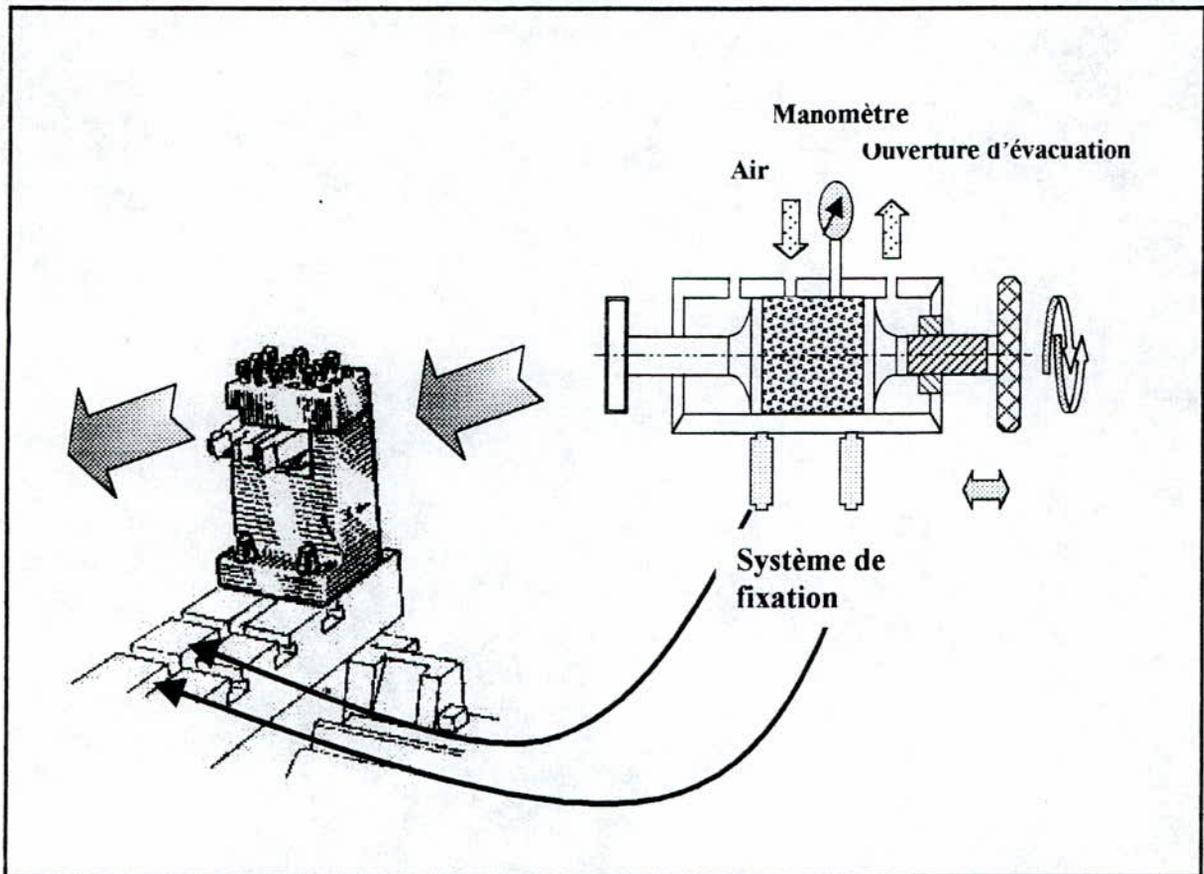


Figure II.11 : Disposition du système hydraulique par rapport au porte – outil.

Le schéma fonctionnel suivant (voir **figure II.12**) décrit avec précision le rôle de chaque partie dans le tour.

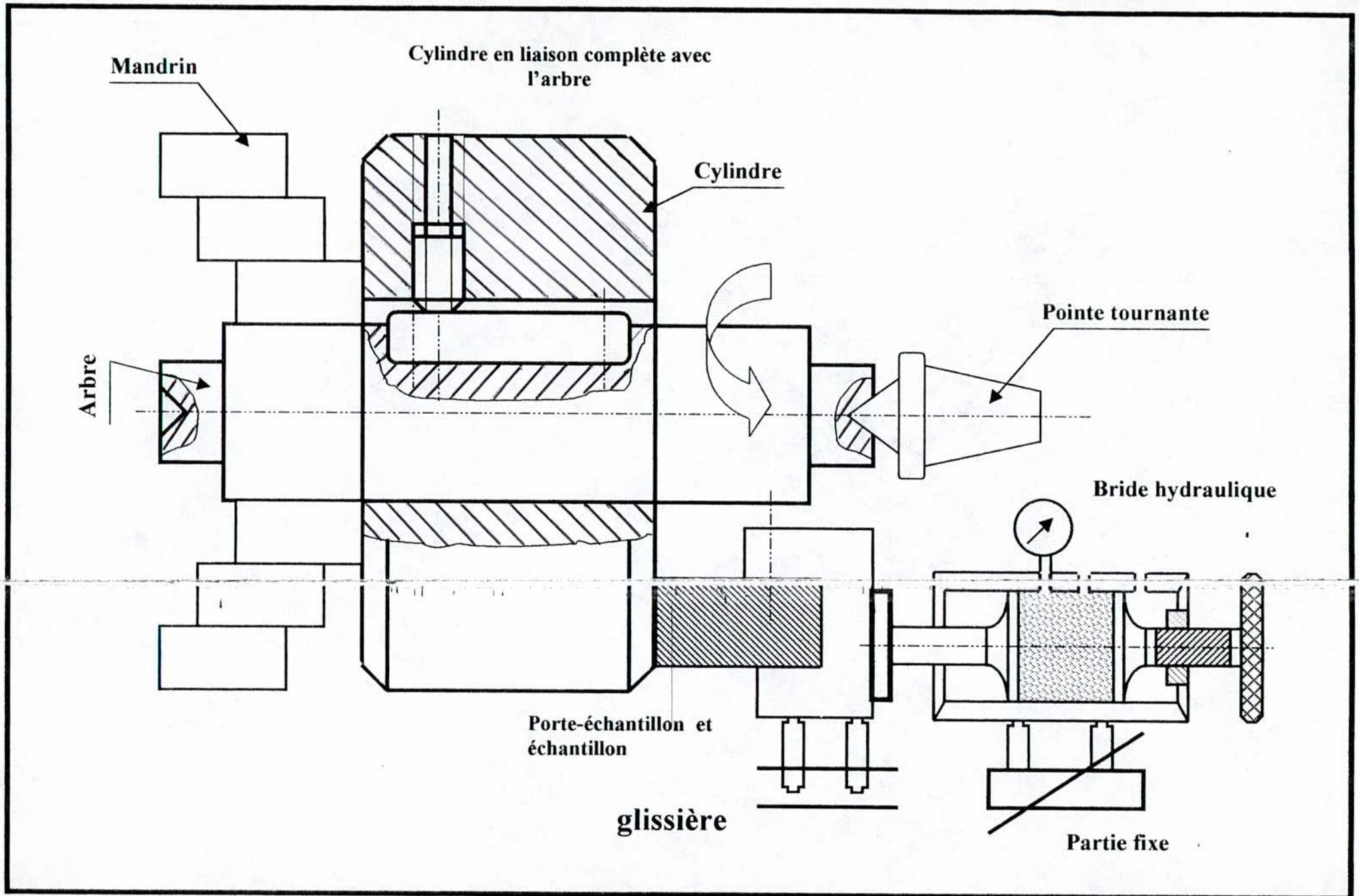


Figure II.19 : Schéma fonctionnel

TROISIEME CHAPITRE
RESULTATS ET INTERPRETATIONS

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Dans ce chapitre , on présentera nos résultats ainsi que les interprétations et commentaires qui en découlent dans l'ordre suivant :

- caractérisation de l'état brut de coulée.
- traitements thermiques de recuit.
- Profilométrie avant essais d'usure.
- profilométrie après essais d'usure.
- essais de dureté.

III.1 Caractérisation de l'état brut de coulée

III.1.1 Analyse chimique

L'analyse chimique des deux nuances considérées s'est faite sur une médaille comme cité dans le chapitre II . Pour obtenir des résultats plus précis, nous avons effectué deux analyses sur la même médaille pour la G.S.C, et deux analyses sur une deuxième médaille pour la G.S.A, et puis, on a effectué une moyenne. Le résultat obtenu en effectuant la moyenne des essais sera plus représentatif de la composition chimique de notre matériau car il tient compte des hétérogénéités et aussi du phénomène de ségrégation. Les résultats sont représentés sur le **tableau (III.1)** pour la nuance G.S.C et sur le **tableau (III.2)** pour la nuance G.S.A.

	C	Si	Mn	S	P	Mo	Cu	Al	Pb	Ceq
Analyse'1	3,67	2,59	0,36	0,020	0,063	$>4^E-3$	0,186	0,009	0,01	4,55
Analyse'2	3,67	2,69	0,36	0,016	0,061	$>3^E-3$	0,193	0,01	0,012	4,59
Moyenne	3,67	2,64	0,36	0,018	0,062	0,003	0,189	0,01	0,011	4,57

Tableau III.1 : Analyse chimique de la nuance G.S.C utilisée (en % poids).

	C	Si	Mn	S	P	Mo	Cu	Al	Pb	Ceq
Analyse '1'	3,54	2,73	0,76	0,084	0,066	0,005	0,120	0,017	0,015	4,50
Analyse '2'	3,54	2,77	0,80	0,019	0,062	0,004	0,214	0,015	0,017	4,46
Moyenne	3,54	2,75	0,78	0,058	0,064	0,005	0,212	0,016	0,016	4,48

Tableau III.2 : Analyse chimique de la nuance G.S.A utilisée (en % poids).

C_{eq} représente le carbone équivalent et il est donné par la formule suivante :

$$\%C_{eq} = \%C + (\%Si + \%P)$$

III.1.2 Observation micrographique

L'observation des échantillons des deux fontes étudiées G.S.A et G.S.C a été effectuée après polissage, sans attaque chimique, la structure révélée ne comprend que la morphologie du graphite. Nous avons effectué une observation après attaque au Nital, pour mettre en évidence la structure, dans les deux nuances, on constate la présence du graphite sous forme sphéroïdale (**figure III.1**). La fonte G.S.C présente un graphite sphéroïdal, avec une matrice ferritique et une présence d'un faible taux de perlite (**figure III.2**). La fonte G.S.A présente un graphite sphéroïdal avec une matrice perlito-ferritique. La ferrite se trouve sous forme auréolaire autour du graphite, et son taux est moins important que dans la fonte G.S.C (**figure III.3**).

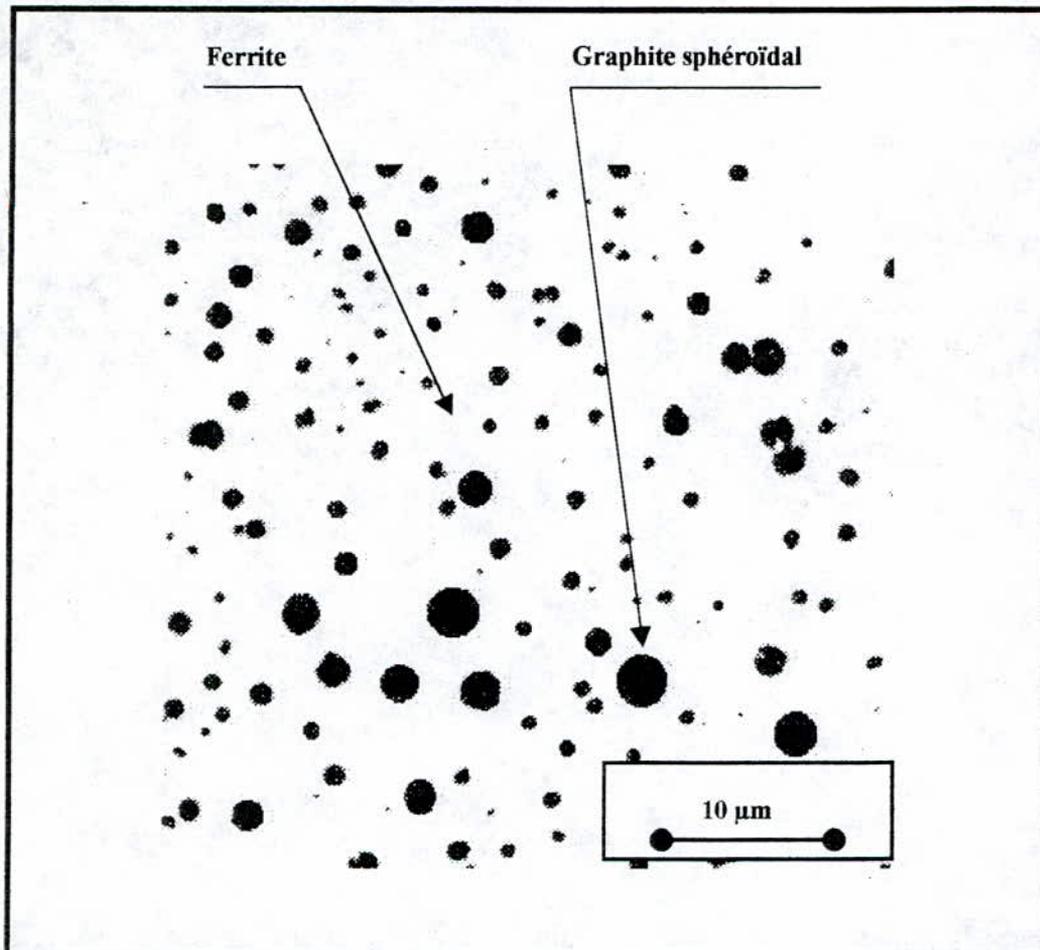


Figure III.1 : Morphologie du graphite dans les deux nuances, GSA et GSC.

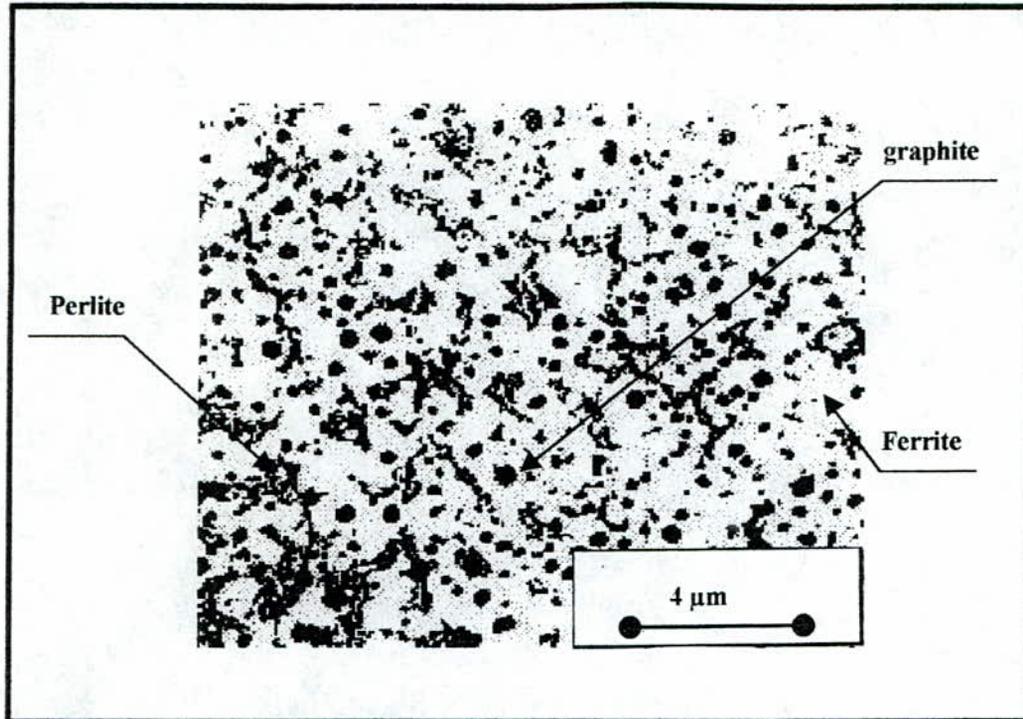


Figure III.2 : Fonte G.S.C à l'état brut de coulée.

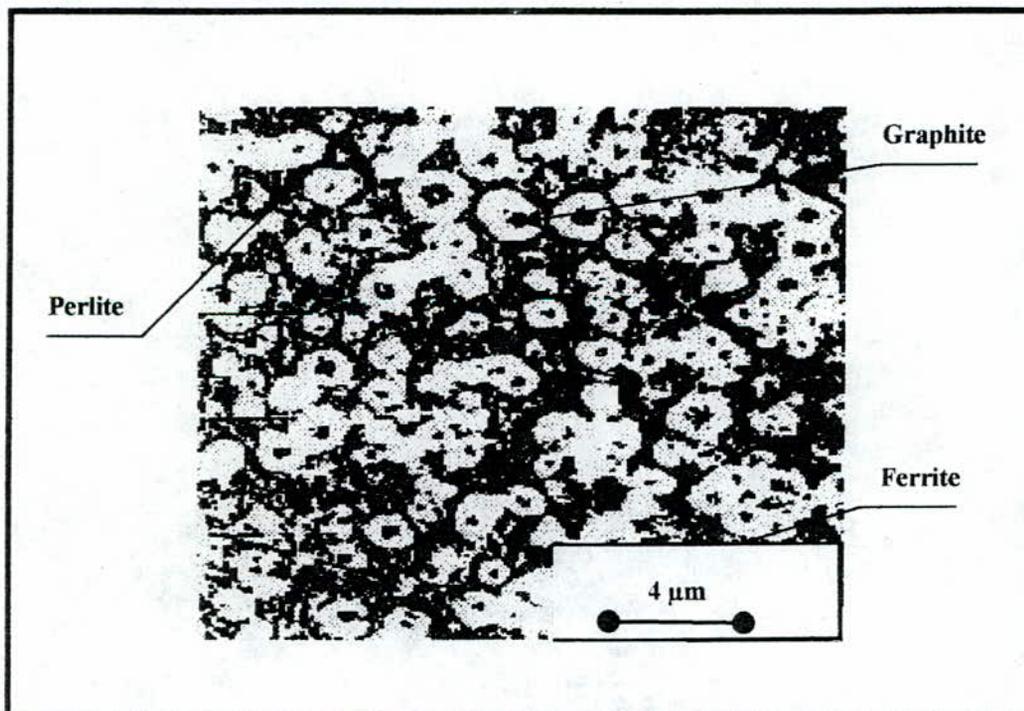


Figure III.3 : Fonte G.S.A à l'état brut de coulée.

III.2 Traitements thermiques

Pour réaliser des traitements thermiques réussis, la connaissance du domaine de la bande triphasée ($\alpha + \gamma + G$) est indispensable. Ainsi, nous avons effectué des traitements thermiques sur la fonte G.S.C pour faire varier le pourcentage en phases existantes en variant les temps de maintiens dans un four à moufles.

Pour la fonte G.S.A on a opté pour une trempe à l'huile. Le chauffage a été effectué dans un four industriel sous atmosphère exothermique pour éviter toute décarburation superficielle.

III.2.1 Traitement thermique de la fonte G.S.C

III.2.1.1 Traitement de perlitisation

D'après l'étude bibliographique et la connaissance de la bande triphasée, nous avons choisi une température de traitement de 850°C .

Cependant, et pour faire varier le taux de perlite formée, nous avons effectué des maintiens avec des durées variables suivies d'un refroidissement à l'air.

Le cycle de traitement de cette fonte (G.S.C) est représenté sur la **figure III.4**.

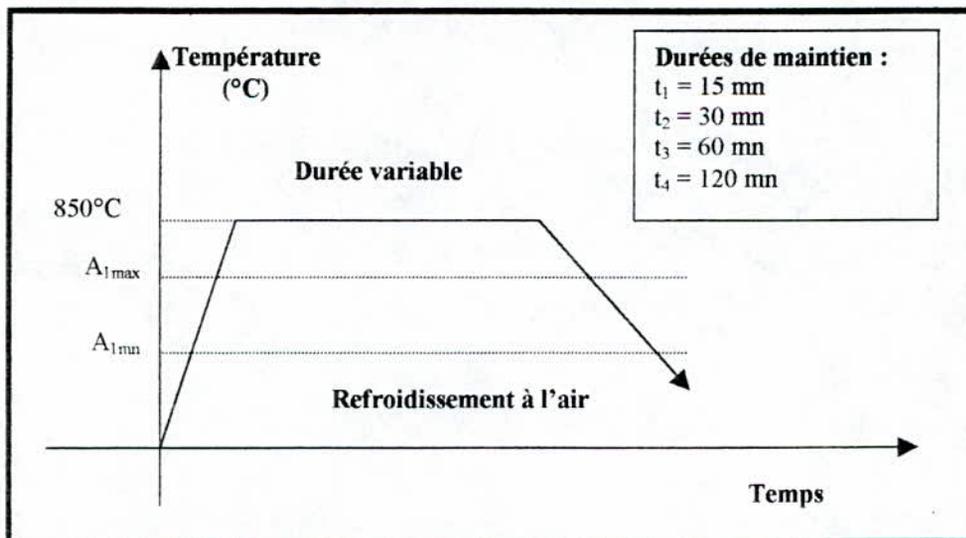


Figure III.4 : Cycle de perlitisation de la fonte G.S.C.

III.2.1.2 Traitement de ferritisation

Pour la fonte G.S.C, nous avons opté pour un recuit de ferritisation indirecte et cela en s'appuyant sur des travaux déjà effectués [5]. Ainsi , on a effectué ce type de traitement avec des durées de maintiens variables suivis d'un refroidissement à l'air libre.

Le traitement effectué est représenté sur la **figure III.5**.

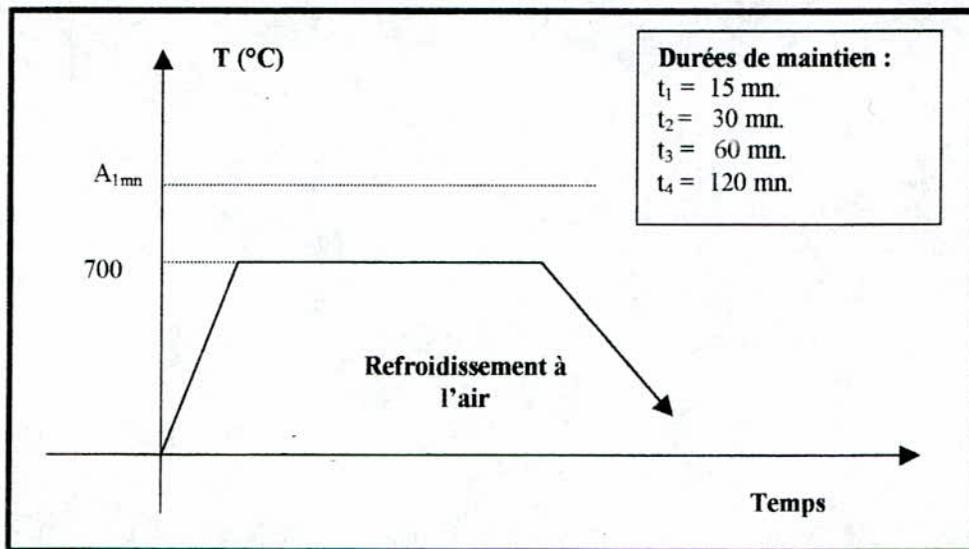


Figure III.5 : Traitement de ferritisation indirecte pour la fonte G.S.C.

III.2.2 Traitement thermique de la fonte G.S.A

Le traitement qu'on a effectué sur les cylindres en G.S.A est une trempe en atmosphère exothermique à la température de 870 °C et un temps de maintien d'une heure, cette trempe a été effectuée dans un bain d'huile chaude à 100°C.

On a opté pour une trempe en bain chaud et non froid pour éviter les défauts que peut engendrer une trempe en bain froid, à savoir les tapures de trempe, les fissures , etc.....

Pour les besoins de la trempe, on a utilisé une huile du type **S8230** ayant un point éclair de 223 °C.

Après avoir effectué la trempe, on procédera à un revenu de détente à 200 °C pendant deux heures. Le but de ce revenu étant de relaxer les contraintes formées (consécutivement à cette trempe), car ce revenu ne fait pas abaisser la dureté d'une manière considérable.

Le cycle thermique effectué sur les cylindres en fonte G.S.A est représenté sur la **figure III.6** suivante :

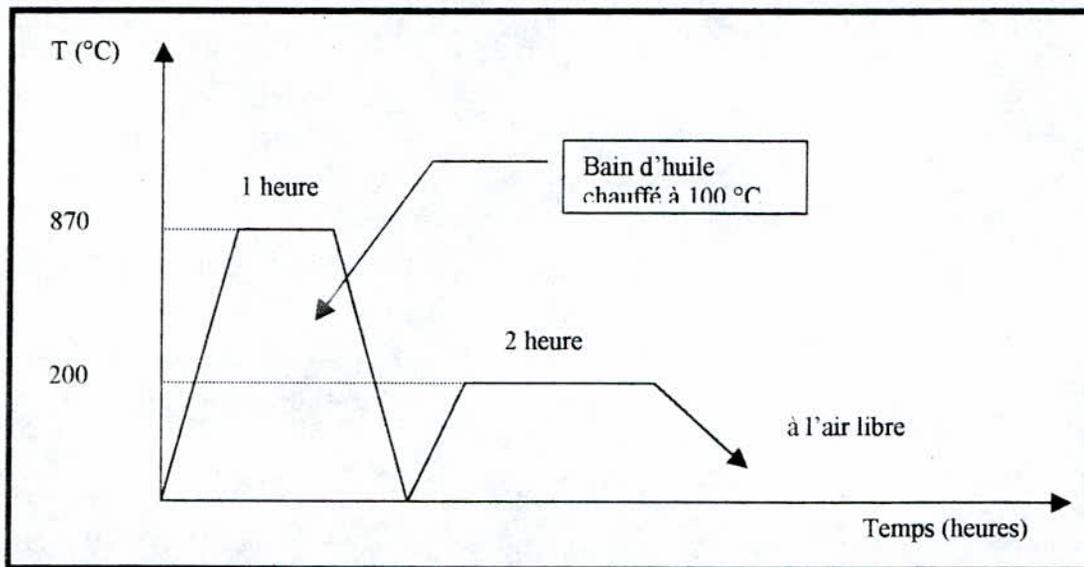


Figure III.6 : Traitement de trempe suivi d'un revenu pour la fonte G.S.A.

III.2.3 Observation métallographique après traitement

Les structures obtenues après traitement sont représentées sur les figures suivantes III.7 ,8 , 9 , 10 , 11 , 12 , 13 , 14 :

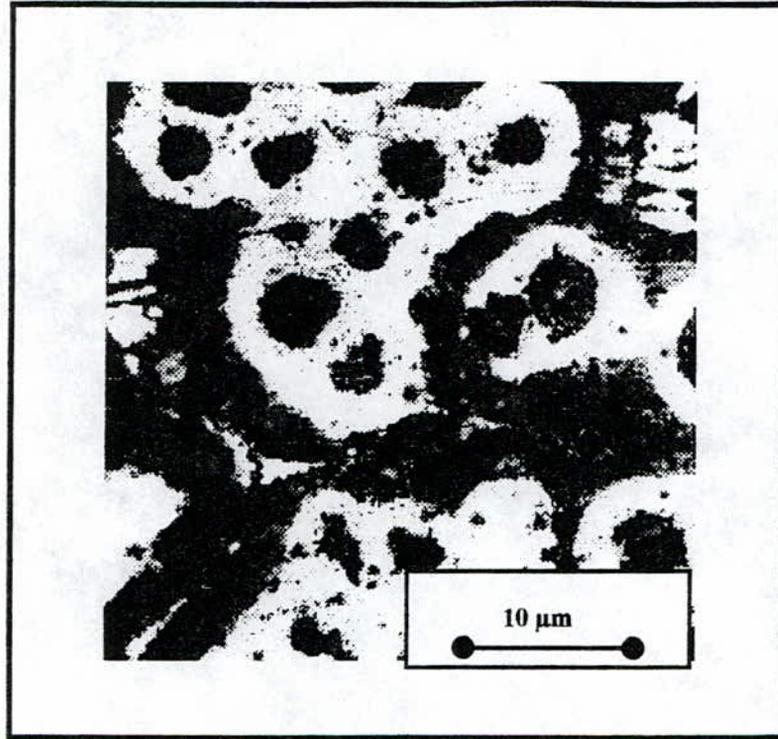


Figure III.7 : Fonte G.S.C après traitement de perlitisation ($T = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_1 = 15\text{ mn}$).

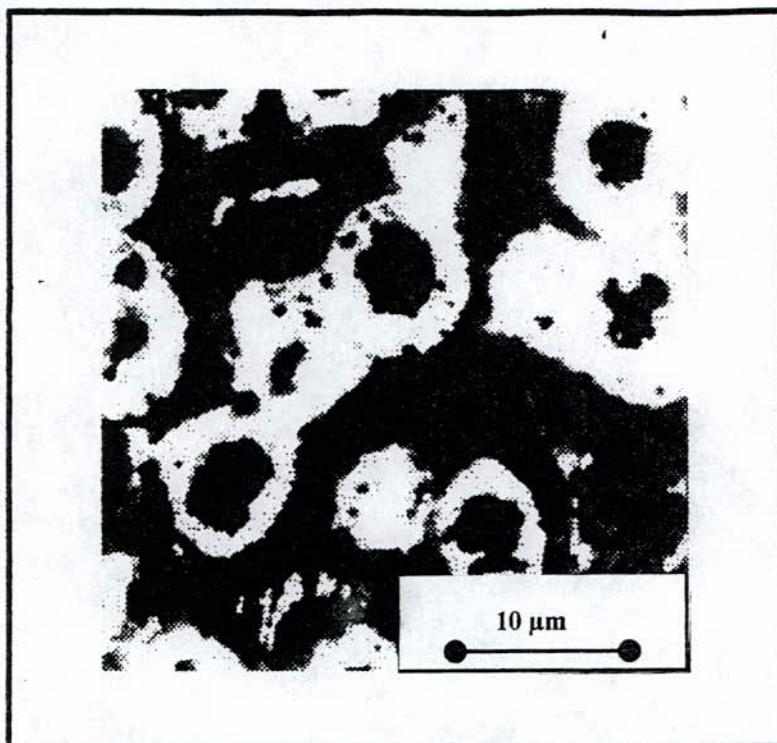


Figure III.8 : Fonte G.S.C après traitement de perlitisation ($T = 850\text{ °C}$, $t_2 = 30\text{ mn}$).

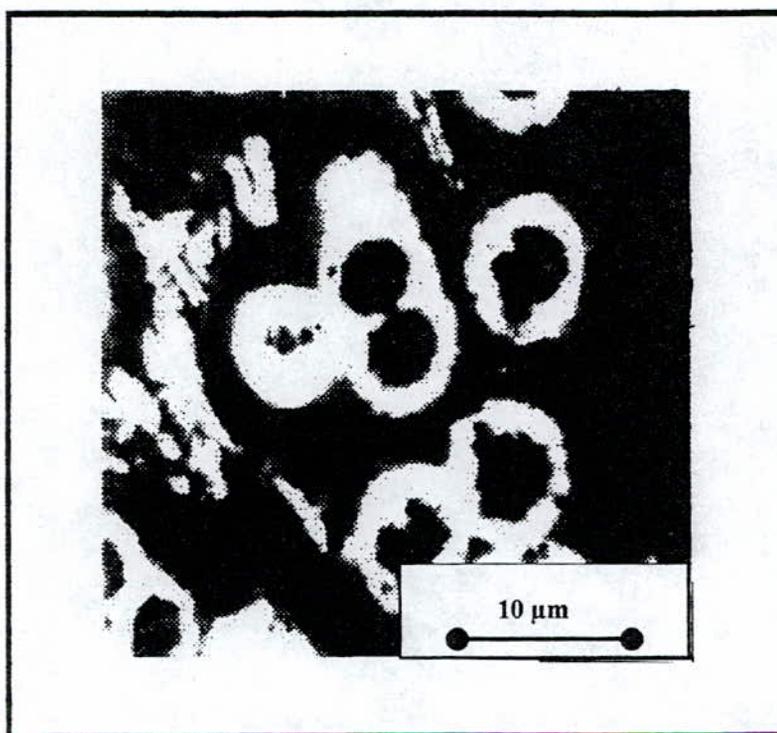


Figure III.9 : Fonte G.S.C après traitement de perlitisation ($T = 850\text{ °C}$, $t_3 = 60\text{ mn}$).

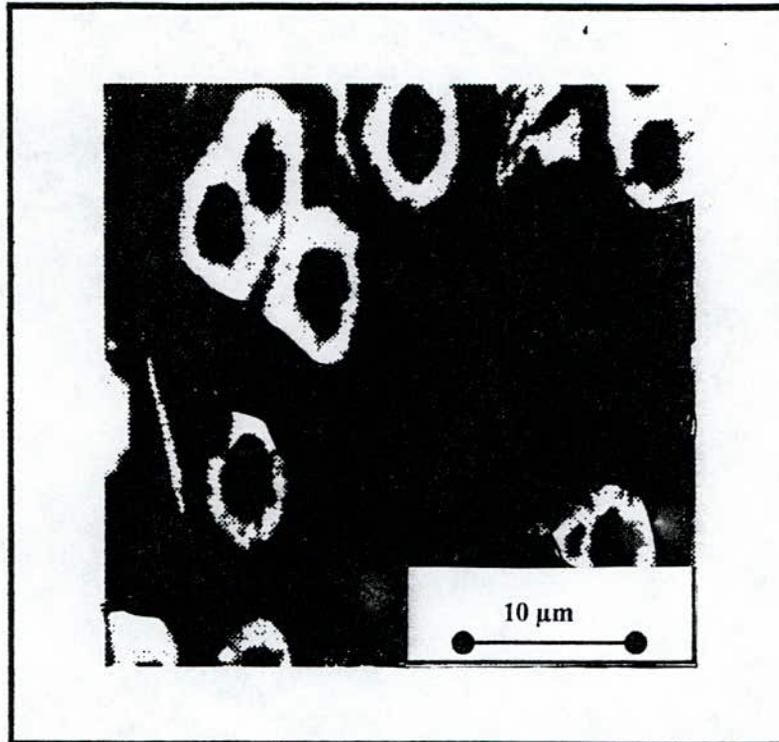


Figure III.10 : Fonte G.S.C après traitement de perlitisation ($T = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_4 = 120\text{ mn}$).

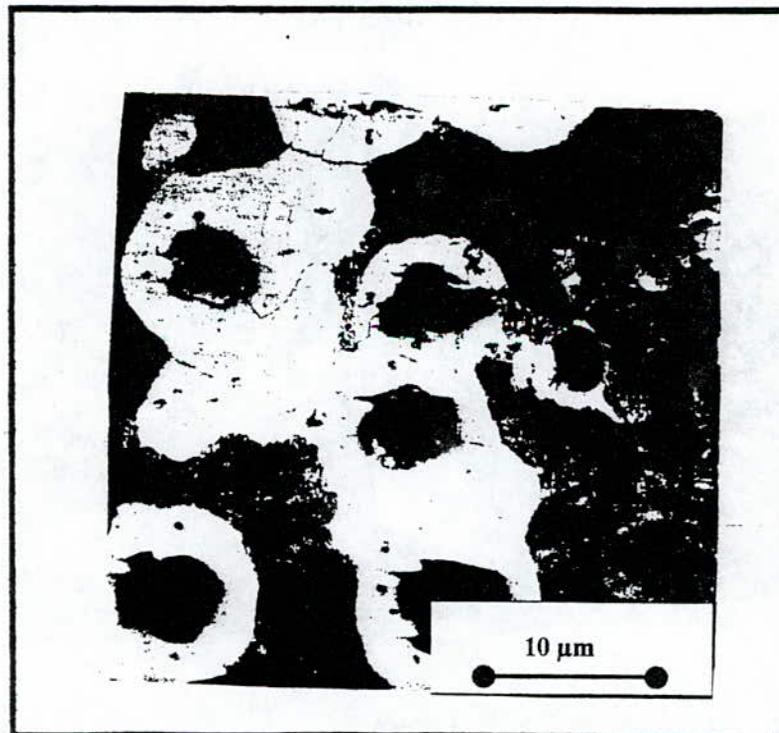


Figure III.11 : Fonte G.S.C après traitement de ferritisation indirecte ($T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t'_1 = 15\text{ mn}$).

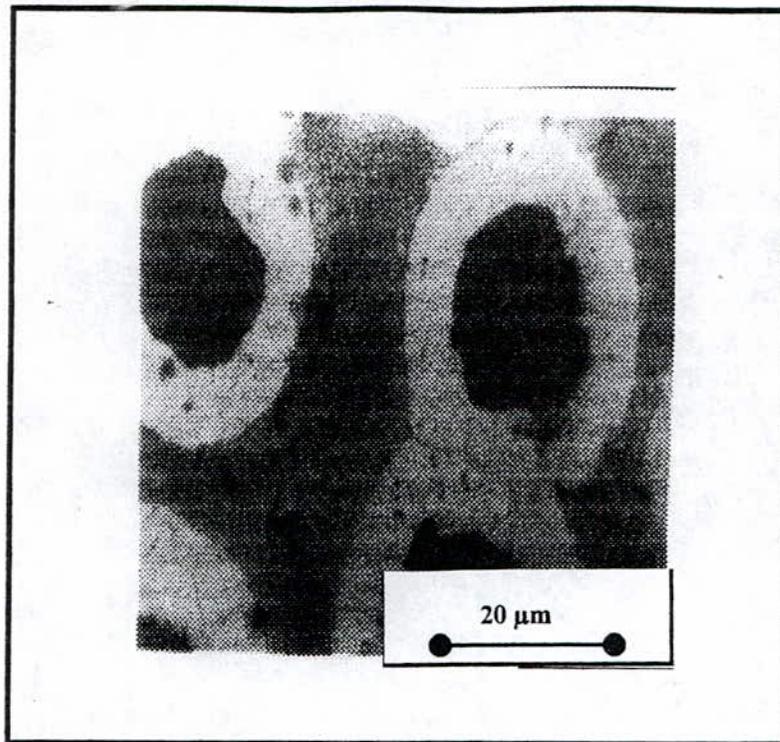


Figure III.12 : Fonte G.S.C après traitement de ferritisation indirecte ($T = 700\text{ °C}$, $t'_2 = 30\text{ min}$).

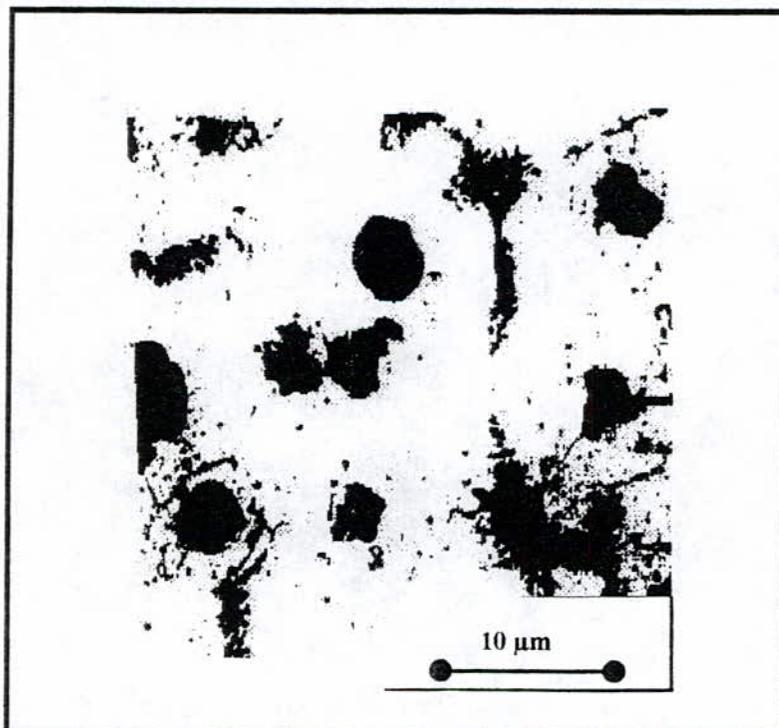


Figure III.13 : Fonte G.S.C après traitement de ferritisation indirecte ($T = 700\text{ °C}$, $t'_3 = 60\text{ min}$).

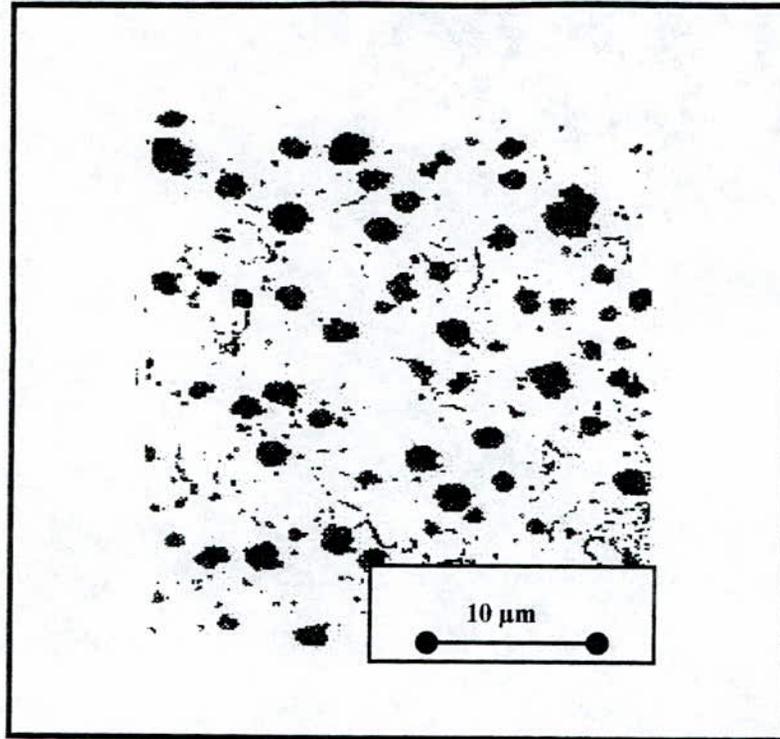


Figure III.14 : Fonte G.S.C après traitement de ferritisation indirecte ($T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t'_4 = 120\text{ mn}$).

On peut constater que les grossissements des micrographies , concernant les traitements de ferritisation indirecte ne sont pas les mêmes , ceci a pour but de montrer la nature de la perlite générée par ce traitement , qui est une perlite globulaire observée sur la **figure III.12**. La formation de ce type de perlite est une caractéristique principale du traitement de ferritisation indirecte.

III.3 Profilométrie avant l'essai d'usure

Pour pouvoir effectuer une comparaison avec l'état de surface après l'essai, on a choisi un échantillon de chaque groupe, donc on aura 08 échantillons et pour que la comparaison soit possible, il faut que ces échantillons subissent tous les mêmes conditions d'essai à savoir la charge et la vitesse.

III.3.1 Notation des échantillons

On identifie un échantillon par la notation suivante :

$$X_{a-b}$$

- X : correspond au type de traitement subi par l'échantillon, on mettra 'F' si c'est une ferritisation, un 'P' si c'est une perlitisation.
- a : représente le temps de maintien, il prend les valeurs suivantes de maintien 1, 2, 3, 4 correspondant aux temps de maintien respectifs 15, 30, 60, 120 minutes.
- b : représente la charge utilisée pendant l'essai, il prend les valeurs suivantes 1, 2, 3 pour les charges respectives 2, 1, 0,5 bars.

Exemple :

P₂₃ : correspond à un échantillon ayant subi un traitement de perlitisation pour une durée de maintien 30 mn et est destiné à être sollicité sous une charge de 0.5 bar.

III.3.2 Profilométrie avant essais tribologiques

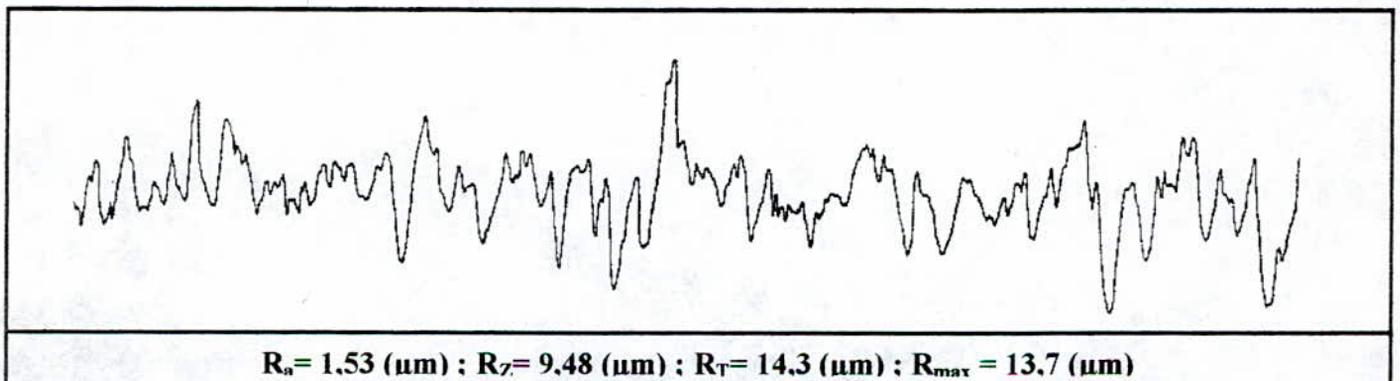


Figure III.15 : Profil de rugosité de l'échantillon F₁.

NB :

F₁ signifie que cet échantillon a subi un traitement de ferritisation pendant 15 mn .

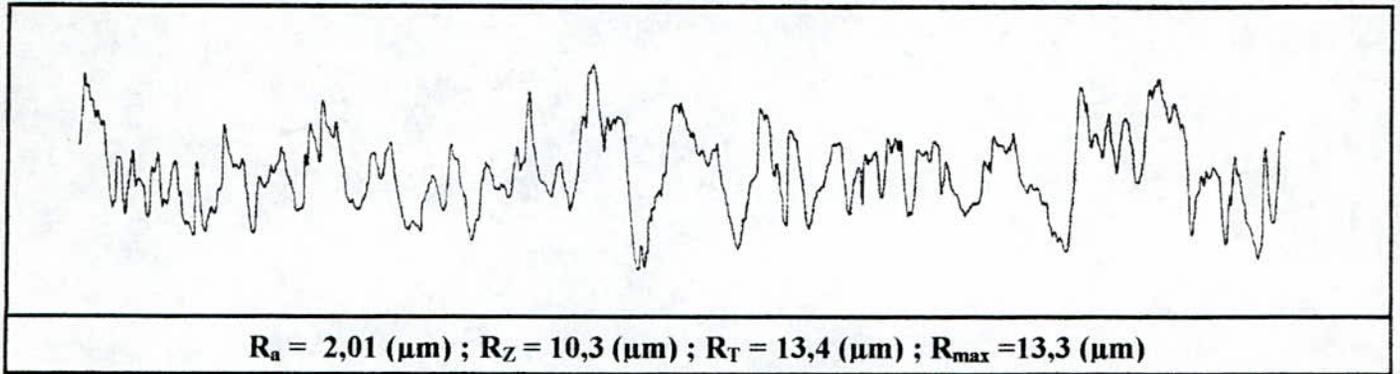


Figure III-16 : Profil de rugosité de l'échantillon F₂.

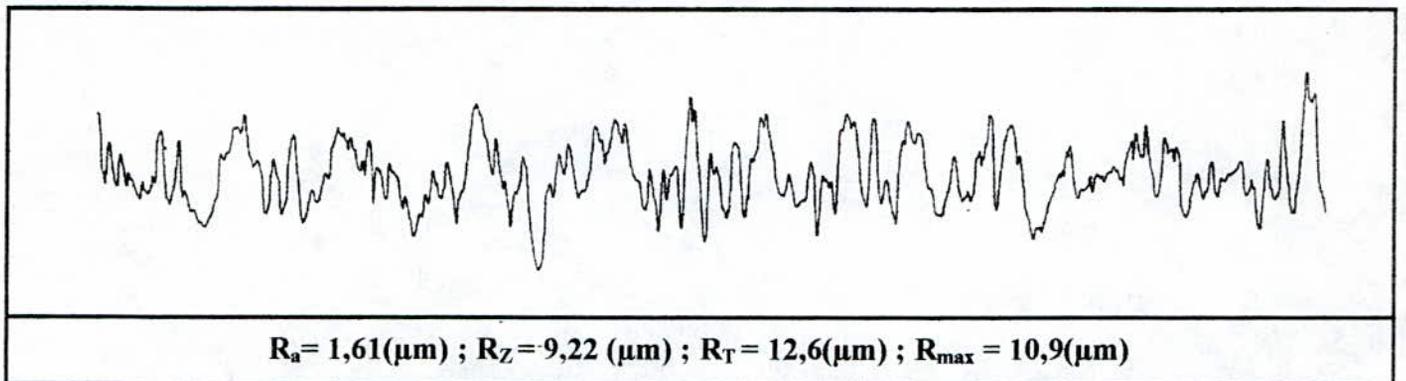


Figure III-17 : Profil de rugosité de l'échantillon F₃.

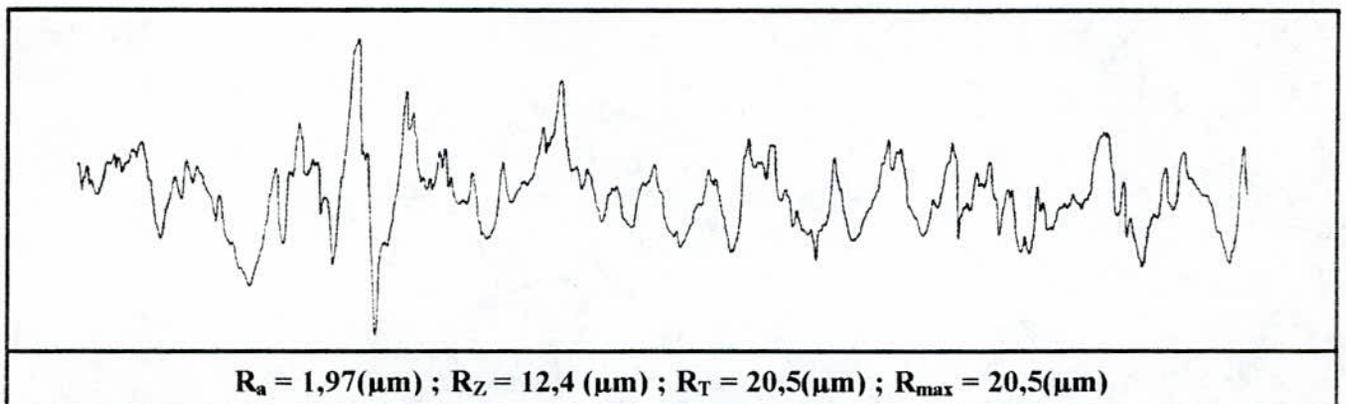


Figure III.18 : Profil de rugosité de l'échantillon F₄.

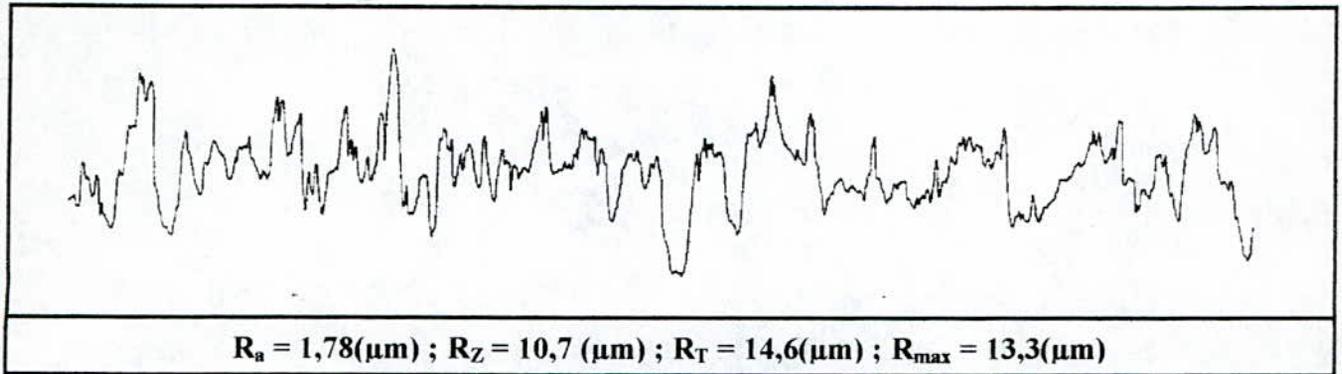


Figure III.19 : Profil de rugosité de l'échantillon P₁.

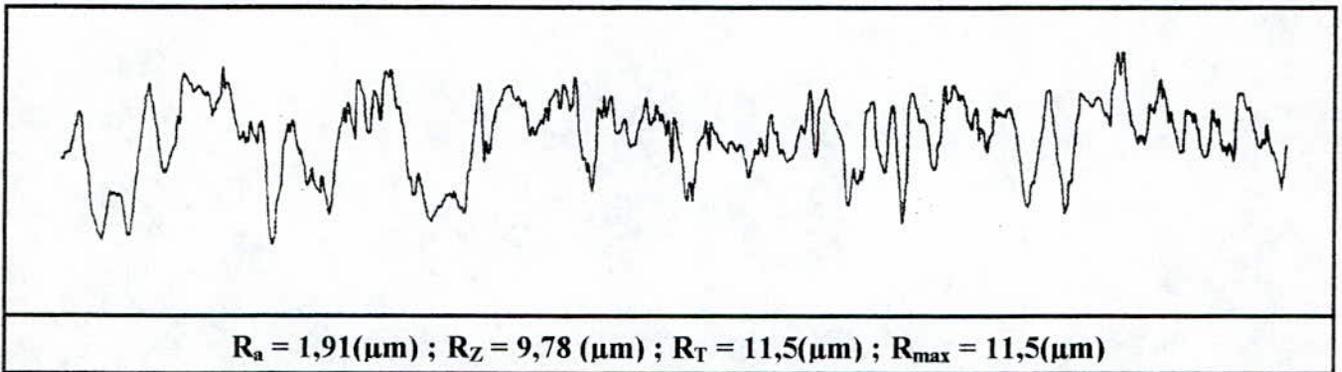


Figure III.20 : Profil de rugosité de l'échantillon P₂.

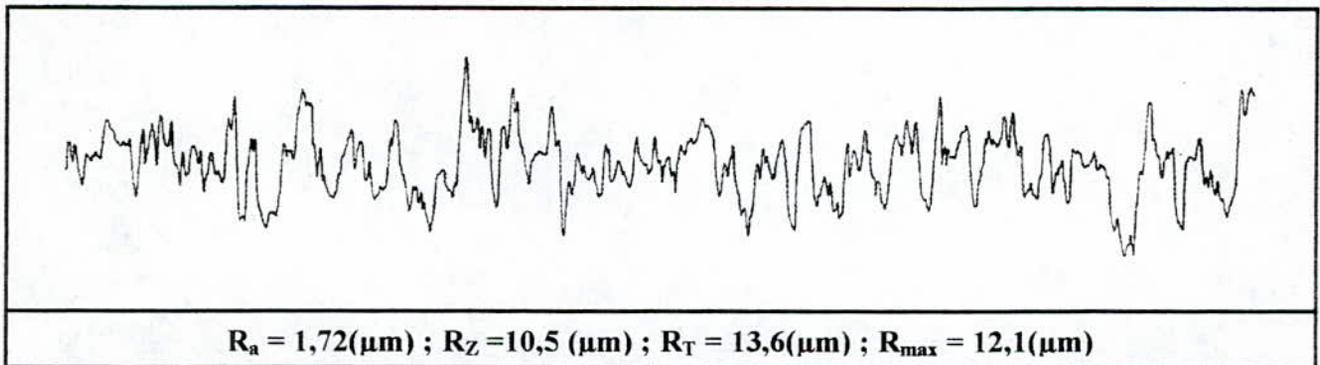


Figure III.21 : Profil de rugosité de l'échantillon P₃.

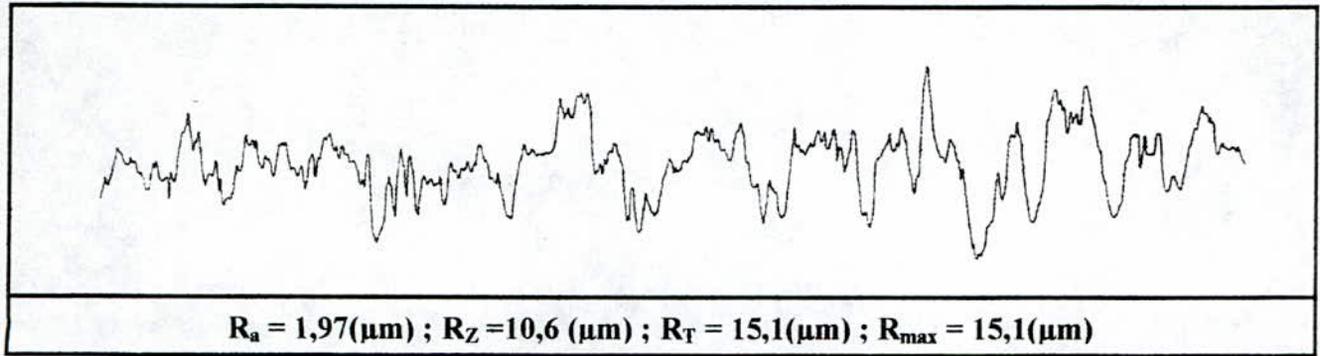


Figure III.22 : Profil de rugosité de l'échantillon P4.

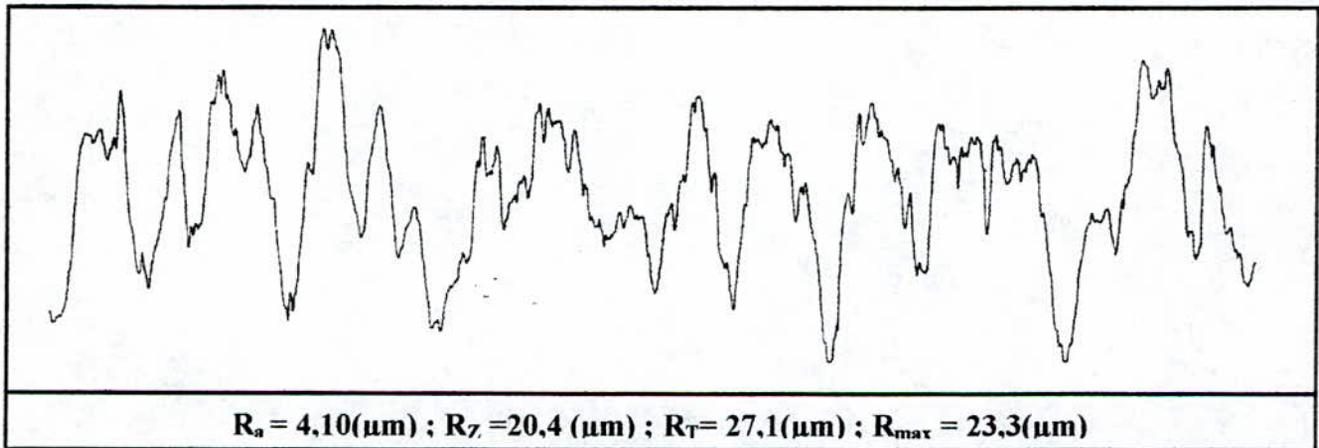


Figure III.23 : Profil de rugosité du cylindre en G.S.A.

III.4 Essais tribologiques

III.4.1 Choix des paramètres étudiés

Pour notre étude, on a opté pour le choix des paramètres suivants :

- durée de l'essai
- charge
- vitesse

III.4.2 Influence de la durée de l'essai sur l'usure à différentes charges

- on observe pour les échantillons qui ont subi un traitement de ferritisation de la nuance G.S.C, qu'il existe une proportionnalité entre la perte de masse et la durée de la sollicitation pour la gamme de charge choisie, ceci apparaît clairement sur les **figures III.24, III.25, III.26 et III.27**. D'autre part, on constate aussi qu'il y a augmentation de la pente en fonction de la diminution de la dureté.

On peut donc classer nos échantillons dans l'ordre décroissant du point de vue résistance à l'usure et ceci en fonction de la durée de maintien de ferritisation comme suit :

F-1, F-2, F-3, F-4

On constate aussi que l'augmentation de la charge pour une même gamme d'échantillons engendre une augmentation de la perte de masse.

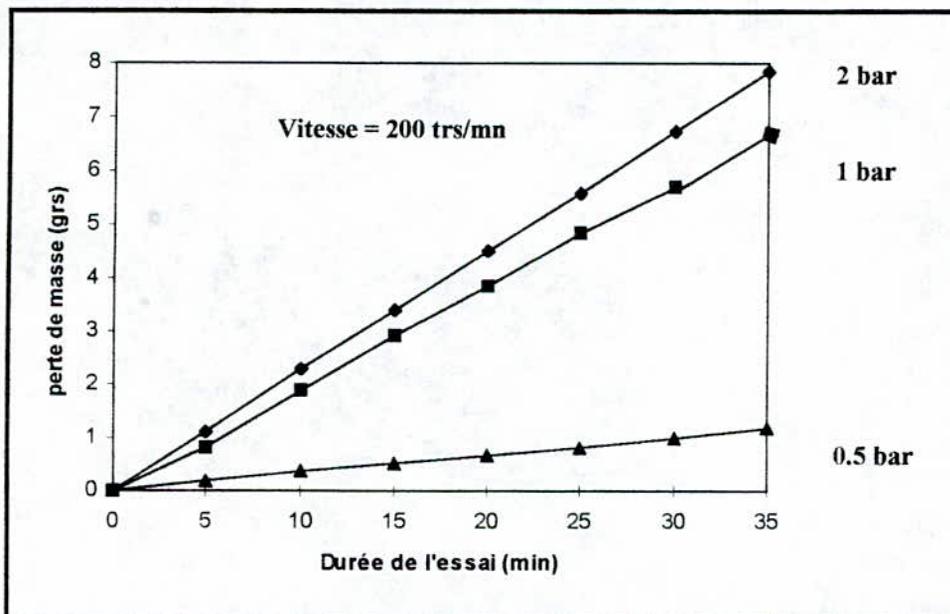
- en ce qui concerne les échantillons ayant subi une perlitisation, on observe toujours une proportionnalité entre la perte de masse et la durée de l'essai et cette perte de masse augmente en fonction de la diminution du temps de maintien.

On peut donc classer ces échantillons selon leur résistance à l'usure dans l'ordre croissant :

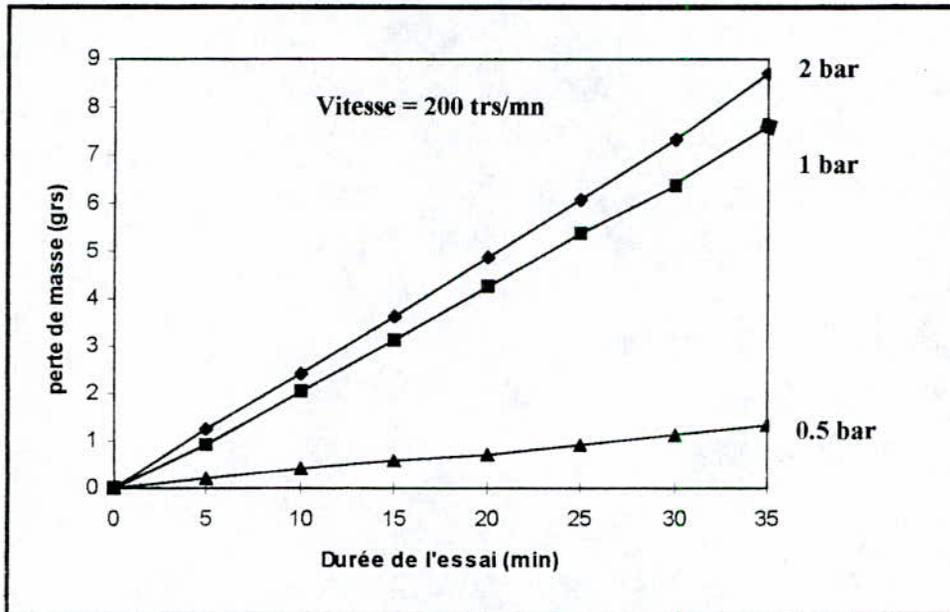
P-1, P-2, P-3, P-4

Toutes ces constatations sont fondées sur les courbes enregistrées consécutivement aux essais et portées sur les **figures III.28, III.29, III.30, III.31**.

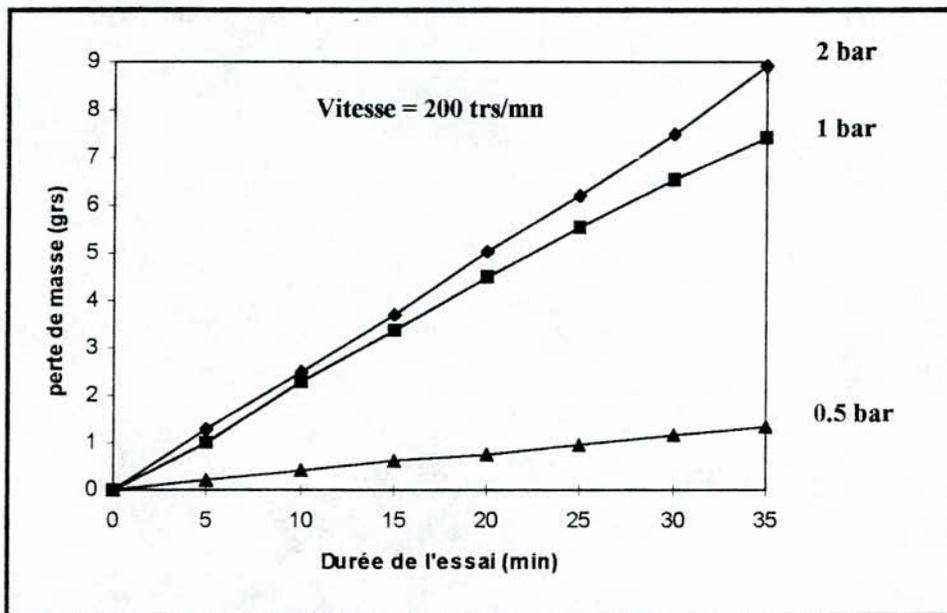
Nombre de tours	Perte de masse (grs)			Durée de la sollicitation (mn)
	F ₁₁	F ₁₂	F ₁₃	
0	0	0	0	0
1000	1,127	0,831	0,178	5
2000	2,301	1,890	0,356	10
3000	3,400	2,930	0,534	15
4000	4,520	3,850	0,652	20
5000	5,600	4,867	0,831	25
6000	6,740	5,700	1,000	30
7000	7,835	6,410	1,187	35

Tableau III.3 : Perte de masse pour les échantillons F_{1-b}.Figure III.24 : Perte de masse en fonction de la durée de l'essai pour les échantillons F_{1-b}.

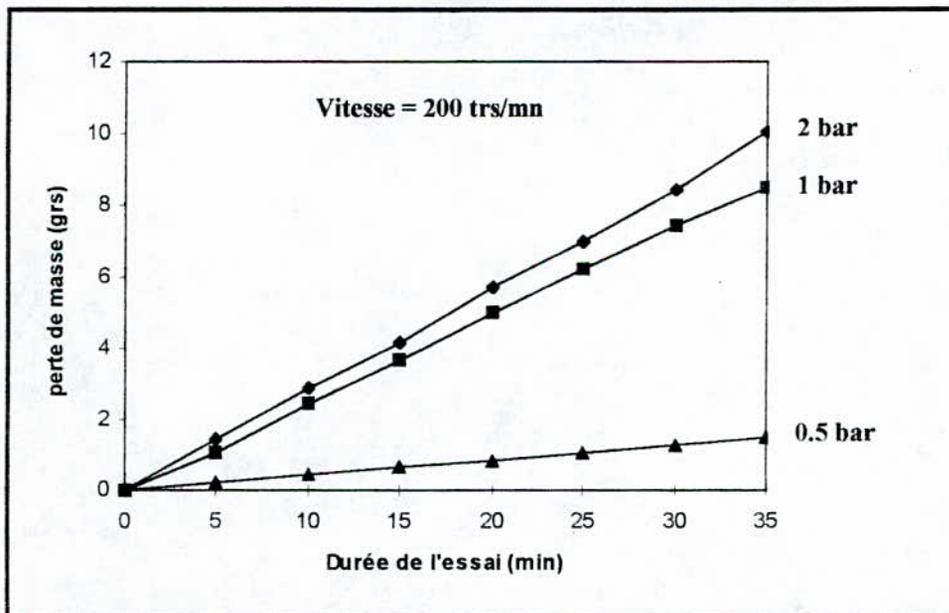
Nombre de tours	Perte de masse (grs)			Durée de la sollicitation (mn)
	F ₂₁	F ₂₂	F ₂₃	
0	0	0	0	0
1000	1,1255	0,925	0,198	5
2000	2,420	2,060	0,396	10
3000	3,633	3,125	0,594	15
4000	4,880	4,250	0,726	20
5000	6,078	5,385	0,925	25
6000	7,333	6,380	1,123	30
7000	8,720	7,236	1,321	35

Tableau III.4 : Perte de masse pour les échantillons F_{2-b}Figure III.25 : Perte de masse en fonction de la durée de l'essai pour les échantillons F_{2-b}.

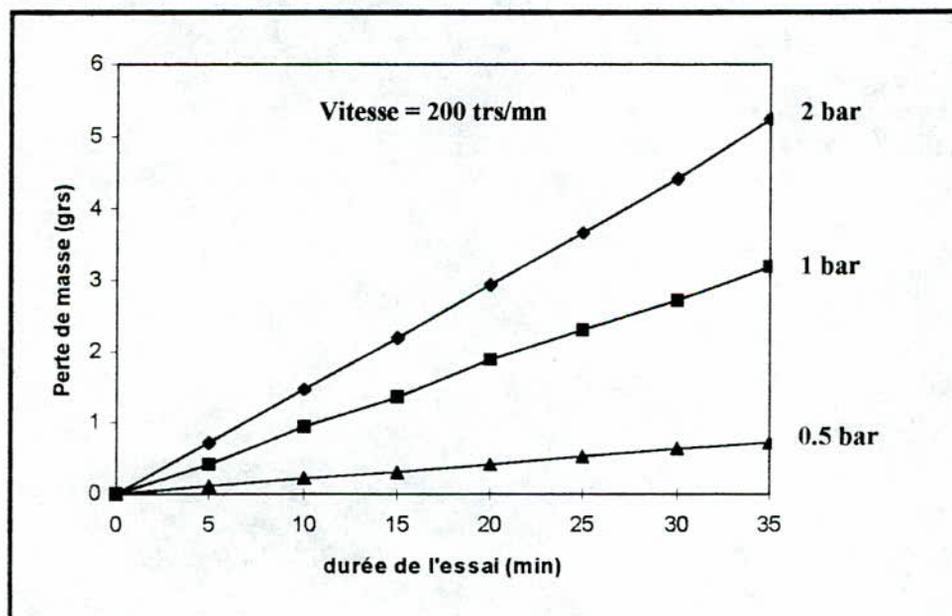
Nombre de tours	Perte de masse (grs)			Durée de la sollicitation (mn)
	F ₃₁	F ₃₂	F ₃₃	
0	0	0	0	0
1000	1,285	1,002	0,203	5
2000	2,481	2,312	0,406	10
3000	3,722	3,602	0,609	15
4000	5,076	4,502	0,744	20
5000	6,226	5,550	0,947	25
6000	7,512	6,562	1,150	30
7000	8,934	7,409	1,353	35

Tableau III.5 : Perte de masse pour les échantillons F_{3-b}.Figure III.26 : Perte de masse en fonction de la durée de l'essai des échantillons F_{3-b}.

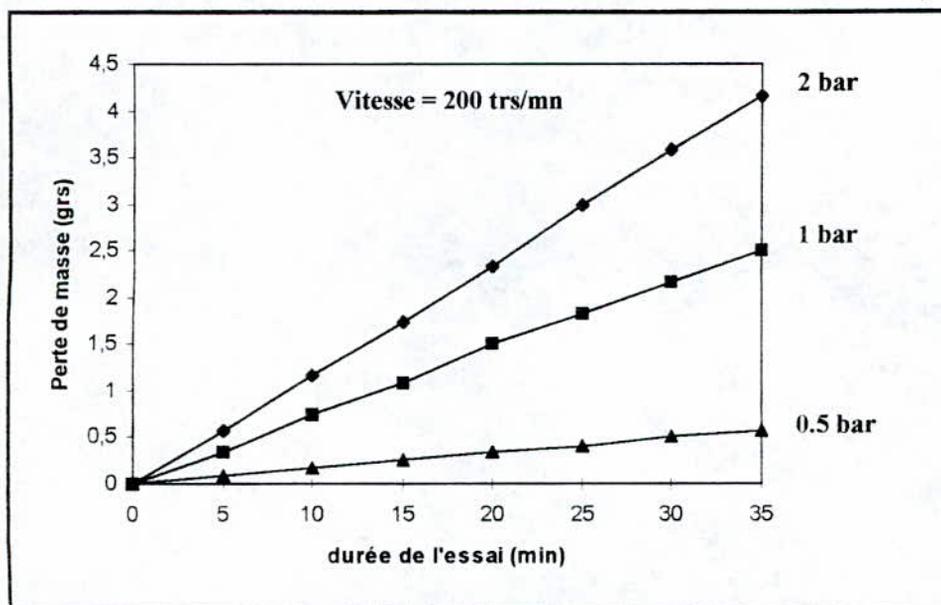
Nombre de tours	Perte de masse (grs)			Durée de la sollicitation (mn)
	F ₄₁	F ₄₂	F ₄₃	
0	0	0	0	0
1000	1,444	1,064	0,228	5
2000	2,887	2,458	0,456	10
3000	4,181	3,654	0,684	15
4000	5,702	4,995	0,836	20
5000	6,994	6,234	1,064	25
6000	8,439	7,450	1,292	30
7000	10,03	8,510	1,520	35

Tableau III.6 : Perte de masse pour les échantillons F_{4-b}.Figure III.27 : Perte de masse en fonction de la durée de l'essai pour les échantillons F_{4-b}.

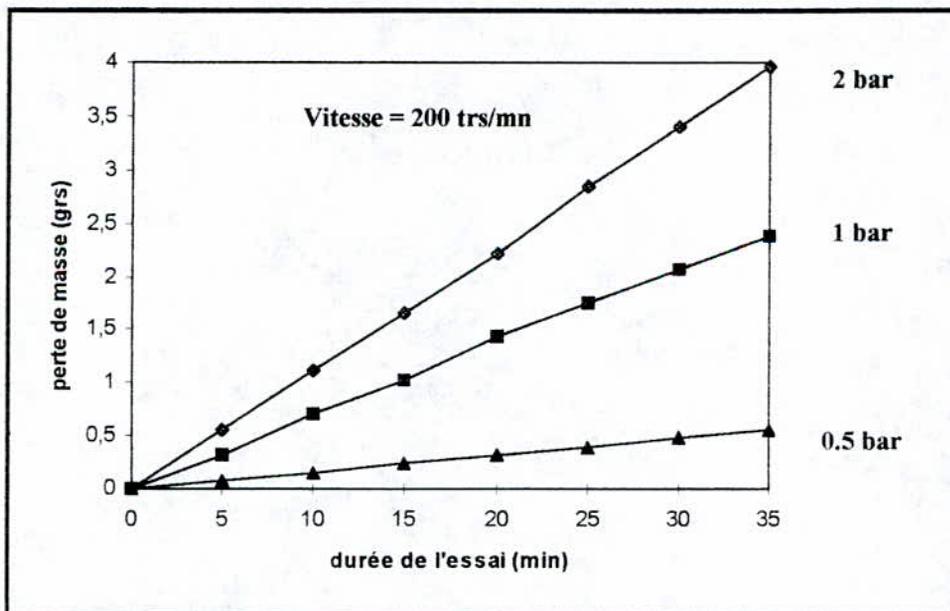
Nombre de tours	Perte de masse (grs)			Durée de la sollicitation (mn)
	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	
0	0	0	0	0
1000	0,735	0,420	0,100	5
2000	1,470	0,940	0,210	10
3000	2,200	1,360	0,310	15
4000	2,940	1,890	0,420	20
5000	3,675	2,310	0,520	25
6000	4,410	2,730	0,630	30
7000	5,250	3,210	0,730	35

Tableau III.7 : Perte de masse pour les échantillons P_{1-b}.Figure III.28 : Perte de masse en fonction des durées de l'essai des échantillons P_{1-b}.

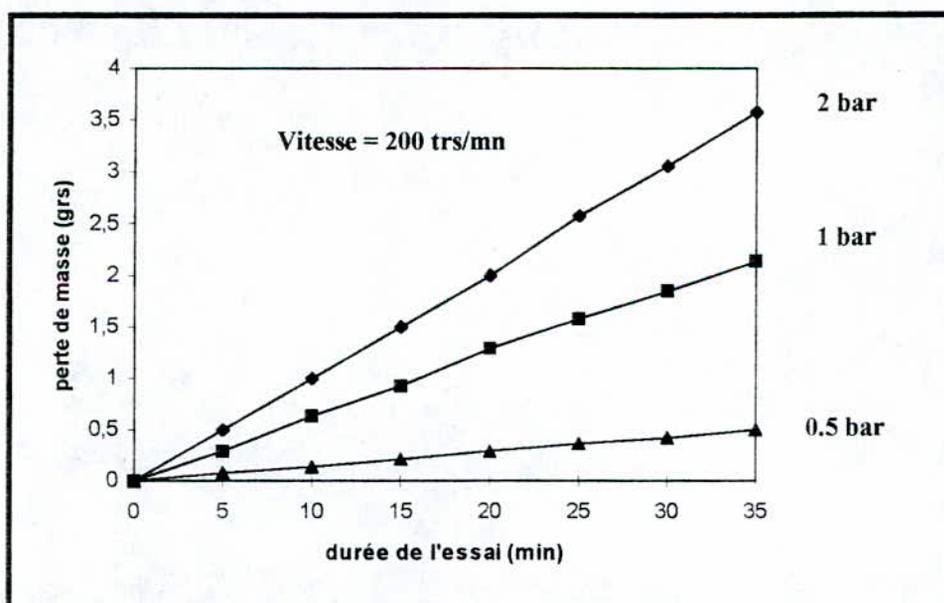
Nombre de tours	Perte de masse (grs)			Durée de la sollicitation (mn)
	P ₂₁	P ₂₂	P ₂₃	
0	0	0	0	0
1000	0,580	0,330	0,080	5
2000	1,160	0,750	0,160	10
3000	1,750	1,080	0,250	15
4000	2,330	1,500	0,330	20
5000	3,011	1,832	0,413	25
6000	3,583	2,177	0,501	30
7000	4,170	2,511	0,586	35

Tableau III.8 : Perte de masse pour les échantillons P_{2-b}.Figure III.29 : Perte de masse en fonction de la durée de l'essai des échantillons P_{2-b}.

Nombre de tours	Perte de masse (grs)			Durée de la sollicitation (mn)
	P ₃₁	P ₃₂	P ₃₃	
0	0	0	0	0
1000	0,555	0,317	0,079	5
2000	1,110	0,713	0,158	10
3000	1,665	1,031	0,237	15
4000	2,220	1,427	0,317	20
5000	2,855	1,744	0,396	25
6000	3,410	2,062	0,475	30
7000	3,965	2,379	0,550	35

Tableau III.9 : Perte de masse pour les échantillons P_{3-b}.Figure III.30 : Perte de masse en fonction de la durée de l'essai pour les échantillons P_{3-b}.

Nombre de tours	Perte de masse (grs)			Durée de la sollicitation (mn)
	P ₄₁	P ₄₂	P ₄₃	
0	0	0	0	0
1000	0,499	0,285	0,070	5
2000	0,999	0,642	0,142	10
3000	1,498	0,927	0,214	15
4000	1,998	1,284	0,285	20
5000	2,569	1,570	0,356	25
6000	3,060	1,855	0,428	30
7000	3,568	2,141	0,499	35

Tableau III.10 : Perte de masse pour les échantillons P_{4-b}.Figure III.31 : Perte de masse en fonction de la durée de l'essai pour les échantillons P_{4-b}.

III.4.3 Influence de la vitesse sur l'usure

Pour étudier ce facteur , on a choisi deux échantillons seulement : un qui possède une mauvaise tenue à l'usure , en outre l'échantillon F_4 et l'autre celui qui a eu une grande résistance à l'usure par rapport aux autres (P_4). Pour cet essai , on fait varier la vitesse de rotation de l'arbre et on fixe la durée de l'essai ainsi que la charge.

- La durée de l'essai a été fixée à **05 minutes** .
 - La charge a été fixée à **01 bar**.
- Pour l'échantillon P_4 , on constate l'existence d'un pic sur la courbe *vitesse = f(perte de masse)* qui caractérise le maximum de la perte de masse , puis une diminution rapide de celle ci (**figure III.32**). Pour cet échantillon à structure perlitique , on voit que pour une vitesse inférieure à 400 trs/mn la perte de masse est croissante . A partir de 400 trs/mn , on constate une diminution rapide de la perte de masse jusqu'à la vitesse de 700 trs/mn , autrement dit une bonne tenue à l'usure .
- Pour l'échantillon F_4 , on constate une augmentation continue de la perte de masse en fonction de l'augmentation de la vitesse , ceci apparaît sur la **figure III.33**.

Vitesse (trs/mn)	100	200	300	400	500	600	700
Perte de masse (grs)	0,135	0,280	0,533	0,639	0,427	0,260	0,080

Tableau III.11 : Perte de masse en fonction de la vitesse pour l'échantillon P_4 .

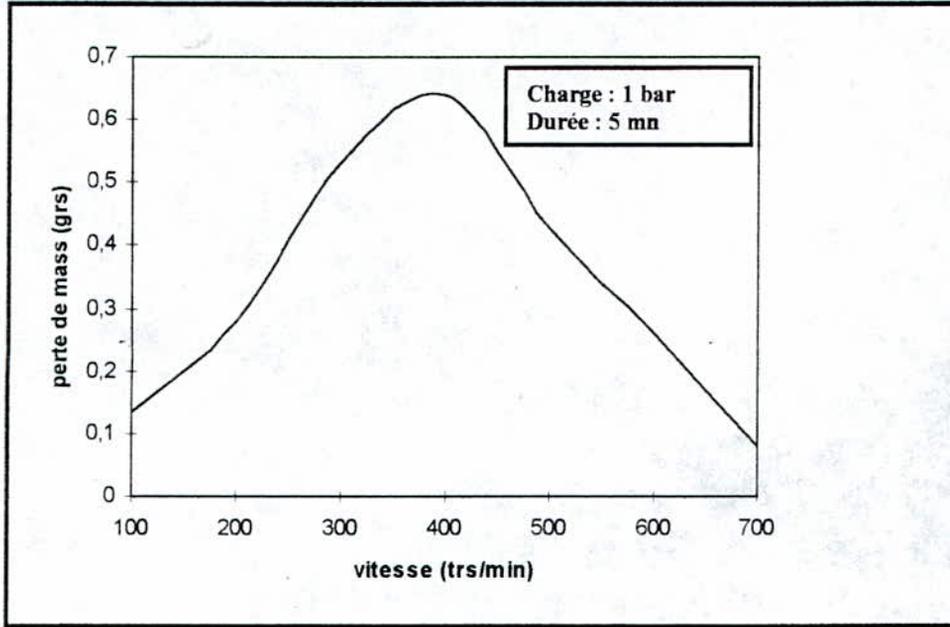


Figure III.32 : Perte de masse en fonction de la vitesse pour l'échantillon P₄.

Vitesse (trs/mn)	100	200	300	400	500	600	700
Perte de masse (grs)	0.840	1.050	1.950	2.875	3.735	4.136	4.887

Tableau III.12: Perte de masse en fonction de la vitesse pour l'échantillon F₄.

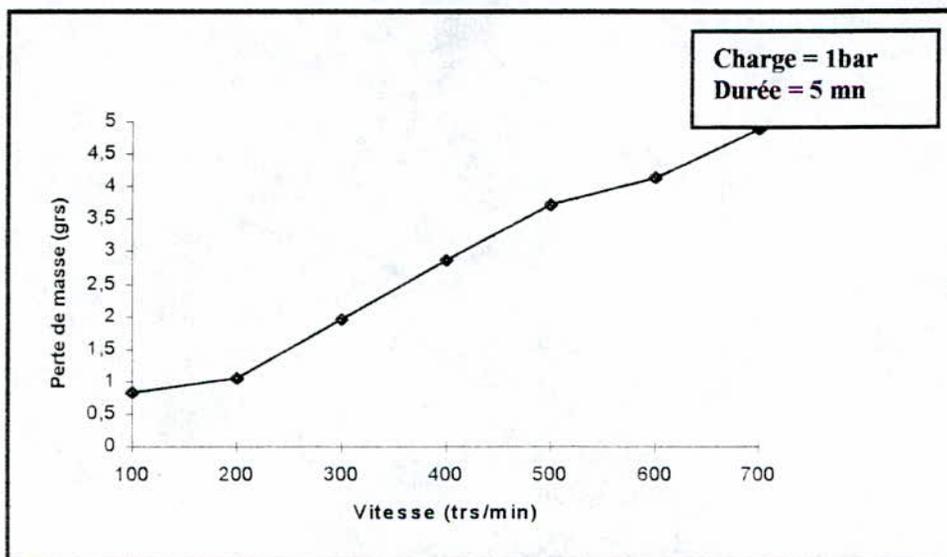


Figure III.33 : Perte de masse en fonction de la vitesse pour l'échantillon F₄.

III.5 Profilométrie après essais tribologiques

Pour comparer l'état de surface de nos échantillons avant essai d'usure, on a pris les mêmes échantillons sur lesquels on a effectué une mesure de l'état de surface avant essai et on a effectué également la même mesure après avoir subi un essai d'usure de 35 minutes et sous une charge de 1 bar avec une vitesse de 200 trs/mn. Les profils de rugosités apparaissent sur les **figure III. 34 , 35 , 36 , 37 , 38 , 39 , 40 , 41 , 42.**

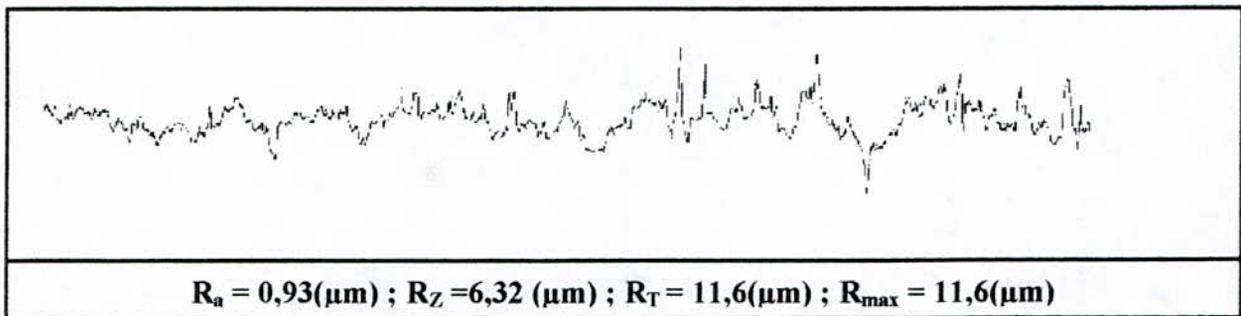


Figure III.34 : Profil de rugosité de l'échantillon F₁₋₂.

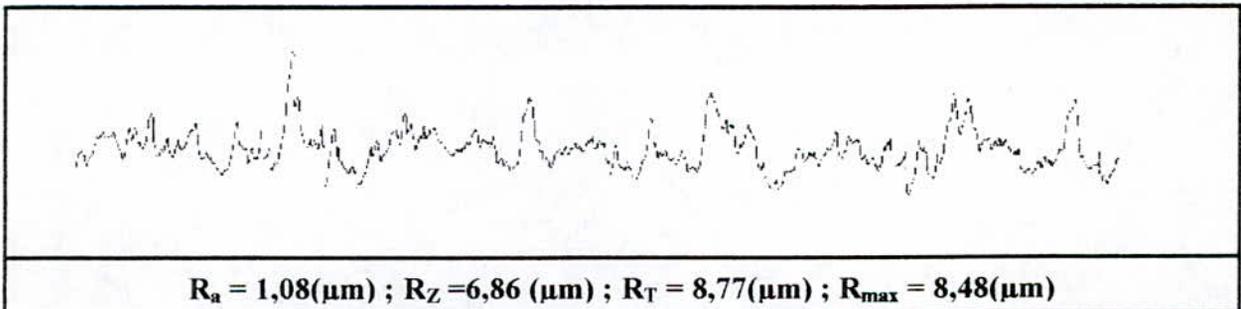


Figure III.35 : Profil de rugosité de l'échantillon F₂₋₂.

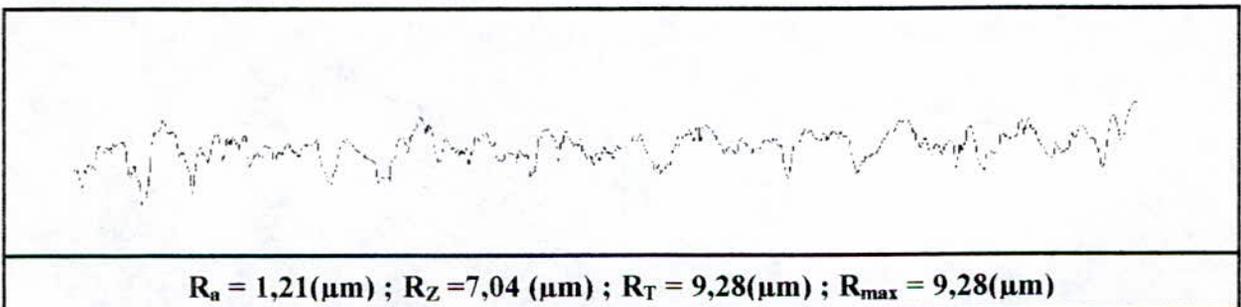


Figure III.36 : Profil de rugosité de l'échantillon F₃₋₂.

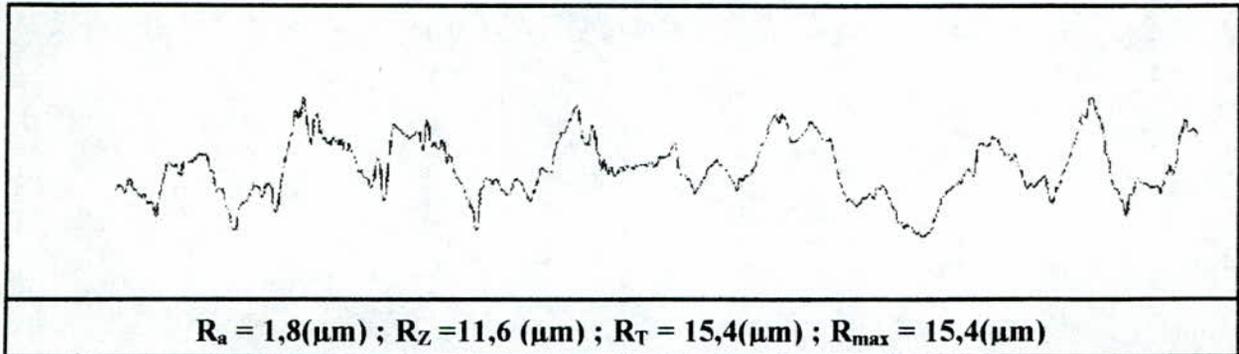


Figure III.37 : Profil de rugosité de l'échantillon F4.2.

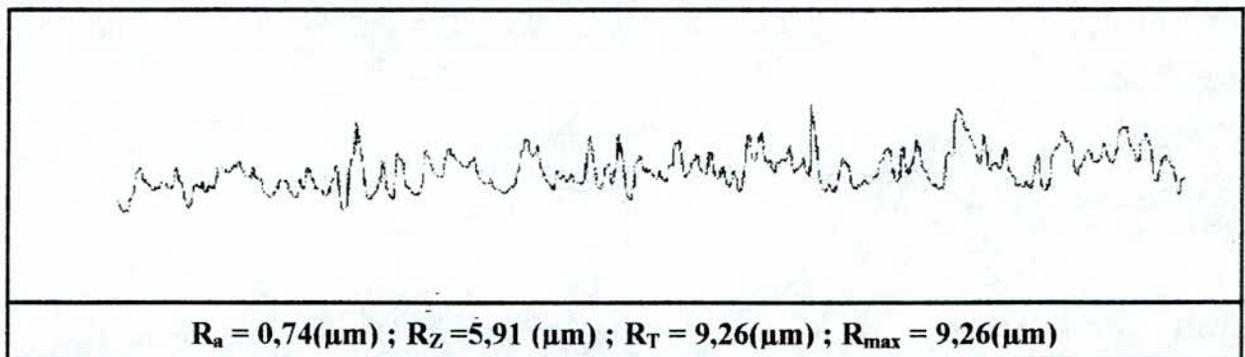


Figure III.38: Profil de rugosité de l'échantillon P1.2.

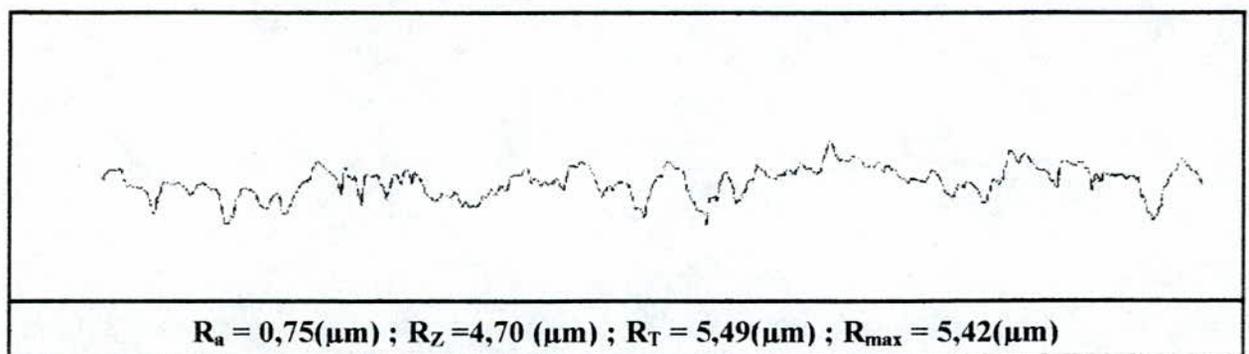


Figure III.39: Profil de rugosité de l'échantillon P2.2.

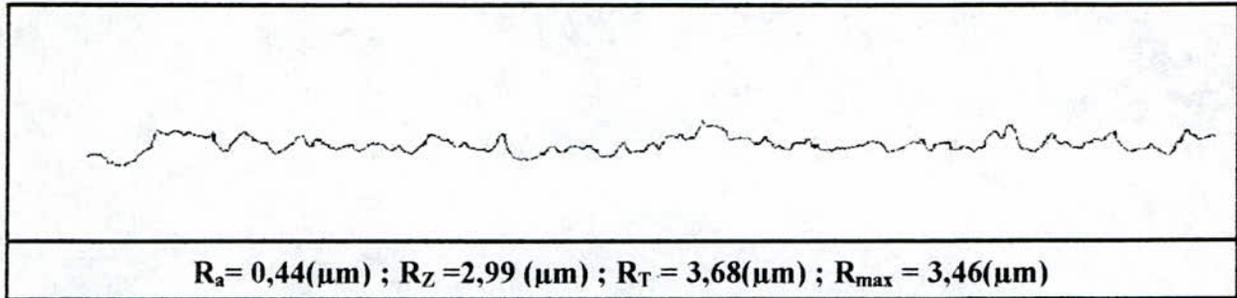


Figure III.40: Profil de rugosité de l'échantillon P_{3.2}.

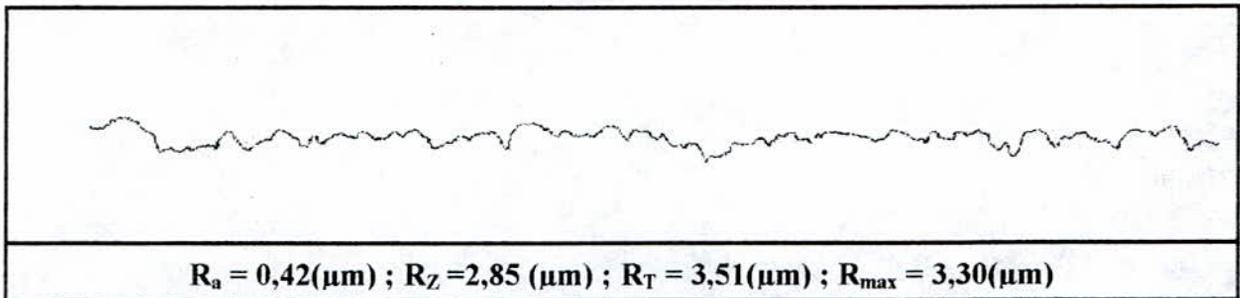


Figure III.41: Profil de rugosité de l'échantillon P_{4.2}.

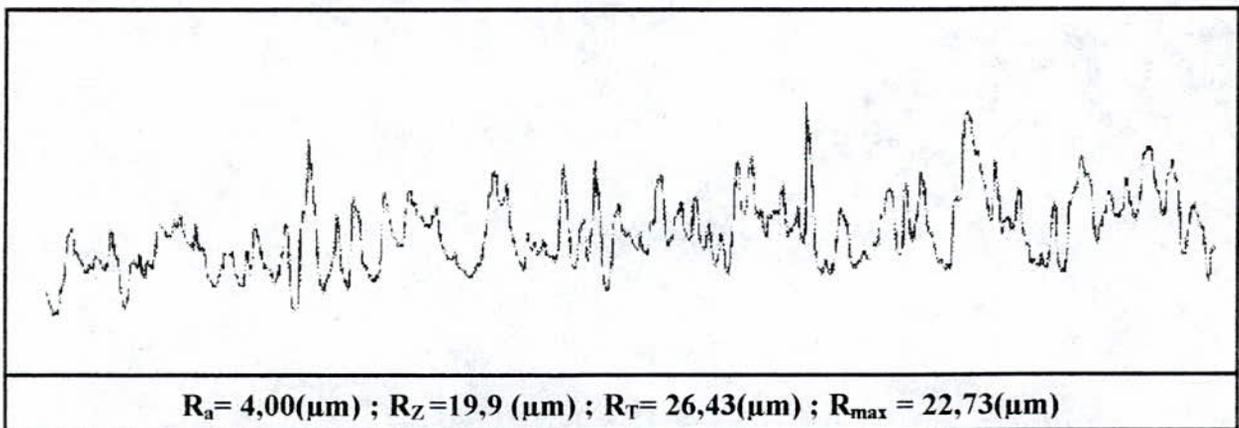


Figure III.42: Profil de rugosité du cylindre en G.S.A.

III.6 Essai de dureté

Pour le calcul des duretés, nous avons utilisé l'essai Brinell avec les caractéristiques suivantes :

- une charge de **3000 Kg**.
- Une bille de diamètre **10 mm**.
- Un temps de maintien de la charge de est 30 secondes.

La forme des éprouvettes soumises à l'essai pour la nuance G.S.C est un parallélépipède long de sorte à effectuer plusieurs essais (voir **figure III.43**).

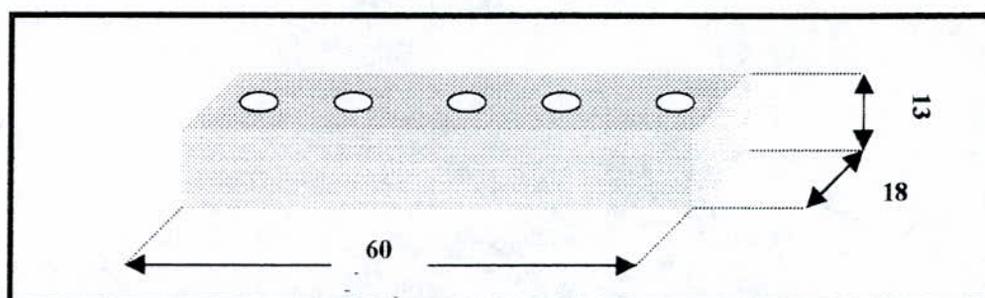


Figure III.43 : Schéma de l'éprouvette en fonte G.S.C.

Pour la fonte G.S.A, on a découpé un cylindre de **20 mm** de hauteur sur lequel on a effectué deux méplats de telle sorte que l'éprouvette soit en équilibre sur la machine de dureté, et on a effectué des essais de dureté sur la circonférence ainsi que sur la face du cylindre. La **figure III.44** illustre la forme de ces éprouvettes en question.

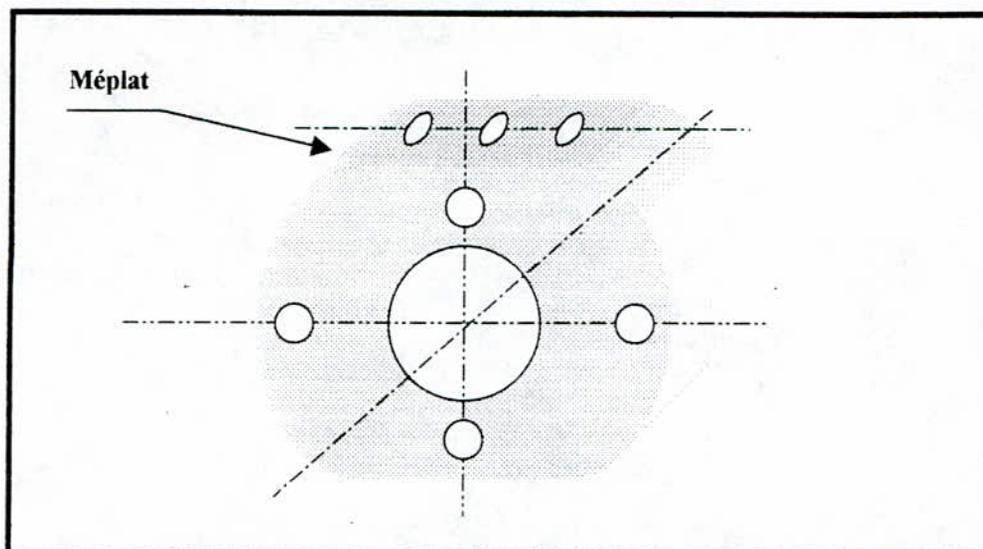


Figure III.44: Schéma de l'éprouvette en G.S.A.

Après avoir effectué une moyenne sur la base de trois essais de dureté HB , le tableau III.13 récapitulatif illustre l'ensemble des valeurs :

Type de traitement	Durée de maintien lors du traitement thermique (mn)	Dureté (HB) avant essai d'usure
Traitement de perlitisation	15	197
	30	248
	60	261
	120	290
Traitement de perlitisation	15	187
	30	168
	60	164
	120	146
Brut de coulée GSC		217
Brut de coulée GSA		243

Tableau III.13 : Dureté des échantillons avant essais d'usure.

On constate à partir des résultats obtenus pour les deux nuances GSC et GSA à l'état traité que les traitements thermiques effectués sont réussis. D'ailleurs on peut aussi le voir sur les différentes micrographies optiques qui illustrent l'évolution de la structure en fonction de la durée du traitement. On constate également qu'au cours du traitement de ferritisation, la fraction de la ferrite augmente avec le temps de maintien, ce qui se confirme par la baisse de la dureté. Par contre pour le cas du traitement de perlitisation, le taux de ferrite diminue.

Après les essais d'usure, on a effectué des essais de dureté, dans le but de situer l'effet de ces essais sur cette caractéristique mécanique.

Les échantillons choisis, sont ceux ayant subi l'essai d'usure sous une charge de 1 bar et une vitesse de 200 trs / mn, et ceci pour une durée de 35 mn.

On pourra résumer l'évolution des duretés après usure dans le **tableau III.14** :

Type de traitement	Durée de maintien lors du traitement thermique (mn)	Dureté (HB) avant essai d'usure	Dureté(HB) après essai d'usure
Traitement de perlitisation	15	197	200
	30	248	250
	60	261	265
	120	290	292
Traitement de ferritisation	15	187	190
	30	168	171
	60	164	168
	120	146	150

Tableau III.14 : Comparaison des duretés des différents échantillons avant et après usure.

A partir du tableau III.14, on constate qu'il y a une augmentation des duretés avant et après usure de 2 à 5 unités 'HB'. Ceci est dû à l'écrouissage superficiel qui s'est produit pendant les essais sous l'effet de la charge.

III.7 Discussion

D'après les courbes relatives aux essais d'usure , nous avons constaté une croissance rapide de la perte de masse en fonction du temps , ce qui laisse entendre qu'on est dans le *régime transitoire* de l'usure.

Au début de l'essai , l'échantillon est mis en contact avec la face du cylindre . Ce contact est bien évidemment , assuré par les aspérités .

Dés la mise en marche du dispositif expérimental , les aspérités sont sujettes à des contraintes de compression et de cisaillement. Sous l'effet de l'accroissement de la température en surface , qui est causée par le frottement et la contrainte de compression : des microsoudures sont alors créées. Ces dernières , seront détruites sous l'effet de la contrainte de cisaillement , on assistera à un transfert de matière.

Ceci est vérifié par la comparaison des profils de surface avant et après essai de nos échantillons, d'ailleurs on constate qu'à la fin de l'essai , l'état de surface s'améliore , ce qui confirme l'arrachement des aspérités.

Le mécanisme d'usure qui s'installe en premier lieu , c'est l'usure adhésive. Dans ce cas , on a remarqué aussi que certaines aspérités arrachées auparavant jouent le rôle de particules abrasives ceci générerait un grincement et puis la particule est chassée fortement grâce à la force centrifuge du cylindre . Notons cependant , que ce phénomène ne s'est pas produit fréquemment. Afin de pouvoir observer l'état de la surface de contact , on a stoppé un essai d'usure avant la durée prévue : on a pu constater qu'il y a avait une accumulation des particules formées dans le contact , sous l'effet de la charge . Ces particules sont compactées , une parties transportée le long du contact , dans le sens du mouvement : ce sont ces particules qui causent l'usure abrasive. Une deuxième partie de particules reste piégée à l'intérieur de la surface de contact , de telle sorte qu'on peut distinguer une séparation entre les deux antagonistes .Cependant cette séparation disparaissait vite , car l'adhérence du troisième corps à l'une des deux surfaces , est mauvaise .Ceci n'est pas vraiment appréciable pour les échantillons ayant subit un traitement de ferritisation , ce qui génère une perte de masse conséquente ; tandis pour les échantillons perlitisés , cette couche présente une meilleure adhérence. Ce qui a donné une perte de masse moins importante que celles enregistrées pour les échantillons ferritisés.

Notons que les propriétés mécaniques ainsi que la charge appliquée pendant l'essai, ont une influence directe sur la tenue de la couche produite par les particules piégées. Une augmentation

de la charge, engendre une grande force de frottement et de cisaillement, ce qui provoque l'arrachement du film et la mise à nu des surfaces. Ceci fait amplifier l'effet de l'usure par une plus grande perte de masse : la perte de masse engendrée par l'usure étant proportionnelle à la charge.

Les particules dégagées par usure, ont été récupérées, étalées sur une surface assez grande, on a pu remarquer, qu'il y a des particules colorées en rouge, qui ne peuvent être que le résultat d'une oxydation du fer en Fe_3O_4 , et cela nous donne une idée de l'élévation de la température pendant les essais. Ceci se confirme avec l'étude entreprise par **EDEN et al [20]**.

La **figure III.32**, relative à un échantillon perlitisé, nous montre l'apparition d'un pic, ceci nous incite à dire qu'il y a une vitesse optimale qui nous donne une perte de masse maximale : on peut interpréter ce phénomène par le fait qu'à faibles vitesses, la quantité des particules arrachées n'est pas grande. Ceci est dû aux frottements des frottements dont la valeur n'est pas importante. Mais plus cette vitesse croît, plus il y a une plus grande perte de masse qu'à la vitesse critique. Concernant les grandes vitesses, la quantité des particules est également faible, car elles seront piégées dans la surface de contact, qui joueront le rôle d'un film protecteur momentanément, par le fait qu'elles soient dures. Sans oublier le phénomène d'écrouissage superficiel, qui s'est traduit par une augmentation de la dureté.

Le contraire, a été constaté pour l'échantillon ferritisé : une augmentation de la vitesse implique une plus grande perte de masse, ceci est justifié par le fait que les particules piégées ne sont pas suffisamment dures pour pouvoir résister aux charges importantes. Ce que nous venons d'évoquer concorde parfaitement avec l'état de surface qui s'améliore à la fin des essais par rapport à l'état initial.

Les valeurs de la rugosité (R_a) sont inversement proportionnelles aux duretés, car les aspérités, sont arrachées soit d'une manière fragile ou ductile, bien entendu, celles arrachées avec fragilité offrent un bon état de surface. Quant aux aspérités qui s'arrachent d'une manière ductiles, après déformation plastique, génèrent une grande rugosité consécutive à cette déformation.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Lors de notre étude sur l'usure de la fonte G.S.C, on a pu constater que les deux modes d'usure présents sont ; l'adhésion et l'abrasion, ainsi qu'un phénomène tribochimique qui s'est manifesté par l'oxydation des surfaces de contact. Il y a eu apparition également d'un troisième corps formé par l'accumulation des débris d'usure, ce qui nous amène à dire que d'une étude d'usure à deux corps, on est passé à l'étude d'usure à trois corps.

De plus, on dira que l'usure de notre fonte (avec les différents traitements effectués) diminue avec la durée de la sollicitation et aussi avec l'augmentation de la charge.

D'après les résultats, on peut s'avancer et affirmer que le processus d'usure enregistré dans nos essais, présente le domaine transitoire de l'usure, appelé aussi 'Rodage'. Pour atteindre le domaine permanent, où on observera une stabilisation de la perte de masse en fonction du temps, on devra prolonger la durée de la sollicitation. Néanmoins, c'est le domaine transitoire, qui conditionne la suite de l'usure.

Les propriétés mécaniques de la fonte GSC, jouent un rôle primordial pour la tenue de cette dernière. Par exemple , l'augmentation de la dureté offre une bonne résistance à l'usure.

L'évolution des propriétés au cours de la sollicitation, est un facteur très important, puisqu'il agit sur le phénomène, et ceci a été enregistré par l'augmentation des duretés.

L'évolution du phénomène d'usure de deux à trois corps, peut être exploité dans le sens de favoriser son adhérence afin de limiter les pertes de masse. Les structures à grandes proportions de ferrite, sont à déconseiller pour les travaux nécessitant un contact à grande charge.

Toutefois, les résultats obtenus lors de cette étude, ne peuvent être généralisés pour les fontes G.S.C, même si ces dernières ont subits les mêmes traitements que ceux de notre étude, Ceci est nécessaire de définir une qualité de fonte qui sera la plus adaptée pour chaque cas particulier et ceci se fera à travers l'étude du tribosysteme considéré.

On recommande la détermination du point de transition, à partir duquel, on accède au domaine permanent.

Les pertes de masse, sont facilement rattrapables par le design des pièces, cependant, un problème de fissuration pourra surgir surtout dans le domaine permanent, qui serait très intéressant de l'étudier et de procéder à une quantification numérique tout en se basant sur le modèle de LEACH & BORLAND qui s'avère être le plus valable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M.F.ASHBY-D.R.H.JONES : Les MATERIAUX : 'MICROSTRUCTURE ET MISE EN OEUVRE', tome II. - Edition Dnuod- 1991.
- [2] Techniques de l'ingénieur :
M-380 : 'Propriétés des fontes grises ordinaires'
M-381 : 'Les fontes grises ordinaires'
M-1145 : 'Traitement thermique des fontes'
- [3] L.LAKTINE : 'Métallographie et traitements thermiques des métaux', 3^e édition MIR.
- [4] J.BARRALIS- G.MODER : 'Précis de métallurgie' , 5^e édition Nathan.
- [5] N.MEZIANE – N.GUELBI : 'Caractérisation des fontes grises de l'U.F.R et optimisation de leurs paramètres de recuit', Projet de fin d'étude 1996 – USTHB.
- [6] E.SALHI : 'Etude des fontes GS alliées traitées thermiquement et étude à l'aptitude à la soudure à l'arc électrique de la fonte G.S.C non alliée' , thèse d'état , E.N.P- 1994.
- [7] D.FRANCOIS - A.PINEAU : 'Comportement mécanique des matériaux , viscoplasticité , endommagement , mécanique de rupture ' , Edition Hermes.
- [8] M.CARTIER – B.LOICHON – J.P.FARJAUDON : 'Contribution à l'étude du comportement en frottement des céramiques' , Journée matériaux , Arcueil , tome III, céramiques . 25-26 Septembre 1984.
- [9] J.T.BURWELL – C.D.STRAND : J.of.appl.phys.18,28-1952.
- [10] J.F.ARCHARD-W.HIRST, Royal Society of London , proceeding serie A , 236-397 1956.
- [11] F.P.BOWDEN – D.TABOR : 'Friction lubrication of solides', clarendon press , oxford 1958.

-
- [12] D.H.BUCKLEY : 'Friction , wear and lubrication in wacuum ' , ASA , SP-277 , Washington , 66 , 1971.
- [13] T.SASADA – S.NOROSE – H.MISHINA : 'The behaviuor of adherer fragments interposed between sliding surfaces and the formation process of wear particules' , J.lubrication techn , vol . 103 , pp.195-202 , 1981.
- [14] D.TREHEUX : 'Frottement et usure des céramiques ' , 28th special steels conference Liège , 05 , 1989 .
- [15] J.T.BURWELL , wear , vol 1 , 2 , pp.119-141 , 08 1957.
- [16] P.HEILMANN –D.A.RIGNEY , Met.Trans . A12 , 686 , 1981.
- [17] A.JOAN : 'Traitement thermique ' , 208 , pp.87-96 , 1987.
- [18] J.AYEL : Revue de l'institut français du pétrole , pp.703-727 , 07 – 08- 1976.
- [19] Techniques de l'ingénieurs : **B-586-585.**